

Propuesta de mitigación para el atropellamiento de fauna silvestre: estudio de caso

Karime Angarita-Corzo¹ / Claudia P. Ceballos² / Cesar Rojano-Bolaño³ / Nathalia M Correa-Valencia⁴

Resumen

A pesar de su impacto socioeconómico positivo, la infraestructura vial promueve importantes perturbaciones ambientales, incluidas las colisiones entre vehículos y animales silvestres. Este estudio de caso tuvo como objetivo identificar estrategias de mitigación frente a los eventos de atropellamiento de fauna silvestre en la Autopista al Mar 1 (Antioquia, Colombia), de acuerdo con los resultados de la caracterización de la mortalidad. Se describieron las estrategias de mitigación del fenómeno de atropellamiento de fauna silvestre en la vía, mediante la comparación de los resultados obtenidos durante la caracterización con la información recolectada en la salida de campo, con el fin de optimizar las herramientas ya existentes. De los 295 individuos de fauna silvestre atropellados entre el 2018 y el 2021, las zarigüeyas y las iguanas fueron las especies de mayor afectación; adicionalmente, se tuvieron en cuenta el zorro perro y el oso melero como especies de posible vulnerabilidad para el cruce de la carretera, debido a su biología y a sus condiciones ecológicas. Se realizó un diagnóstico comparativo sobre los puntos críticos (*hotspots*) obtenidos durante la caracterización y la georreferenciación de las medidas adoptadas por la Concesionaria, y finalmente se planteó una propuesta de mitigación con siete medidas que se consideran estrategias de mitigación del atropellamiento de fauna silvestre. Nuestra propuesta resalta la importancia de formular estrategias conjuntas para la prevención del atropellamiento de fauna silvestre en la Autopista al Mar 1. No obstante, también puede ser útil para cualquier carretera nacional o internacional, siempre que se adapten las herramientas a las necesidades específicas.

Palabras clave: atropellamiento; conservación; fauna silvestre; iguana; mitigación; oso melero; zarigüeya; zorro perro.

Mitigation proposal for wildlife roadkill: a case study

Abstract

Despite its positive socioeconomic impact, road infrastructure promotes significant environmental disturbances, including collisions between vehicles and wildlife. This case study aimed to identify mitigation strategies for wildlife roadkill events on the Autopista al Mar 1 (Antioquia, Colombia), based on mortality characterization results. Mitigation strategies for the phenomenon of wildlife roadkill on the road were described through

1 Grupo de Investigación Centauro, Escuela de Medicina Veterinaria, Facultad de Ciencias Agrarias, Universidad de Antioquia (UdeA), 050034, Calle 70 n.º 52-21, Medellín, Colombia.

✉ karime.angaritac@udea.edu.co

🌐 <https://orcid.org/0009-0004-9192-9989>

2 Grupo de Investigación GAMMA, Escuela de Medicina Veterinaria, Facultad de Ciencias Agrarias, Universidad de Antioquia (UdeA), 050034, Calle 70 n.º 52-21, Medellín, Colombia.

✉ claudiap.cebaltos@udea.edu.co

🌐 <https://orcid.org/0000-0002-6513-4793>

3 Fundación Cunaguaro, Colombia, 850001.

✉ c.rojanob@gmail.com

🌐 <https://orcid.org/0000-0001-9481-0976>

4 Grupo de Investigación Centauro, Escuela de Medicina Veterinaria, Facultad de Ciencias Agrarias, Universidad de Antioquia (UdeA), 050034, Calle 70 n.º 52-21, Medellín, Colombia.

✉ mariadelp.correa@udea.edu.co

🌐 <https://orcid.org/0000-0001-8836-8827>

Cómo citar este artículo: Angarita-Corzo K, Ceballos CP, Rojano-Bolaño, C y Correa-Valencia NM. Propuesta de mitigación para el atropellamiento de fauna silvestre: estudio de caso. Rev Med Vet 2025;(51): e5601. <https://doi.org/10.19052/mv.vol1.iss51.5601>



a comparison of the results obtained during characterization with information collected in the field to optimize existing tools. Of the 295 wildlife individuals killed between 2018 and 2021, opossums and iguanas were the most affected species. In addition, the crab-eating fox and collared anteater were considered species with potential vulnerability to road crossing due to their biology and ecological conditions. A comparative diagnosis was conducted on critical points (hotspots) obtained during characterization and the georeferencing of measures adopted by the concessionaire. Finally, a mitigation proposal with seven measures was put forward as potential strategies for mitigating wildlife roadkill. Our proposal emphasizes the importance of formulating joint strategies for preventing wildlife casualties on the Autopista al Mar 1. However, it can be useful for any national or international road provided that the tools to specific needs.

Keywords: conservation; crab-eating fox; iguana; collared anteater; mitigation; opossum; roadkill; wildlife.

INTRODUCCIÓN

Las carreteras tienen un papel importante en el desarrollo económico y social del sector urbano y rural a nivel mundial, ya que facilitan el acceso a servicios de salud, mercados, escuelas y empleo. Esto contribuye a fomentar y lograr el crecimiento socioeconómico de una región o del área de influencia de una construcción [1]. En los últimos años, se han venido ejecutando obras viales de gran escala en Colombia como parte del Plan Maestro de Transporte Intermodal [2], lo que ha permitido conectar los diferentes municipios y mejorar la competitividad del país. Con este proyecto de infraestructura se crearon las vías de Cuarta Generación (4G), que comprenden más de 8000 km de carreteras, incluidos 1370 km de doble calzada y 140 túneles, distribuidos en más de 40 nuevas concesiones [3].

Sin embargo, a pesar del impacto positivo en el desarrollo económico de un territorio, las carreteras también generan impactos negativos en los componentes abióticos (físicos) y bióticos (flora y fauna) circundantes [4]. En el caso de la fauna silvestre, los animales pueden desplazarse a zonas más alejadas del bosque o cruzar la carretera con el riesgo de ser atropellados; el atropellamiento constituye una amenaza directa a la biodiversidad, ya que genera una reducción del tamaño poblacional y del flujo efectivo entre las poblaciones [5]. Este impacto es particularmente significativo en espe-

cies con baja agilidad, cuya limitada capacidad de desplazamiento dificulta el cruce de barreras artificiales como carreteras [6, 7].

Además, los atributos ecológicos de las especies, como sus estrategias de forrajeo, tamaño corporal y preferencias de hábitat, también influyen en su susceptibilidad a estos riesgos, lo que resalta la importancia de considerar estas variables en estrategias de conservación [8]. Aunque las tasas altas de atropellamiento representan una amenaza directa para las poblaciones al reducir su tamaño y diversidad genética [9, 10], tasas bajas o la ausencia de atropellamiento no necesariamente implican un impacto menor. En estos casos, estas condiciones pueden reflejar un fuerte efecto barrera generado por las carreteras, el cual restringe severamente los movimientos de los animales, lo que resulta en aislamiento poblacional y en un flujo genético bajo o nulo [11]. Este aislamiento puede tener consecuencias críticas para las especies silvestres, como la pérdida de variabilidad genética y un mayor riesgo de extinción local debido a la incapacidad de las poblaciones para adaptarse a cambios ambientales [12].

Para proteger los diferentes niveles de la biodiversidad, es prioritario iniciar planes de mitigación y seguimiento de la fauna atropellada. Entre las diferentes aproximaciones mundialmente reconocidas, se incluyen la construcción de pasos de fauna estratégicos, la educación ambiental, el vallado perimetral, los disuasores artifi-

ciales perimetrales, la señalización de advertencia y el manejo de los hábitats en bordes de la vía, así como el monitoreo constante de estas medidas [13- 15].

Estas estrategias permitirán minimizar el impacto sobre la fauna en el área de estudio siempre que se considere de forma precisa la ecología de las especies silvestres y el entorno físico y socioeconómico. De este modo, se facilita el desplazamiento de los animales entre diferentes parches de hábitat, se estabiliza la dinámica poblacional y, por último, se promueve el movimiento seguro de los animales a través de las carreteras [16].

En Colombia, el impacto en la mortalidad de la fauna silvestre por atropellamiento vehicular ha recibido poca atención, sin que exista una reglamentación clara [14]; además, la mayoría de las carreteras del país carecen de medidas de mitigación o se instalan intuitivamente sin estudios que respalden su ubicación y efectividad [13]. Dentro de la literatura disponible, se encuentra el *Manual de diseño geométrico de carreteras* publicado por el Ministerio de Transporte [17], el cual establece los parámetros para garantizar la elaboración de diseños y requerimientos para la elaboración de proyectos viales, según sea su tipo y grado de detalle. Sin embargo, en dicho manual no se incluyen directrices para el diseño de pasos de fauna como propuesta de mitigación del atropellamiento de los animales silvestres, ni otros aspectos relacionados con este fenómeno. Por lo tanto, este estudio de caso tuvo como objetivo identificar estrategias de mitigación frente a los eventos de atropellamiento de fauna silvestre en la Autopista al Mar 1 (Antioquia, Colombia), de acuerdo con los resultados de la caracterización de la mortalidad.

MATERIALES Y MÉTODOS

A continuación, se detallan los procedimientos metodológicos empleados en el desarrollo del estudio, incluyendo la descripción del tipo de estudio y del lugar donde se llevó a cabo, la caracterización de la mortalidad y la identificación de medidas de mitigación.

Tipo y lugar de estudio

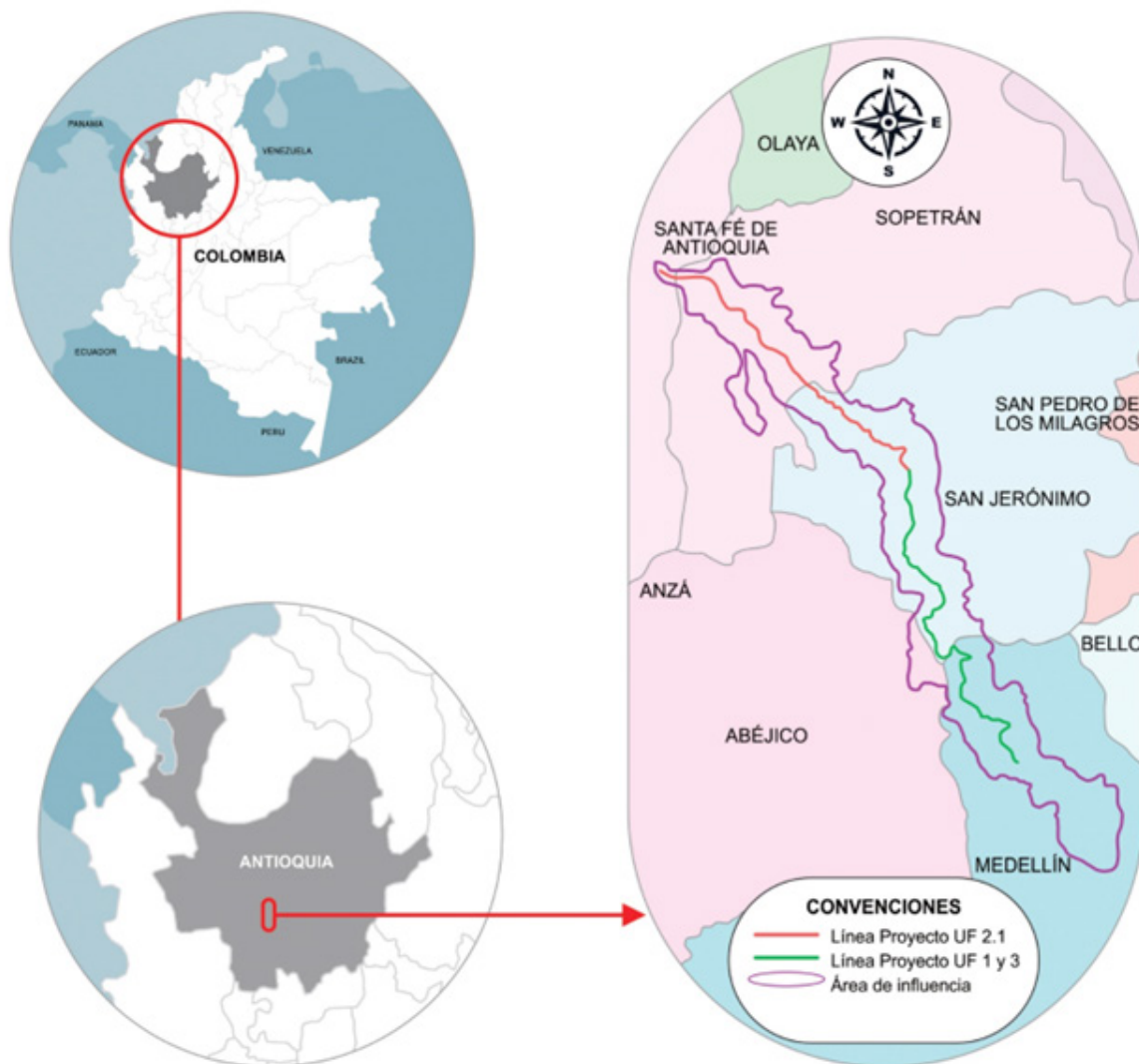
Se llevó a cabo un estudio de caso en la Autopista al Mar 1, ubicada entre los municipios de Santa Fe de Antioquia (6°30'44.8" N y 75°49'04.6" W) y Medellín (6°17'28.4" N y 75°38'59.9682" W), en el departamento de Antioquia (Colombia). El área de estudio se circunscribió a la construcción de dos carriles de la Autopista al Mar 1, con una longitud aproximada de 34,7 km (véase la figura 1).

Caracterización de la mortalidad de fauna silvestre (identificación de especies de fauna silvestre de importancia en la vía y de *hotspots* de atropellamiento)

Se realizó un estudio observacional retrospectivo utilizando fuentes primarias para analizar los eventos de atropellamiento de fauna silvestre registrados entre enero del 2018 y diciembre del 2021. El muestreo consistió en dos recorridos semanales por la vía, realizados en un vehículo que se desplazaba a una velocidad promedio de 60 km/h. Cada recorrido fue realizado por dos observadores capacitados que registraron un total de 400 recorridos durante el período de estudio. Se documentaron 295 eventos de atropellamiento, y las especies más afectadas fueron la zarigüeya común (*Didelphis marsupialis*) y la iguana verde (*Iguana iguana*).

Los datos recopilados incluyeron la fecha (día, mes y año), las coordenadas geográficas (latitud y longitud), la clasificación taxonómica (clase, nombre científico y nombre común), el estado de desarrollo (juvenil, subadulto y adulto) y el tipo de cobertura vegetal circundante (bosque, cultivo, humedal, potrero, río/cauce y área urbanizada). Los cadáveres fueron removidos y enterrados lejos de la vía para evitar duplicaciones en los registros y minimizar el riesgo de nuevos atropellamientos asociados a la presencia de carroñeros.

Figura 1. Área de localización del proyecto Autopista al Mar 1



Fuente: elaboración propia.

Se emplearon estadísticas descriptivas para resumir el número de atropellamientos de anfibios, reptiles, aves y mamíferos por mes y año, utilizando Stata v.16.1. [18]. También se calcularon tasas de atropellamiento (eventos/día, eventos/km/día, eventos/año) mediante el *software* Siriema®: Road Mortality Software v.2.0 [19], el cual ajusta los datos crudos para considerar la probabilidad de detección y la persistencia de los cadáveres en la carretera según su tamaño y características (por ejem-

plo, una duración estimada de 1 a 4 días, de acuerdo con el peso promedio del individuo).

Para analizar la distribución espacial de los eventos, se realizaron análisis de conglomerados y análisis de puntos críticos (*hotspots*). Se utilizó la estadística de Ripley's K en 2D para evaluar la distribución no aleatoria de los eventos, así como un análisis de *hotspots* basado en un radio de 100 m, 1000 simulaciones y un intervalo de

confianza del 95 %. El *software* Siriema generó representaciones gráficas que permitieron identificar áreas con mayor concentración de eventos.

Adicionalmente, se llevaron a cabo regresiones logísticas con el *software* R® [20] para identificar los parámetros ambientales que mejor predicen los eventos de atropellamiento. Las variables incluyeron información espacial sobre la cobertura del terreno circundante (bosques, cursos de agua, cultivos, áreas urbanizadas) y la geometría de la carretera (segmentos curvos o rectos). Estas variables fueron calculadas en segmentos de 1 km, lo que permitió evaluar la relación entre la presencia de *hotspots* y las características del paisaje y de la carretera. Este análisis permitió reconocer la vulnerabilidad de algunas especies frente a la carretera y, específicamente, al atropellamiento, lo que facilitó la propuesta de medidas que se adapten a su comportamiento *in situ*.

Identificación de medidas para mitigación de fauna silvestre atropellada a nivel mundial

Se llevó a cabo una revisión de la literatura en diferentes bases de datos científicas entre octubre y noviembre del 2023. Las bases de datos consultadas fueron Google Scholar, Scopus, Web of Science y Mendeley. Los criterios de búsqueda se establecieron con el objetivo de identificar medidas de mitigación de atropellamiento de fauna silvestre a nivel mundial.

Criterios de búsqueda

Se emplearon combinaciones de palabras clave en inglés y español para garantizar la exhaustividad de la revisión (véase la tabla 1), y se tuvieron en cuenta criterios de inclusión y exclusión (véase la tabla 2).

Tabla 1. Agrupación de categorías principales para la búsqueda de literatura

Categoría	Palabras clave en español	Palabras clave en inglés
Fauna silvestre/atropellamiento	“fauna silvestre”, “atropellamiento”, “mortalidad vial”	“wildlife”, “roadkill”, “wildlife mortality”
Mitigación/intervenciones	“mitigación”, “medidas”, “estrategias de manejo”	“mitigation”, “measures”, “management strategies”
Infraestructura/carreteras	“infraestructura vial”, “carreteras”, “ecoductos”	“road infrastructure”, “highways”, “wildlife crossings”

Fuente: elaboración propia.

Tabla 2. Criterios de inclusión y exclusión

Criterios de inclusión	Criterios de exclusión
Publicaciones entre el 2000 y el 2023	Estudios publicados antes del 2000
Estudios con enfoque en medidas de mitigación	Estudios sin enfoque en mitigación o fauna
Idiomas: español e inglés	Idiomas diferentes al español o inglés
Acceso completo a través de suscripción o abierto	Artículos sin acceso al texto completo

Fuente: elaboración propia.

Estado actual de medidas de mitigación en la vía de estudio

El 23 de septiembre del 2023, se realizó una visita de campo para inspeccionar las medidas de mitigación implementadas en la vía de interés. Durante esta salida, se georreferenciaron y registraron las condiciones físicas de estas estructuras (como vallados, pasos elevados y señales de advertencia). Adicionalmente, se implementaron métodos indirectos para evaluar su eficacia, entre ellos el monitoreo de rastros (huellas y excrementos) y el uso de cámaras trampa en puntos estratégicos para determinar si las especies de fauna silvestre utilizaban efectivamente dichas medidas.

RESULTADOS

Los resultados obtenidos permitieron caracterizar las especies de fauna silvestre de importancia registradas

en la Autopista al Mar 1, así como analizar la implementación de medidas de mitigación asociadas a la infraestructura vial.

Especies de fauna silvestre de importancia en la Autopista al Mar 1

Durante la caracterización del atropellamiento de fauna silvestre realizada para la Autopista al Mar 1, a partir de la información correspondiente al periodo 2018-2021, se obtuvo como resultado que las especies con mayor mortalidad en la vía fueron la zarigüeya común y la iguana verde (véase la tabla 3). Adicionalmente, se tuvieron en cuenta las características de distribución y adaptación a hábitats con perturbaciones antropogénicas de las especies de zorro perro y del oso melero. Al igual que la zarigüeya común, estas dos especies poseen hábitos nocturnos, por lo que es posible que la luz de los vehículos genere desorientación y reduzca la visibilidad, lo que incrementa el riesgo de colisiones [15].

Tabla 3. Eventos de fauna silvestre atropellada en la Autopista al Mar 1 (Antioquia, Colombia) y su frecuencia de acuerdo con su clase taxonómica (2018-2021)

Familia	Nombre científico	Nombre común	Categoría (IUCN)	Frecuencia (% en 4 años)
Clase Amphibia				
Bufo	<i>Rhinella horribilis</i>	Sapo común	LC	7 (2,37)
Leptodactylinae	<i>Leptodactylus</i> sp.	Rana terrestre	LC	2 (0,68)
Clase Reptilia				
Alligatoridae	<i>Caiman crocodilus</i>	Babilla	LC	2 (0,68)
Boidae	<i>Boa imperator</i>	Boa cazadora	LC	16 (5,42)
Colubridae	<i>Atractus</i> sp.	Serpiente tierrera	DD	2 (0,68)
	<i>Clelia equatoriana</i>	Cazadora negra	LC	1 (0,34)
	<i>Dendrophidion bivittatus</i>	Guardacaminos corredora	LC	1 (0,34)
	<i>Dipsadinae</i> sp.	Culebra	LC	1 (0,34)
	<i>Lampropeltis micropholis</i>	Falsa coral	LC	1 (0,34)
	<i>Mastigodryas pleii</i>	Guardacaminos	LC	7 (2,37)
	<i>Mastigodryas</i> sp.	Culebra guardacaminos	LC	1 (0,34)
	<i>Oxyrhopus petolarius</i>	Falsa rabo de aji	NE	5 (1,69)
	<i>Pliocercus euryzonus</i>	Falsa coralilla	LC	1 (0,34)
	<i>Pseudoboa neuwiedii</i>	Candelilla	LC	4 (1,35)
<i>Spilotes pullatus</i>	Serpiente toche	LC	1 (0,34)	

Continúa

Familia	Nombre científico	Nombre común	Categoría (IUCN)	Frecuencia (% en 4 años)
Dactyloidae	<i>Anolis</i> sp.	Lagartija	DD	1 (0,34)
Emydidae	<i>Trachemys</i> sp.	Hicotea	DD	1 (0,34)
Iguanidae	<i>Iguana iguana</i>	Iguana verde	LC	40 (13,56)
	<i>Polychrus gutturosus</i>	Camaleón andino	LC	1 (0,34)
Kinosternidae	<i>Kinosternon leucostomum</i>	Tortuga tapaculo	DD	1 (0,34)
Teiidae	<i>Ameiva ameiva</i>	Lagarto terrestre	LC	1 (0,34)
	<i>Ameiva</i> sp.	Lagarto	LC	1 (0,34)
	<i>Holcosus festivus</i>	Lobito	LC	1 (0,34)
Scincidae	<i>Mabuya mabouya</i>	Lagarto mabuya	NE	1 (0,34)
Unidentified				6 (2,03)
Clase Aves				
Accipitridae	<i>Rupornis magnirostris</i>	Gavilán caminero	LC	1 (0,34)
Ardeidae	<i>Bubulcus ibis</i>	Garza garrapatera	LC	1 (0,34)
Cathartidae	<i>Coragyps atratus</i>	Gallinazo común	LC	15 (5,08)
Corvidae	<i>Cyanocorax affinis</i>	Carriquí pechiblanco	LC	1 (0,34)
Cuculidae	<i>Crotophaga ani</i>	Garrapatero ani	LC	2 (0,68)
	<i>Crotophaga</i> sp.	Garrapatero	LC	1 (0,34)
	<i>Piaya cayana</i>	Cuco ardilla	LC	1 (0,34)
Fringillidae	<i>Euphonia laniirostris</i>	Eufonia gorgiamarilla	LC	4 (1,35)
Galliformes	<i>Ortalis columbiana</i>	Guacharaca común	LC	7 (2,37)
Icteridae	<i>Psarocolius decumanus</i>	Oropéndola crestada	LC	1 (0,34)
Hirundinidae	<i>Stelgidopteryx ruficollis</i>	Golondrina gorgirrufa	LC	1 (0,34)
Strigidae	<i>Megascops choliba</i>	Búho currucutú	LC	10 (3,39)
Picidae	<i>Colaptes puntigula</i>	Carpintero moteado	LC	1 (0,34)
Psittacidae	<i>Forpus conspicillatus</i>	Perico de anteojos	LC	1 (0,34)
Thraupidae	<i>Ramphocelus dimidiatus</i>	Toche pico de plata	LC	1 (0,34)
	<i>Ramphocelus flammigerus</i>	Tángara flamiguera	LC	1 (0,34)
	<i>Sporophilla</i> sp.	Arrocero	LC	1 (0,34)
	<i>Stilpnia vitriolina</i>	Tángara rastrojera	LC	1 (0,34)
	<i>Tangara gyrola</i>	Tángara cabecibaya	LC	1 (0,34)
	<i>Thraupis episcopus</i>	Azulejo	LC	4 (1,35)
	<i>Thraupis palmarum</i>	Azulejo de palmeras	LC	2 (0,68)
Trochilidae	<i>Amazilia</i> sp.	Colibrí	LC	2 (0,68)
	<i>Amazilia tzacalt</i>	Amazilia de cola rufa	LC	1 (0,34)
Troglodytidae	<i>Campylorhynchus griseus</i>	Cucarachero común	LC	1 (0,34)
Turdidae	<i>Catharus ustulatus</i>	Zorzal	LC	1 (0,34)
	<i>Turdus ignobilis</i>	Mirra común	LC	4 (1,35)
	<i>Turdus</i> sp.	Mirra	LC	3 (1,02)

Continúa

Familia	Nombre científico	Nombre común	Categoría (IUCN)	Frecuencia (% en 4 años)
Tyrannidae	<i>Elaenia flavogaster</i>	Fiofio ventriamarillo	LC	1 (0,34)
	<i>Machetornis rixosa</i>	Picabuey	LC	1 (0,34)
	<i>Myiodynastes maculatus</i>	Bienteveo rayado	LC	1 (0,34)
	<i>Myiozetetes similis</i>	Benteveo mediano	LC	1 (0,34)
	<i>Tyrannus melancholicus</i>	Sirirí común	LC	9 (3,05)
	<i>Tyrannidae</i> sp.	Atrapamoscas	-	1 (0,34)
Vireonidae	<i>Vireo flavoviridis</i>	Vireo verdeamarillo	LC	1 (0,34)
	<i>Vireo olivaceus</i>	Vireo ojirrojo	LC	1 (0,34)
Unidentified				8 (2,71)
Clase Mammalia				
Aotidae	<i>Aotus cf lemurinus</i>	Marteja	VU	2 (0,68)
Canidae	<i>Cerdocyon thous</i>	Zorro perro	LC	12 (0,04)
Not reported	<i>Chiroptera</i> sp.	Murciélago	-	1 (0,34)
Dasyproctidae	<i>Dasyprocta punctata</i>	Ñeque	LC	1 (0,34)
Didelphidae	<i>Caluromys lanatus</i>	Chucha lanuda	LC	1 (0,34)
	<i>Didelphis marsupialis</i>	Zarigüeya común	LC	54 (18,30)
	<i>Didelphis</i> sp.	Zarigüeya	LC	8 (2,71)
Myrmecophagidae	<i>Tamandua mexicana</i>	Oso hormiguero	LC	6 (2,03)
Sciuridae	<i>Syntheosciurus granatensis</i>	Ardilla roja	LC	2 (0,68)
Phyllostomidae	-	Murciélago	-	3 (1,02)
Procyonidae	<i>Potos flavus</i>	Perro de monte	LC	1 (0,34)
	<i>Procyon cancrivorus</i>	Mapache	LC	2 (0,68)
Vespertilionidae	<i>Myotis</i> sp.	Murciélago negro	LC	1 (0,34)
Unidentified				1 (0,34)

Nota. NE = No evaluado, DD = datos deficientes, LC = Preocupación menor, VU = Vulnerable, - = Taxón no identificado.

Fuente: elaboración propia.

Revisión de medidas de mitigación

La búsqueda en diferentes bases de datos permitió identificar un total de 76 estudios relevantes relacionados con medidas de mitigación del atropellamiento de fauna silvestre. Tras aplicar los criterios de inclusión y exclusión, los cuales consideraron aspectos como la relevancia temática, el idioma y la disponibilidad de información completa, se seleccionaron once documentos

para un análisis más detallado (véase la tabla 4). Estos estudios abarcan diversas estrategias de mitigación, como la conectividad ecológica, las estructuras viales, los pasos de fauna específicos, la señalización preventiva y los programas de monitoreo, y destacan la necesidad de investigar su efectividad y adaptabilidad a diferentes contextos nacionales e internacionales.

Tabla 4. Descripción de las tipologías para la mitigación del atropellamiento vehicular de fauna silvestre

Tipología		Definición	Fuentes
Conectividad ecológica	Restauración ecológica	Restauración de los valores de biodiversidad, creación o mejoramiento de nuevos hábitats y reforestación.	Quintero, 2009 [21]
Estructuras viales existentes no diseñadas originalmente para pasos de fauna	Drenajes circulares <i>Box culverts</i>	Drenaje de calzada, que permite el paso de agua.	Jaramillo-Fayad <i>et al.</i> , 2021 [15]
	Viaductos	Vías elevadas para el paso de vehículos en áreas montañosas, que evitan el tránsito por el valle y generan una mínima afectación al ecosistema existente.	Mata <i>et al.</i> , 2007 [22]
	Pasos secos multifuncionales	Pasos para peatones que van por debajo de la carretera (no diseñados para el drenaje de aguas).	
Pasos de personas y fauna (mixtos)	Pasos superiores mixtos	Su función original es el restablecimiento de carreteras y caminos y, de forma secundaria, pueden ser utilizados para el paso de fauna.	Mata <i>et al.</i> , 2007 [22]
	Pasos inferiores mixtos		
Pasos o estructuras específicas para fauna	Pasos superiores específicos	Estructuras transversales diseñadas para el tránsito de fauna.	Jaramillo-Fayad <i>et al.</i> , 2021 [15]
	Pasos arbóreos	Pasos especiales diseñados para conectar el dosel de los árboles a ambos lados de las carreteras.	
	Túneles para anfibios	Pasos especiales construidos para la migración o movimiento diario de anfibios, que dirigen a los animales a la vegetación contigua.	Andrews <i>et al.</i> , 2015 [23]
Sistema de cercado	Vallado perimetral	Implementado para evitar que los animales entren a la vía y para dirigirlos hacia los pasos de fauna.	Jaramillo-Fayad <i>et al.</i> , 2021 [15]
Rampas y mecanismos de escape	Escape de los vallados	Permite que la fauna salga de forma segura en caso de quedar atrapada por las vallas perimetrales o muros. De uso exclusivo para fauna.	Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente, 2015 [24]
Disuasores artificiales	Dispositivos acústicos, repelentes olfativos y disuasorios visuales	Artefactos que emiten disuasores olfativos, sonoros o visuales, con el objetivo de alertar a los animales para que eviten la vía o crucen con mayor cautela.	Real Automóvil Club de Cataluña (RACC), 2011 [25]; van der Ree <i>et al.</i> , 2015 [26]
Señalización de advertencia y reductores de velocidad de vehículos	Señales de tránsito	Informar a los usuarios de la vía la alta probabilidad del cruce de fauna silvestre, invitando a conducir con precaución.	Pomareda <i>et al.</i> , 2014 [27]
	Señales electrónicas	Paneles que generan señales destellantes durante la noche advertir sobre la presencia de animales nocturnos terrestres en la vía.	Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino, 2010 [28]; RACC, 2011 [24]
	Reductores de velocidad	Alternativa para indicar al conductor la necesidad de disminuir la velocidad en zonas críticas.	Pomareda <i>et al.</i> , 2014 [27]

Continúa

Tipología		Definición	Fuentes
Educación	Educación ambiental	Proceso paralelo a las demás medidas de mitigación, en el que se profundiza en la educación y sensibilización a la población general, comunidades adyacentes, usuarios de la vía y personal encargado en el desarrollo vial. Puede integrarse al sistema de educación vial e incorporar materiales como manuales o cartillas.	Pomareda <i>et al.</i> , 2014 [27]
Investigación	Ecología de carreteras	Las investigaciones en torno a la ecología de carreteras constituyen un complemento a las medidas de mitigación.	Jaramillo-Fayad <i>et al.</i> , 2019 [29]
Monitoreo de medidas de mitigación implementadas	Seguimiento	Un programa de monitoreo de las medidas de mitigación implementadas con el fin de evaluar su efectividad.	Morantes-Hernández, 2017 [30]

Fuente: elaboración propia.

Se seleccionaron cuatro especies modelo para el área de estudio, las cuales cuentan con una amplia distribución dentro de la jurisdicción de la Corporación Autónoma Regional del Centro de Antioquia (Corantioquia), en su dirección territorial Hevéxicos (HE), la cual comprende el occidente antioqueño e incluye los municipios de

Anzá, Buriticá, Caicedo, Ebéjico, Liborina, Olaya, Sabanalarga, San Jerónimo, Santa Fe de Antioquia y Sopetrán [31]. Esto permite determinar las necesidades biológicas y ecológicas de cada una de ellas e implementar dicha información en el planteamiento de las medidas de mitigación (véase la tabla 5).

Tabla 5. Especies modelo, información ecológica y estado de conservación para el área de estudio

Especie	Nombre Científico	Hábitos Ecológicos Relevantes	Factores de Riesgo para Atropellamiento	Estado de Conservación (IUCN)
Zarigüeya común	<i>Didelphis marsupialis</i>	Generalista, oportunista, hábitos carroñeros, activa en ambientes antrópicos [32, 33]	Alta densidad poblacional, alimentación de carroña en carreteras, desplazamientos en busca de alimento [34- 36]	Preocupación menor (LC) [32]
Iguana verde	<i>Iguana iguana</i>	Arborícola, diurna, herbívora, termorregula en asfalto [37, 38]	Necesidad de termorregulación en carreteras, lentitud en los movimientos, periodos de reproducción que implican desplazamientos hacia el desove [39, 40]	Preocupación menor [LC]
Zorro perro	<i>Cerdocyon thous</i>	Oportunista, adaptable a hábitats antropogénicos, dieta omnívora [41, 42]	Movimientos extensos en busca de alimento, hábitos carroñeros en carreteras, frecuente en zonas urbanizadas [43, 44]	Preocupación menor (LC)
Oso melero	<i>Tamandua mexicana</i>	Semi-arborícola, mirmecófago, dispersor de semillas [45, 46, 49, 50]	Hábitos lentos y torpes, cruce de carreteras por pérdida de hábitat, carreteras favorecen establecimiento de hormigueros, alta mortalidad en zonas urbanas [47, 48, 51-53]	Preocupación menor (LC)

Fuente: elaboración propia.

Medidas para mitigación de fauna silvestre atropellada a nivel mundial

Sistemas de cercado o vallados perimetrales: los vallados continuos son recomendados para evitar las colisiones entre vehículos y animales en autopistas o carreteras con flujo vehicular. Estas estructuras cumplen una doble funcionalidad: en primer lugar, evitar que los animales tengan acceso a la vía y, en segundo lugar, dirigirlos hacia los pasos de fauna [15, 24, 54].

Señalización de advertencia: las señales de advertencia hacen referencia a señales de tránsito destinadas a llamar la atención de los conductores sobre la alta posibilidad de un cruce de fauna silvestre, con el fin de promover una conducción cuidadosa y la reducción de velocidad. Se recomienda combinar la señalización vertical con reductores de velocidad, así como reforzarla con fondos amarillos fluorescentes y retrorreflectantes [27, 55]. A nivel nacional, esta estrategia ha sido identificada como ineficaz para la mitigación del atropellamiento [13]; sin embargo, en Colombia aún se requiere una mayor evaluación de esta medida.

Pasos superiores: son estructuras tipo puente construidas por encima del tráfico vehicular, efectivas para minimizar el efecto de fragmentación generado por la construcción de infraestructuras viales [23]. Para su construcción, se requiere información previa de atropellamientos, cobertura vegetal, análisis de conectividad y distribución de especies [24]. Su uso es principalmente para especies con hábitos semiarborícolas o terrestres, como el zorro perro, olinguito, primates y felinos [27].

Estructuras existentes - obras hidráulicas: las obras hidráulicas transversales a las vías como *box culverts*, alcantarillas o abovedados, pueden adaptarse para el uso por parte de la fauna terrestre. Es importante considerar el flujo de agua de acuerdo con la época del año y las variaciones pueden presentarse [24]. Su uso es para todos los vertebrados de hábitos terrestres y de tamaño mediano y pequeño, como el zorro perro, ocelote, margay, yaguarundi, puma, tayra, mapaches, así como reptiles (babillas y boa cazadora) y anfibios [15, 24, 55].

Disuasores artificiales: los disuasores artificiales son artefactos que emiten estímulos olfativos, sonoros o visuales con el fin de que los animales detecten señales de alerta. Su uso se enfoca principalmente en especies como los venados. Los dispositivos acústicos con emisión de ultrasonidos se emplean para el ahuyentamiento de mamíferos. Los repelentes olfativos son mezclas de hormonas de humanas y de otros depredadores inyectadas en resina sintética y esparcidas en postes y árboles. Por lo contrario, las feromonas pueden producir el efecto de atraer a los animales hacia los pasos de fauna. Por último, los disuasores visuales corresponden a reflectores que devuelven la luz de los vehículos al aproximarse, lo que alerta a los animales sobre el paso vehicular. La efectividad de esta medida es limitada debido al acondicionamiento de los animales; por lo tanto, se recomienda su uso durante periodos cortos [15, 25, 26].

Manejo de hábitats a borde de la carretera

Mantener en buen estado la visibilidad de los conductores en relación con la vegetación en los bordes de la vía es de gran importancia para la reducción de atropellamiento de fauna silvestre; asimismo, un manejo adecuado de la vegetación evita atraer a los animales a la carretera o influir en su comportamiento [55].

Corte de vegetación: se debe tener en cuenta que los bordes de carretera con vegetación corta suelen atraer a invertebrados y pequeños vertebrados, como anfibios, aves, mamíferos (roedores) y reptiles. De este modo, la presencia de microhábitats puede aumentar la mortalidad de las especies pertenecientes a las clases mencionadas [55, 56].

Especies vegetales para los bordes de la vía: se recomienda el uso de especies de plantas nativas, ya que pueden ejercer un efecto protector en el atropellamiento de fauna silvestre. Asimismo, no se deben plantar especies cuyas hojas, flores o frutos sean utilizados como alimento por los animales [26, 55].

Estructuras correctivas

Estas estructuras son diseñadas, construidas e implementadas con posterioridad a la construcción de las vías y se ubican en corredores biológicos identificados a partir de análisis de conectividad.

Pasos construidos para animales de tamaño grande y mediano: el objetivo de estos pasos es comunicar hábitats separados por una infraestructura vial que vaya sobre un terraplén. Están destinados al uso de mamíferos como venados y carnívoros grandes [56].

Pasos construidos para animales pequeños: su construcción se realiza sobre terraplén y su ubicación corresponde a sitios identificados con mayor atropellamiento

de vertebrados pequeños y medianos [15, 23]. Están destinados a vertebrados medianos y pequeños, micro-mamíferos, reptiles y anfibios, teniendo en cuenta el grado de humedad requerido por estos últimos [56].

Estado actual de medidas de mitigación en la Autopista al Mar 1

Como resultado de la evaluación del estado actual del proyecto Autopista al Mar 1, se puso en evidencia la presencia de pasos de fauna superiores e inferiores (figura 2). A continuación, se describen los hallazgos derivados de la inspección realizada.

Figura 2. Localización de pasos de fauna superiores (monos) y obras hidráulicas adecuadas (oso melero) instalados en la Autopista al Mar 1



Fuente: elaboración propia.

Sistemas de cercado o vallados perimetrales: entre los usos más relevantes para el vallado perimetral, se encuentra la reducción de la mortalidad de fauna por atropellamiento y el aumento de la seguridad de los usuarios de la vía [24]. Es importante considerar los desperfectos más comunes, tales como levantamientos en la base de la malla, desajustes entre la malla y el terreno, y variaciones en la luz de la malla.

Durante la observación que se realizó en la Autopista de interés, se hacen evidentes 14 vallados perimetrales de aproximadamente 50 m en cada tramo de la vía, para un total de 28 vallados. Estos presentan desgaste y mal estado, específicamente fisuras o perforaciones en la malla y discontinuidades en la conexión con los pasos de fauna, lo que impide el cumplimiento de su función.

Señalización de advertencia: en la inspección realizada, se identificaron 26 señales verticales especiales con información sobre la presencia de pasos de fauna elevados o subterráneos. Doce de estas se encontraron en el tramo Medellín-Santa Fe de Antioquia; sin embargo, el paso subterráneo ubicado en el kilómetro 22 no cuenta con señal de advertencia. Las 14 señales restantes se localizan en el tramo Santa Fe de Antioquia-Medellín.

Adicionalmente, se registraron seis señales electrónicas verticales de 1,48 m de ancho y 3,63 m de largo que se encuentran en desuso. Tres de estas están ubicadas en el tramo Medellín-Santa Fe de Antioquia y una en el tramo Santa Fe de Antioquia-Medellín. Durante el recorrido también se observaron señales electrónicas horizontales con información sobre el estado de la vía y recomendaciones generales, entre otros avisos; no obstante, ninguna contenía información relacionada con el paso de fauna silvestre o la fauna adyacente. Dada la existencia de esta herramienta, resulta pertinente considerarla como una medida de mitigación potencial, optimizando los recursos implementados en el corredor vial.

En el tramo Medellín-Santa Fe de Antioquia se registraron cuatro señales electrónicas horizontales, una de ellas en un estado regular. En el tramo Santa Fe de An-

tioquia-Medellín, se identificaron seis de estas señales y, finalmente, se puso en evidencia una señal electrónica horizontal móvil con panel solar cercana al kilómetro 24. En ninguno de los tramos evaluados se observaron señales de tránsito preventivas (amarillas) que adviertan sobre el paso de fauna silvestre en la carretera.

Pasos superiores: los pasos superiores diseñados específicamente para la fauna silvestre presentan una restauración completa de su superficie, destinándose exclusivamente al tránsito de fauna y evitando perturbaciones derivadas por la actividad humana [24].

En la autopista de interés, se identificó un paso elevado en el tramo 1, correspondiente del kilómetro 0 al 18; tres pasos en el segundo tramo, correspondiente del kilómetro 19 al 34; y ninguno en el tramo que cubre el peaje Aburrá al Túnel de Occidente. Todos los pasos identificados cuentan con señalización vertical especial y vallado perimetral.

Estructuras existentes - obras hidráulicas: las obras hidráulicas transversales a las vías — como *box culverts* de diversos tamaños o tuberías (alcantarillas, abovedados)— destinadas al paso permanente o temporal del agua por debajo de la carretera pueden ser adaptadas para el uso de fauna terrestre [15]. La adaptación de estas obras requiere la existencia de un paso seco, sin importar la temporada climática. Para esto, se adecuan rampas o pasarelas, preferiblemente de madera plástica, que encaminen a la fauna al tránsito por el paso subterráneo y la dirijan al otro extremo de la vegetación. En la observación que se realizó en la autopista de interés, se hicieron evidentes tres pasos subterráneos en el tramo Medellín-Santa Fe de Antioquia, y se registró un paso subterráneo adicional en el tramo Santa Fe de Antioquia-Medellín, ubicado sobre la quebrada San Juana, con la desventaja de que este paso no cubre las dos calzadas debido al diseño de la vía. En el tramo correspondiente del kilómetro 19 al 34 se registraron seis pasos subterráneos, y en el tramo que cubre el peaje Aburrá-Túnel de Occidente no se hizo evidente la instalación de pasos de fauna subterráneos.

Se identificó un paso subterráneo en el segundo tramo, correspondiente del kilómetro 19 al 34, sin señalización vertical informativa, instalado en la calzada derecha, sentido Medellín-Santa Fe de Antioquia, como se mencionó. En el sentido Santa Fe de Antioquia-Medellín del mismo paso de fauna, se observó la pasarela de adecuación del *box culverts* en forma de espiral. Esta orientación podría ser confusa para los animales silvestres, por lo que su uso podría comprometer su objetivo. Adicionalmente, se observaron residuos de plástico en la pasarela de ingreso del paso de fauna, lo que genera una distorsión de la visibilidad para los animales silvestres.

Disuasores artificiales: durante la inspección realizada en campo en la Autopista al Mar 1 no se observaron disuasores artificiales.

Manejo de hábitats a borde de la carretera: no se evidenció manejo de hábitats al borde de la carretera ni mantenimiento de vegetación adyacente a la misma; asimismo, no se pudo obtener información proveniente de la Concesionaria con respecto a las especies forestales que se encuentran al borde de la vía.

Estructuras correctivas: no se evidenció la instalación de estructuras correctivas en la Autopista al Mar 1.

Diagnóstico comparativo de medidas de mitigación actuales vs. *hotspots* identificados en la caracterización de atropellamiento de fauna en la vía de interés

Se realizó un diagnóstico de las medidas de mitigación específicas (pasos superiores y estructuras existentes) instalados en la Autopista al Mar 1 en relación con la identificación de los ocho segmentos de agregación espacial determinados previamente a partir de los datos obtenidos en la caracterización de atropellamiento entre el 2018 y el 2021 (véase la figura 3). Se observó que algunos de los 14 pasos de fauna instalados actualmente no se encuentran ubicados dentro de los *hotspots* identificados; principalmente, no se presenta cobertura en la agregación espacial de atropellamientos ubicada en los kilómetros 15 y 17, cercanos a la cabecera municipal de San Jerónimo, donde se observa solo un paso de fauna

dentro de ese radio de agregación. Esto resalta la importancia de ubicar los pasos de fauna de manera estratégica en áreas identificadas como *hotspots*, ya que estas zonas suelen coincidir con corredores de conectividad ecológica utilizados por las especies para desplazarse entre fragmentos de hábitat [57]. La implementación de pasos de fauna en estos puntos críticos puede mejorar su efectividad, facilitar su uso por parte de los animales y promover el establecimiento de coberturas vegetales adecuadas que incrementen la funcionalidad ecológica de estos corredores y, a su vez, contribuyan a mitigar el impacto de los atropellamientos [58].

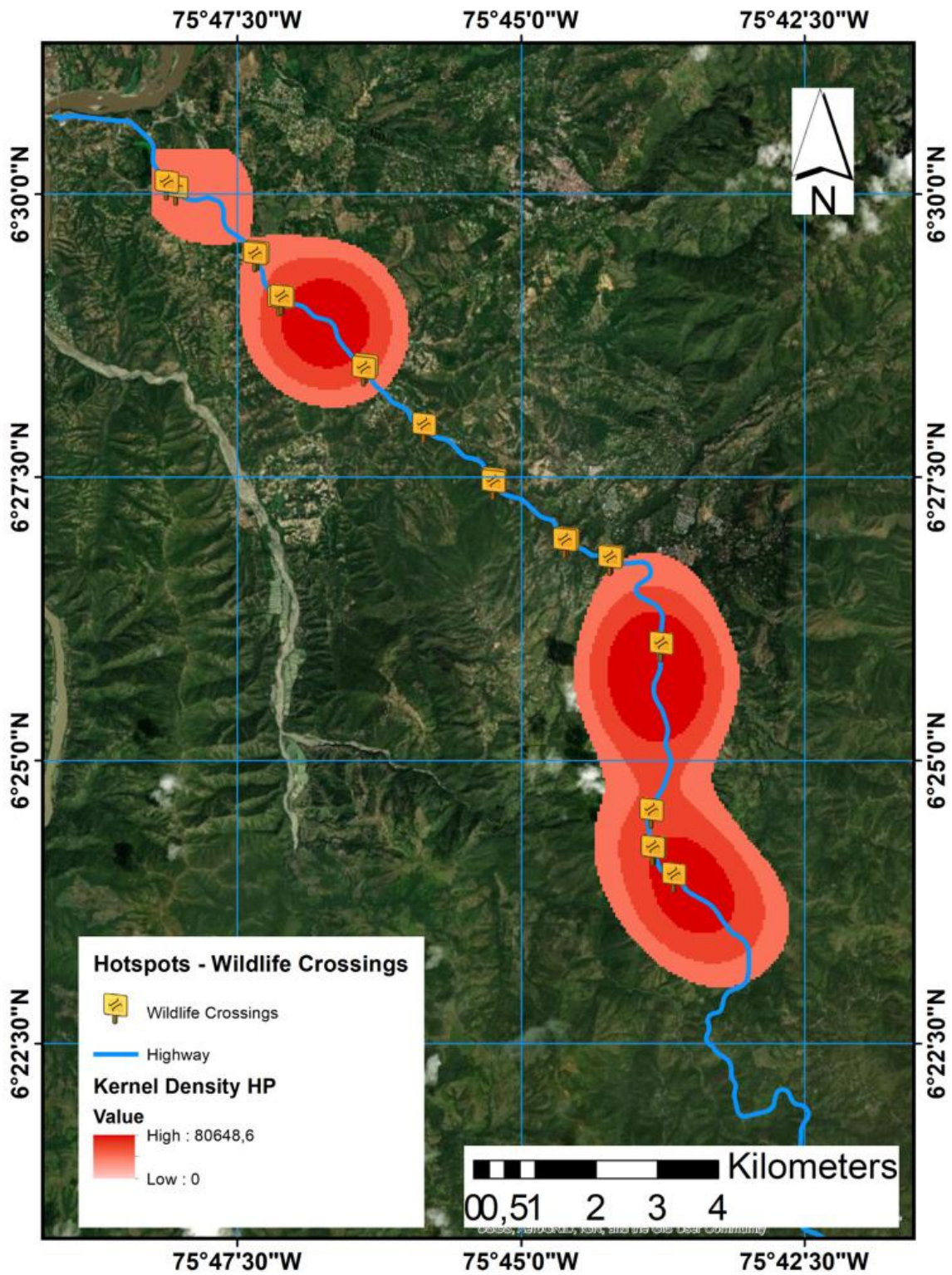
Propuesta de mitigación para la vía de interés

A criterio de los autores, con base en los resultados obtenidos en la caracterización, la salida de observación en campo y la búsqueda de información sobre medidas de mitigación a nivel mundial y nacional, se proponen siete medidas o aproximaciones a considerar como estrategias de mitigación al atropellamiento de fauna silvestre en la Autopista al Mar 1, con el interés de optimizar los recursos existentes.

Funcionalidad de las estructuras existentes en términos de *hotspots* identificados: las medidas de mitigación del atropellamiento de fauna silvestre requieren una integración de diferentes enfoques que permitan cumplir con el objetivo principal de generar conectividad para su uso por parte de los vertebrados silvestres. Por ello, reconocer los vínculos entre la caracterización, la planeación espacial y los diseños de la carretera resulta fundamental para contribuir a las necesidades del desarrollo sostenible [59].

Como parte de la planeación espacial, se han generado diferentes modelos para optimizar el posicionamiento de las estructuras de cruce de vida silvestre, mediante la identificación de puntos críticos y la distribución espacial y temporal de los atropellamientos [60, 61].

Figura 3. Relación de las estructuras adecuadas e instaladas para el paso de fauna silvestre durante la inspección (septiembre de 2023) y los hotspots de atropellamiento en la Autopista al Mar 1



Fuente: elaboración propia.

Se reporta el desarrollo de dos algoritmos de programación lineal, los cuales permiten especificar la importancia de la posición relativa de un segmento frente a la importancia de la intensidad de uso para mejorar la importancia biológica de los cruces identificados (e. g. puntos con mayor tráfico) [8]. Asimismo, consideran la ubicación de cobertura máxima, a partir de la cual se pueden determinar los segmentos que cubren la mayor conectividad para el paso de la fauna [58], así como la implementación de programas de monitoreo que permitan determinar la efectividad de los cruces para las especies [62]. Ambos algoritmos permiten optimizar los cruces naturales o los cruces específicos [63].

Es importante destacar que los movimientos y la distancia recorrida por los animales proporcionan información valiosa y muy específica para la determinación de *hotspots* [33]. Sin embargo, atributos ecológicos de las especies, del paisaje y las características del trazado de la vía (sinuosidad y pendiente) [62] son esenciales para comprender la fragmentación del hábitat y, por lo tanto, el desarrollo de medidas de mitigación, así como el uso de índices de permeabilidad vial en los datos de atropellamiento recopilados [13, 64]. De esta manera, la problemática de la mortalidad de fauna silvestre debe ser reevaluada de forma constante, dados los cambios naturales en las coberturas vegetales cercanas a la vía, el comportamiento de las especies hacia las estructuras de las carreteras y las necesidades y condiciones ecológicas de las especies [6, 64].

Para ello, se propone optimizar los pasos específicos y las adecuaciones realizadas a las obras hidráulicas existentes en la Autopista al Mar 1 mediante medidas como disuasores artificiales o adecuaciones de cruces naturales, incluidos puentes peatonales para cubrir los *hotspots* determinados durante la caracterización y generar un mayor número de posibilidades de cruce de fauna silvestre. En consideración de las ocho agregaciones espaciales de importancia estadística reportadas con el estadístico de Ripley's K en 2D, se propone la adecuación de la obra hidráulica del kilómetro 18, cercana a la cabecera municipal de San Jerónimo, la adecuación del puente peatonal ubicado entre los kilómetros 18 y 19 y

la generación de un nuevo paso aéreo en la misma zona, con el objetivo de disminuir el atropellamiento de la iguana verde, la cual es la especie con mayor frecuencia de atropellamiento en este punto crítico. Esto permitirá la interpretación de los cambios ecológicos a lo largo de los años y la comprensión de cómo estos pueden generar nuevas estrategias de mitigación.

Realización de censos o recorridos de los accesos y hábitats adyacentes a los pasos de fauna: la importancia de controlar el estado y la integridad de los accesos y de los hábitats adyacentes a los pasos de fauna hace parte fundamental del proceso de seguimiento de las medidas de mitigación ejecutadas en la vía.

Por ello, se deben realizar inspecciones de las zonas a evaluar para caracterizar la integridad de los accesos y los hábitats adyacentes a cada uno de los pasos de fauna, lo que permite detectar perturbaciones a ambos lados de la estructura, así como también el estado de la vegetación, el vallado perimetral y el acondicionamiento de los accesos, además de identificar el posible ingreso de humanos o de fauna doméstica [65]. Se sugiere realizar este proceso en conjunto con el seguimiento de fauna atropellada, mediante la observación visual de cada acceso y hábitat, a través de recorridos a pie por la zona de interés y la determinación de su estado, tanto de la infraestructura como de las condiciones sanitarias.

Seguimiento de fauna atropellada letal en la vía: como método de seguimiento y control, se deberán conservar los censos de fauna atropellada en el corredor vial, al registrar la mortalidad de vertebrados silvestres, así como información de georreferenciación, identificación de la especie, estado de vida, sexo, medición de longitud corporal y distancia (en km) al paso de fauna más cercano.

Se deberán realizar recorridos con un intervalo de dos días, a una velocidad de 15-30 km/h para identificar y contabilizar los cadáveres de animales o sus restos en la calzada o en sus márgenes a lo largo de la totalidad del tramo vial [54]. Los censos deberán realizarse a primera hora de la mañana, evitando la acción de los carroñeros

diurnos que podrían eliminar los cadáveres de la vía, y teniendo en cuenta los hábitos crepusculares de la mayoría de las especies con distribución en el área de interés (e. g. *D. marsupialis*, *C. thous*, *T. mexicana*) [41, 65].

En épocas reproductivas de las especies con mayor vulnerabilidad de atropellamiento (e. g. *I. iguana*), los recorridos deberán realizarse con mayor frecuencia, preferiblemente de forma diaria, al igual que durante la temporada de vacaciones o en fechas feriadas, cuando se incrementa el tráfico vehicular [65].

Monitoreo permanente de abundancia y diversidad de fauna en la región y del uso de los pasos de fauna, mediante cámaras trampa y recorridos diarios: el seguimiento y la evaluación de la efectividad de las medidas de mitigación o correctivas frente al efecto barrera producido por las carreteras es una estrategia de gran importancia para determinar el estado actual de la abundancia y diversidad de las especies de fauna silvestre en el funcionamiento de las autopistas posteriores a su construcción [65, 46]. Asimismo, permiten la detección constante de puntos críticos de atropellamientos, patrones de movimiento de la vida silvestre, distribución, densidad, comportamiento y ecología de los animales [58].

Entender cómo las diferentes especies ocupan y se desplazan a través del paisaje que rodea las carreteras [56, 60] representa un desafío central para identificar lugares de paso de fauna capaces de mejorar la conectividad de múltiples especies a largo plazo [66]. En este contexto, resulta fundamental la investigación sobre la conectividad como criterio para la instalación de pasos de fauna y la evaluación de la biodiversidad dentro de las medidas de mitigación [60].

Dentro del monitoreo del atropellamiento de fauna, se propone optar por la metodología usada en la fase de preconstrucción de la vía para la caracterización de atropellamientos, ya que se puede determinar la abundancia y diversidad de la fauna silvestre vertebrada en el área de influencia y se garantiza que los datos obtenidos sean comparables. En caso de obtener resultados que

demuestren un cambio notable y que no pertenezcan a la variabilidad natural de las poblaciones o condiciones particulares ajenas al proyecto (e. g. época del año, incidencia de enfermedades), estos indicarían efectos negativos de la vía sobre las especies silvestres. Si estos cambios afectan a especies de interés (*D. marsupialis*, *I. iguana*, *C. thous*, *T. mexicana*), se considerará que se ha alcanzado un umbral crítico para la conservación de las especies, por lo que se tendrán que establecer y aplicar medidas para reducir o revertir estos efectos negativos [65].

En cuanto a la evaluación de la efectividad de los pasos de fauna, esta debe ir más allá del conteo de animales que utilizan la estructura [26]. Entre las metodologías propuestas, se encuentran el registro de huellas [67], el uso de cámaras trampa en los accesos y en el paso de fauna para comparar especies y número de individuos [54, 68] y, finalmente, la metodología de los transectos de registro de presencia de fauna silvestre. En este último caso, los recorridos de evaluación se harán principalmente en los accesos de los pasos de fauna, con el fin de identificar huellas, material fecal o rastros que permitan determinar el tránsito de animales silvestre por el lugar [65].

Como parte de la fase evaluativa, se tendrán en cuenta las consideraciones metodológicas anteriores y se determinará la efectividad de la estructura del paso de fauna, la cual se considerará satisfactoria cuando el registro obtenido corresponda a la especie o las especies para las cuales fue diseñado. En caso de tener una efectividad deficiente tras el primer año de seguimiento, deberán iniciarse estudios detallados, ya sea de las características del paso o sobre los requerimientos y el estatus poblacional de la especie o especies involucradas, con el fin de analizar las posibles causas [65].

Monitoreo de fauna sobreviviente a las colisiones, por medio de cámaras de seguridad de la Concesionaria: dentro de la problemática mundial asociada a la mortalidad de fauna silvestre por atropellamiento, es de gran importancia iniciar investigaciones sobre los individuos atropellados de manera no letal. En el estu-

dio realizado por Hobday y Minstrell [69], se determinó una densidad de atropellamiento de hasta un animal muerto cada 3 km/día, considerando únicamente los individuos observados en la vía, mas no aquellos que pudieran estar en la vegetación adyacente.

Los individuos atropellados de forma no letal a menudo pueden tener una muerte lenta si no se produce un rescate oportuno o un seguimiento de su desplazamiento hacia la vegetación adyacente. Una situación particularmente preocupante son las crías de las hembras preñadas o lactantes muertas en la vía. Frecuentemente, estas crías mueren con sus madres, ya sea por una herida de gravedad o por inanición posterior [70].

Las opciones planteadas incluyen la no intervención, la eutanasia o el rescate y la rehabilitación de la fauna atropellada no letal [70]. Al descartar la no intervención y la eutanasia, el rescate y la rehabilitación se convierten en las acciones por ejecutar para la conservación de la fauna. Desafortunadamente, no se cuenta con información sobre las víctimas no mortales por atropellamiento de fauna silvestre en la Autopista al Mar 1; por lo tanto, esto genera una brecha significativa en el conocimiento, al no comprender el tamaño, la complejidad y la sostenibilidad para plantear un sistema de acción frente a esta problemática.

Como una medida de prevención alternativa, se propone el seguimiento con cámaras de seguridad pertenecientes al control vial por parte de la Concesionaria, las cuales permitirían detectar eventos de colisión vehicular con fauna silvestre y determinar la fatalidad o la sobrevivencia del individuo al impacto. A partir de esta información, podría realizarse un seguimiento en el interior de la vegetación o en áreas adyacentes para identificar el rastro o la localización del individuo.

Implementación de protocolos de educación ambiental constante para usuarios de la vía y habitantes del área de influencia: dentro de las medidas de mitigación para el atropellamiento de fauna silvestre, la educación y sensibilización enfocada a la población general, las comunidades cercanas y los usuarios de la vía hacen

parte de un proceso paralelo apoyado por herramientas como la televisión, la radio, las redes sociales y los talleres, con el fin de resaltar la importancia de la fauna en el equilibrio de los ecosistemas y el impacto que las carreteras generan sobre estos [15].

Como resultados esperados de la educación ambiental, se encuentra la participación de la comunidad en la producción de conocimiento científico para el estudio de fenómenos e investigaciones sobre temas particulares, proceso conocido como ciencia ciudadana, la cual presenta un gran potencial como herramienta para la concientización y educación sobre problemáticas como la conservación de la biodiversidad [71]. En este sentido, puede promoverse el reporte del atropellamiento de fauna silvestre en las carreteras nacionales.

Una estrategia para involucrar a la ciudadanía en la problemática de atropellamiento de fauna ha sido la creación de diferentes plataformas digitales para el reporte de registros de atropellamiento desde los celulares [30]. Para el caso de Colombia, desde el 2014 existe Recosfa (Red Colombiana de Seguimiento de Fauna), una aplicación creada para reportar atropellamientos en todas las vías del país, con el objetivo de generar estrategias encaminadas a reducir el número de atropellamientos de animales [15].

DISCUSIÓN

La zarigüeya común y la iguana verde son especies que se adaptan fácilmente a hábitats urbanizados y son reportadas con frecuencia como eventos de mortalidad vial en Colombia [35, 48, 72-74]. Estos hallazgos podrían asociarse a mayores densidades poblacionales en hábitats naturales y modificadas en comparación con otras especies [35, 44, 72, 73].

Aspectos ecológicos relacionados con las cubiertas verdes naturales y modificadas que rodean las carreteras y las infraestructuras humanas, así como el uso de la carretera como superficie adecuada para la termorregulación y el descanso de las iguanas [74, 75], y el uso de

la vía como fuente de dietas carroñeras por parte de las zarigüeyas influyen en la ocurrencia de los atropellamientos. Además de los aspectos biológicos y fisiológico-conductuales, como la mayor superficie corporal que ocupan los carriles de las iguanas que cruzan las vías y el comportamiento de las zarigüeyas que permanecen quietas cuando se acerca un automóvil, hacen que estas especies sean más sensibles al atropellamiento vehicular [35, 43].

Este trabajo representa un punto de partida en la ecología de carreteras, al proporcionar una revisión sobre las medidas de mitigación actualmente utilizadas para minimizar los atropellamientos de fauna silvestre. Si bien algunas estrategias, como las señales preventivas, han mostrado baja efectividad en contextos nacionales, y la efectividad de otras medidas, como los pasos de fauna, requiere un mayor respaldo empírico, consideramos que este estudio busca abrir el camino hacia investigaciones más integrales y robustas en el futuro. La intención es resaltar la importancia de evaluar la efectividad de estas medidas no solo en la reducción del número de atropellamientos, sino también en su capacidad para disminuir el efecto barrera de las vías, mejorar la conectividad del paisaje y promover soluciones adaptadas a las necesidades específicas de cada región. Este enfoque inicial busca generar interés y fomentar nuevas investigaciones que profundicen en el desarrollo de estrategias eficaces para mitigar los impactos de las carreteras en la biodiversidad.

Este estudio destaca el impacto de la construcción de carreteras sobre la vida silvestre. Durante cuatro años se registraron un total de 295 casos de atropellos de vida silvestre en la Autopista al Mar 1 (Antioquia, Colombia). Las zarigüeyas y las iguanas fueron las especies más afectadas durante el periodo de estudio.

Los resultados del presente estudio resaltan la importancia de proponer estrategias conjuntas para la prevención de fauna silvestre atropellada en la Autopista al Mar 1. No obstante, esta propuesta constituye una herramienta que puede ser útil para cualquier carretera nacional e internacional, siempre que se adapten las

herramientas a las necesidades del contexto. Como método de optimización de los recursos ya existentes, es posible conjugar señales de tránsito verticales preventivas sobre el paso de fauna silvestre con el uso de las señales electrónicas verticales y horizontales instaladas en la autopista, priorizando la difusión de información sobre la presencia de fauna silvestre, principalmente en épocas reproductivas u horarios de mayor tránsito de la fauna.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a la concesionaria Devimar S.A.S. por permitir el uso de la información de los atropellamientos de fauna silvestre.

REFERENCIAS

1. Quintero-Ángel A, Osorio-Domínguez D, Vargas-Salinas F, Saavedra-Rodríguez CA. Roadkill rate of snakes in a disturbed landscape of Central Andes of Colombia. *Herpetol Notes* 2012;5:99-105.
2. Agencia Nacional de Infraestructura (ANI). Plan Maestro de Bogotá: ANI; 2011. <https://www.ani.gov.co/planes/plan-maestro-de-transporte-intermodal-22006>
3. Andrade Moreno LF. Cuarta Generación de concesiones en Colombia. Bogotá: ANI; 2011. https://www.ani.gov.co/sites/default/files/cuarta_generacion_de_concesiones_luis_fernando_andrade_moreno.pdf
4. Coffin AW. From roadkill to road ecology: A review of the ecological effects of roads. *J Transp Geogr* 2007;15(5):396-406. <https://doi.org/10.1016/j.jtrangeo.2006.11.006>

5. Cuyckens GAE, Mochi LS, Vallejos M, Perovic PG, Biganzoli F. Patterns and composition of road-Killed wildlife in northwest Argentina. *Environ Manage* 2016;58(5):810-20. <https://doi.org/10.1007/s00267-016-0755-6>
6. Grilo C, Molina-Vacas G, Fernández-Aguilar X, Rodríguez-Ruiz J, Ramiro V, Porto-Peter F, Revilla E. Species-specific movement traits and specialization determine the spatial responses of small mammals towards roads. *Landsc Urban Plann* 2018;169:199-207. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2017.09.014>
7. Barbosa P, Schumaker NH, Brandon KR, Bager A, Grilo C. Simulating the consequences of roads for wildlife population dynamics. *Landsc Urban Plann* 2020;193:103672. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2019.103672>
8. Rincón-Aranguri M, Urbina-Cardona N, Galeano SP, Bock BC, Páez VP. Road kill of snakes on a highway in an Orinoco ecosystem: Landscape factors and species traits related to their mortality. *Trop Conserv Sci* 2019;12:1940082919830832. <https://doi.org/10.1177/1940082919830832>
9. Balkenhol N, Waits LP. Molecular road ecology: exploring the potential of genetics for investigating transportation impacts on wildlife. *Mol Ecol* 2009;18(20):4151-64. <https://doi.org/10.1111/j.1365-294X.2009.04322.x>
10. Jackson ND, Fahrig L. Relative effects of road mortality and decreased connectivity on population genetic diversity. *Biol Conserv* 2011;144(12):3143-8. <https://doi.org/10.1016/j.biocon.2011.09.010>
11. De La Ossa V J, De La Ossa-Nadjar O, Medina-Bohórquez E. Atropellamiento de fauna silvestre. *Rev colombiana Cienc Anim RECIA* 2015;7(1):109-16. <https://doi.org/10.24188/recia.v7.n1.2015.430>
12. Garrah E, Danby R, Eberhardt E, Cunnington G, Mitchell S. Hot spots and hot times: wildlife road mortality in a regional conservation corridor. *Environ Manage* 2015;56: 874-889. <https://doi.org/10.1007/s00267-015-0566-1>
13. Meza-Joya FL. Road Permeability Index as a tool for mitigation planning of road impacts on wildlife in Colombia. *Caldasia*. 2023;45(1),66-75. <https://www.jstor.org/stable/48749404>
14. Payan E, Soto C, Díaz-Pulido A, Benítez A, Hernández A. Wildlife Road crossing and mortality: lessons for wildlife friendly road design in Colombia [PDF]. *Proceedings of the 2013 international conference on ecology and transportation*. 2013; Scottsdale (USA). pp. 2-18.
15. Jaramillo-Fayad JC, Velázquez MM, Premauer JM, González JL, González Vélez JC. Atropellamiento de fauna silvestre en Colombia: Guía para entender y diagnosticar este impacto. *Gobierno Nacional de Colombia - Institución Universitaria ITM*. 2021. <https://mintransporte.gov.co/loader.php?lServicio=Tools2&lTipo=descargas&lFuncion=visorpdf&id=27265&pdf=1>
16. Sawaya M A, Clevenger AP, Kalinowski ST. Demographic connectivity for ursid populations at wildlife crossing structures in Banff National Park. *Conserv Biol* 2013;27(4):721-30. <https://doi.org/10.1111/cobi.12075>
17. Instituto Nacional de Vías (Invias). *Manual de diseño geométrico de carreteras*. Bogotá: INVIAS; [sin fecha]. *Ciencia*. 2008;84:1-6. <https://www.invias.gov.co/publicaciones/4154#manual-de-dise-no-geometrico-de-carreteras-2008>
18. StataCorp. *Stata Statistical Software: Release 16.1*. College Station, TX: StataCorp LLC 2020. <https://www.stata.com/>

19. Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS). Siriema: road mortality software. NERF. UFRGS. Porto Alegre. Brasil 2014 [PDF].
20. R Core Team. R: A language and environment for statistical computing. Vienna: R Foundation for Statistical Computing; 2023. <https://www.R-project.org/>
21. Quintero JD. Guía de buenas prácticas para carreteras ambientalmente amigables. Latin America Conservation Council; 2009.
22. Mata C. Utilización por vertebrados terrestres de los pasos de fauna y otras estructuras transversales de dos autovías del Centro-Noroeste peninsular [tesis doctoral]. [Madrid, España]. Universidad Autónoma de Madrid; 2007.
23. Andrews K, Nanjappa P, Riley S. Roads and ecological infrastructure: concepts and applications for small animals. Johns Hopkins University Press. 2015
24. Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico (MITECO). Prescripciones técnicas para el diseño de pasos de fauna y vallados perimetrales 2ª ed. revisada y ampliada. Documentos para la reducción de la fragmentación de hábitats causada por infraestructuras de transportes; n.º 1. Madrid (ES): Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente; 2015, 139 p. https://www.miteco.gob.es/content/dam/miteco/es/biodiversidad/publicaciones/prescripciones_pasos_vallados_2a_edicion_tcm30-195791.pdf
25. Real Automóvil Club de Cataluña (RACC). Accidentes de tráfico con animales: análisis de la situación a nivel europeo y español. Madrid (ES): Dirección General de Tráfico; 2011.
26. Van der Ree R, Smith DJ, Grilo C, editores. Handbook of Road Ecology. 1.º ed. John Wiley & Sons; 2015. <https://doi.org/10.1002/9781118568170>
27. Pomareda García E, Araya Gamboa D, Ríos Montero Y, Arévalo Huevo E, Aguilar Ruiz MC, Mena-chó Odio RM. Guía ambiental “vías amigables con la vida silvestre”: Comité Científico de la Comisión Vías y Vida Silvestre. Comité Científico de la Comisión Vías y Vida Silvestre; 2014. <https://pantheracostarica.org/wp-content/uploads/2017/05/GuiaVAVS-04oct14-PROTEGIDO.pdf>
28. Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino. Indicadores de fragmentación de hábitats causada por infraestructuras lineales de transporte. Documento para la reducción de la fragmentación de hábitats causada por infraestructuras de transportes; n.º 4. Madrid (ES): Organismo Autónomo Parques Nacionales; 2010. 133 p.
29. Jaramillo-Fayad J, Clevenger A, Grilo C, Oliveira L, Araya D, Colino V, Keller G. Conservación de la biodiversidad a través de la ecología de las carreteras y la infraestructura verde. II Congreso Iberoamericano de Biodiversidad e Infraestructura viaria; 2019; Medellín, Colombia. p. 11-18.
30. Morantes-Hernández J. Caracterización de las iniciativas encaminadas a reducir la mortalidad de fauna silvestre en carretera: panorama Colombia [trabajo de especialización]. Bogotá (CO): Universidad Militar Nueva Granada; 2017. <http://hdl.handle.net/10654/16945>
31. Restrepo-Llano J, Restrepo-Salazar J, Isaza-Agudelo J, Arango-Pérez A, Hurtado-Hernández J. Estado del conocimiento de la fauna silvestre en la jurisdicción de Corantioquia. Medellín (CO): Corporación Autónoma Regional del Centro de Antioquia (Corantioquia); 2010. 176 p. https://www.corantioquia.gov.co/wp-content/uploads/2022/01/compendio_fauna.pdf
32. Flórez-Oliveros FJ, Vivas-Serna C. Zarigüeyas (chuchas comunes), marmosas y colicortos en Colombia. Fundación Zarigüeya (FUNDZAR); 2020, 264 p. <https://www.metropol.gov.co/libro-zarigüeyas>

33. Ferreira VIOZ. Predicting road mortality risk using life traits of birds and mammals [disertación]. Lavras (BR); 2017. http://repositorio.ufla.br/jspui/bitstream/1/13323/1/DISSERTA%3%87%3%83O_Predicting%20road%20mortality%20risk%20using%20life%20traits%20of%20birds%20and%20mammals.pdf
34. Santos K, Pacheco G, Passamani M. Medium-sized and large mammals from Quedas do Rio Bonito ecological park, Minas Gerais, Brazil. *Chek List* 2016;12:1830 <https://doi.org/10.15560/12.1.1830>
35. Castillo-R JC., Urmendez MD., Zambrano GG. Mortalidad de fauna por atropello vehicular en un sector de la vía panamericana entre Popayán y Patía. *Bol Cient Mus* 2015;19(2):207-219. <https://doi.org/10.17151/bccm.2015.19.2.12>
36. Mesquita PC, Lipinski VM, Polidoro GLS. Less charismatic animals are more likely to be “road killed”: human attitudes towards small animals in Brazilian road. *Biotemas* 2015;28:85-90. <http://dx.doi.org/10.5007/2175-7925.2015v28n1p85>
37. Jochimsen DM, Peterson CR, Andrews KM, Gibbons W. A Literature review of the effects of roads on amphibians and reptiles and the measures used to minimize those effects. Boise (ID): Idaho Department of Fish and Game; 2004. <https://idfg.idaho.gov/old-web/docs/wildlife/collisionAmphibRep.pdf>
38. Rivera DM, Gómez JR. Estrategias de conservación a partir de las percepciones y los usos de la especie *Iguana* en el municipio de Fonseca, Guajira, Colombia. [trabajo de grado]. Bogotá (CO): Pontificia Universidad Javeriana; 2011. <http://hdl.handle.net/10554/12434>
39. Corporación Autónoma Regional de La Guajira (Corpoguajira). Zoocria comunitaria para la protección y fomento de la iguana en la baja Guajira. Riohacha (CO): INDERENA; 1993.
40. Márquez Escobar M, Velásquez Calderón C. Estado actual de conservación de la iguana verde (*Iguana Rhinolopa*) y su perspectiva de manejo en la Isla de San Andrés (Colombia) [trabajo de grado]. Cali (CO): Universidad Autónoma de Occidente; 2014. <http://dx.doi.org/10.13140/RG.2.2.14952.67840>
41. Marín D. Análisis de la dieta del zorro perruno (*Cerdocyon thous*) en el norte de la Cordillera Central Colombiana. [trabajo de grado]. Medellín (CO); 2010. <http://dx.doi.org/10.13140/RG.2.2.30793.34403>
42. Rodríguez-Mazzini R, Molina Espinosa B. El zorro de monte (*Cerdocyon thous*) como agente dispersor de semillas de palma. Serie Documentos de Trabajo n.º 30. Quito (EC); 2000. <https://isbn.cloud/9789974753280/el-zorro-de-monte-cerdocyon-thous-como-agente-dispersor-de-semillas-de-palma/>
43. Delgado-Vélez CA. Muerte de mamíferos por vehículos en la vía del Escobero, Envigado (Antioquia), Colombia. *Actual Biol* 2007;29(87):229-233. <https://doi.org/10.17533/udea.acbi.329342>
44. Pinowski J. Roadkills of Vertebrates in Venezuela. *Rev Bras Zool* 2005;22(1):191-196. <http://dx.doi.org/10.1590/S0101-81752005000100023>
45. Adárraga-Caballero MA, Gutiérrez-Moreno LC. Mortalidad de vertebrados silvestres en la carretera Troncal del Caribe, Magdalena, Colombia. *Biota Colomb* 2019;20(1):106-119. <https://doi.org/10.21068/c2019.v20n01a07>
46. Monge-Nájera J. What can we learn about wildlife killed by vehicles from a citizen science project? A comparison of scientific and amateur tropical road-kill records. *UNED Res J*, 10. 2018 feb. 28. <http://dx.doi.org/10.22458/urj.v10i1.2041>
47. Waide RB. Summary of the response of animal populations to hurricanes in the Caribbean.

- Biotropica 1991;23:508-512. <https://doi.org/10.2307/2388273>
48. De La Ossa-V J, Galván- Guevara S. Registro de mortalidad de fauna silvestre por colisión vehicular en la carretera Toluviejo- ciénaga La Caimanera, Sucre, Colombia. *Biota colombiana*. 2015;16(1):67-77. <http://hdl.handle.net/20.500.11761/9428>
49. Reid FA. A field guide to the mammals of Central America and Southeast Mexico. New York (USA): Oxford University Press; 1997. <https://doi.org/10.1644/11-MAMM-R-008.1> Wainwright M. The mammals of Costa Rica. Ithaca, (USA): Wiley-Blackwell; 2007.
50. Argotte D, Monsalvo J. Incidencia de la carretera Barranquilla-Ciénaga, sobre la mortalidad de vertebrados y su relación con el medio ecológico, en la Vía Parque Isla de Salamanca, Magdalena, Colombia [tesis de pregrado]. Barranquilla (CO): Universidad del Atlántico; 2002, 80 p.
51. Carvajal-Alfaro V, Quesada FD. Atropello de mamíferos silvestres en la ruta de acceso al cantón de Liberia, Guanacaste, Costa Rica. *Rev Ventana* 2013;7:12-14. <https://revistas.tec.ac.cr/index.php/ventana/article/view/4679>
52. Rojano C, Chacón-Pacheco J, Polo AF. El oso melero (*Tamandua mexicana*), en el Caribe colombiano: aportes sobre su ecología y amenazas. *Edentata* 2016;17:17-24. <http://dx.doi.org/10.2305/IUCN.CH.2016.EDENTATA-17-1.4.en>
53. Correa D. Guía Ambiental de pasos de fauna silvestre en infraestructura lineal. Bogotá (CO): Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible; 2023. Proyecto Conservación de bosques y sostenibilidad en el corazón de la Amazonia.
54. Iuell B, Bekker H, Cuperus R, Dufek J, Fry G, Hicks C, Wandall BLM. *Wildlife and Traffic: a European handbook for identifying conflicts and designing solutions*. Brussels (BE): European Co-operation in the Field of Scientific and Technical Research; 2003. <https://handbookwildlifetraffic.info/>
55. Clevenger AP, Huijser MP. *Wildlife crossing structure handbook: design and evaluation in North America*. Report n.º FHWA-CFL-TD-11-003. Lakewood (CO): Federal Highway Administration, Central Federal Lands Highway Division; 2011. <https://rosap.nhtl.bts.gov/view/dot/41646>
56. Gonzalez-Velez JC, Torres-Madronero MC, Murillo-Escobar J, Jaramillo-Fayad JC. An artificial intelligent framework for prediction of wildlife vehicle collision hotspots based on geographic information systems and multispectral imagery. *Ecol Inform* 2021;63: 101291. <https://doi.org/10.1016/j.ecoinf.2021.101291>
57. Pérez-Guerra J, Gonzalez-Velez J, Murillo-Escobar J, Jaramillo-Fayad JC. Prediction of areas with high risk of roadkill wildlife applying maximum entropy approach and environmental features: East Antioquia, Colombia. *Landsc Ecol* 2024;20(1):75-88. <https://doi.org/10.1007/s11355-023-00581-7>
58. Newell R, Dale A, Lister NM. An integrated climate-biodiversity framework to improve planning and policy: An application to wildlife crossings and landscape connectivity. *Ecol Soc* 2022;27(1). <https://doi.org/10.5751/ES-12999-270123>
59. Ramos-Pallares E, Meza- Joya FL. Reptile road mortality in a fragmented landscape of the middle Magdalena Valley, Colombia. *Herpetol Notes* 2018;11:81-91. <https://www.biotaxa.org/hn/article/view/29825>
60. Meza-Joya FL, Ramos-Pallares E, Cardona D. Spatio-temporal patterns of mammal road mortality in Middle Magdalena Valley, Colombia. *Oecol Aust* 2019;23:575-88 <https://doi.org/10.4257/oeco.2019.2303.15>

61. Obando-Tobón JM, Delgado-V CA, Urrego-Giraldo LE, Saravia-Ruiz P, Tapias-M J, Arias-Alzate A. Influence of behavior and habitat on wildlife roadkill: the case of vertebrates on peri-urban roads in the Colombian Andes. *Rev Biol Trop* 2024;72(1): e56433. <https://doi.org/10.15517/rev.biol.trop.v72i1.56433>
62. Bastille-Rousseau G, Wall J, Douglas-Hamilton I, Wittemyer G. Optimizing the positioning of wildlife crossing structures using GPS telemetry. *J Appl Ecol* 2018;55(4): 2055-2063. <https://doi.org/10.1111/1365-2664.13117>
63. Assis JC, Giacomini HC, Ribeiro MC. Road Permeability Index: Evaluating the heterogeneous permeability of roads for wildlife crossing. *Ecol Indic* 2019;99:365-374. <https://doi.org/10.1016/j.ecoind.2018.12.012>
64. Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino. Prescripciones técnicas para el seguimiento y evaluación de la efectividad de las medidas correctoras del efecto barrera de las infraestructuras de transporte. Documentos para la reducción de la fragmentación de hábitats causada por infraestructuras de transportes; n.º 2. Madrid (ES): Organismo Autónomo Parques Nacionales, Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino; 2008. 138 p. https://www.miteco.gob.es/content/dam/mitesco/es/biodiversidad/temas/ecosistemas-y-conectividad/efecto_barrera_infraestructuras_transporte_tcm30-195793.pdf
65. Mimet A, Clauzel C, Foltête JC. Locating wildlife crossings for multispecies connectivity across linear infrastructures. *Landscape Ecol* 2016;31:1955-73. <https://doi.org/10.1007/s10980-016-0373-y>
66. Sanz B, Balmori A, Turón JV. Huellas y rastros de los mamíferos ibéricos. Zaragoza (ES): Azara; 2005. 286 p.
67. Rodríguez KN, Aguirre DR, Ceballos CP. Experimental protocol to repel opossums (*Didelphis marsupialis*) through an artisanal odor repellent device. *Rev Colomb Cienc Pecu* 2022;35(4):205-216. <https://doi.org/10.17533/udea.rccp.v35n4a01>
68. Hobday AJ, Minstrell ML. Distribution and abundance of roadkill on Tasmanian highways: human management options. *Wildlife Research* 2008;35:712-726. <https://doi.org/10.1071/WR08067>
69. Englefield B, Starling M, McGreevy P. A review of roadkill rescue: who cares for the mental, ¿physical and financial welfare of Australian wildlife carers? *Wildlife Research* 2018;45(2):103-118. <http://dx.doi.org/10.1071/WR17099>
70. Betancur E, Cañón JE. La ciencia ciudadana como herramienta de aprendizaje significativo en educación para la conservación de la biodiversidad en Colombia. *CAA* 2016;3(2):15. <https://revistas.udea.edu.co/index.php/CAA/article/view/323236>
71. Rodda GH, Grajal A. The nesting behavior of the green iguana (*Iguana iguana*) in the llanos of Venezuela. *Amphib-reptil* 1990;11:31-39. <https://doi.org/10.1163/156853890X00294>
72. Arango-Lozano J, Patiño-Siro D. Does the geometrical design of roads influence wildlife roadkills? Evidence from a highway in central Andes of Colombia. *Eur J Ecol* 2022;6(1): 58-70. <https://doi.org/10.17161/euroj ecol.v6i1.13688>
73. Townsend JH, Krysko KL, Enge KM. Introduced iguanas in Southern Florida: a history of more than 35 years. *Iguana* 2003;10(4):111-118. <https://journals.ku.edu/iguana/article/view/16999>
74. Colino-Rabanal vJ, Lizana M. Herpetofauna and roads: a review. *Basic Appl Herpetol* 2012;26:5-31. <http://dx.doi.org/10.11160/bah.12008>