

# ISSUES IN ECOLOGY

PUBLICADO POR THE ECOLOGICAL SOCIETY OF AMERICA



## ECOLOGÍA DE VÍAS RURALES: EFECTOS, MANEJO E INVESTIGACIÓN



Alisa W. Coffin, Douglas S. Ouren, Neil D. Bettez, Luís Borda-de-Água, Amy E. Daniels, Clara Grilo, Jochen A.G. Jaeger, Laetitia M. Navarro, Haiganoush K. Preisler y Emily S.J. Rauschert

# ECOLOGÍA DE VÍAS RURALES: EFECTOS, MANEJO E INVESTIGACIÓN

Alisa W. Coffin, Douglas S. Ouren, Neil D. Bettez, Luís Borda-de-Água, Amy E. Daniels, Clara Grilo, Jochen A.G. Jaeger, Laetitia M. Navarro, Haiganoush K. Preisler y Emily S.J. Rauschert

## RESUMEN

Las redes de vías forman el sistema de transporte básico de la mayoría de las poblaciones del mundo, estimulando las economías locales y regionales. Los avances científicos de los últimos años han revelado que este enorme y creciente boom de la construcción planetaria se ha producido principalmente en ambientes no urbanos y, de forma más agresiva, en los bordes de las fronteras en desarrollo de regiones tropicales. Sin embargo, incluso en países muy urbanizados, las redes de vías se componen principalmente de vías por fuera de las áreas urbanas. Para obtener una imagen fiable y completa de la red mundial de vías, los científicos han aprovechado los avances de las tecnologías cartográficas, incluida la detección automatizada a partir de imágenes de satélite y la cartografía en tiempo real sobre el terreno. Dado que la extensión de la red mundial de vías está aumentando a gran velocidad y sin precedentes, los impactos generalizados, y a veces dramáticos, sobre los ecosistemas y los servicios que éstos proveen en las zonas rurales continuarán. La ciencia de la ecología vial ha surgido para cuantificar estos efectos y proponer soluciones para mitigar los efectos perjudiciales de las vías y su tráfico. Este informe explica los efectos y examina las implicaciones de la investigación sobre la ecología vial para la toma de decisiones y acciones, incluyendo algunas prácticas de gestión para ayudar a mitigar efectos ecológicos negativos de las vías rurales.

Algunos de los principales efectos ecológicos de las vías en los paisajes rurales son:

- Destrucción de hábitats, incluida la fragmentación de poblaciones de plantas y animales.
- Perturbación del tráfico, incluidas colisiones entre animales y vehículos, que reducen las poblaciones y la calidad del hábitat, hasta el punto de provocar extinciones locales.
- Introducción y establecimiento de plantas y animales foráneos e invasores, que compiten con la flora y fauna autóctonas.
- Contaminantes como hidrocarburos, sales, nitratos, metales pesados y pesticidas, emitidos por vehículos y materiales de la superficie de la vía, y asociados al polvo. Estos contaminantes persisten y modifican el entorno de las vías, incluidos hábitats acuáticos (p. ej, arroyos cercanos a las vías) y sistemas acuáticos aguas abajo (p. ej, estuarios).
- Alteración de la hidrología: las cunetas cambian el movimiento del agua y los patrones de infiltración; las estructuras de las vías afectan a la erosión y sedimentación de los lechos de los arroyos; las alcantarillas fragmentan los arroyos alterando el movimiento de la fauna acuática.
- Mayor acceso a lugares remotos que, a su vez, propicia la destrucción colateral de hábitats, la degradación de ecosistemas y la pérdida de biodiversidad.

Existen varias estrategias para mitigar los efectos negativos de las vías en los paisajes rurales. La aplicación de la ecología vial puede generar ventajas en la política de transporte, la planificación y la toma de decisiones, para reducir los impactos de las vías mediante la evaluación de alternativas de desarrollo, incluyendo la decisión de construir o no una vía, dónde, cómo y cuándo se construirá. Estas estrategias pueden aplicarse a escala continental, regional o local, contribuyendo al debate de las compensaciones en el marco del desarrollo sostenible. Las estrategias para mitigar el impacto ambiental incluyen la configuración de las vías para evitar la

destrucción de los ecosistemas, la instalación de vallas para reducir la mortalidad, la creación de pasos seguros para la fauna por debajo y por encima de las vías, el control del tráfico durante los momentos críticos para las especies de alta importancia y el seguimiento de mejores prácticas para la construcción y mantenimiento de las vías.

La ecología vial es una ciencia joven que ha avanzado muy rápido en los últimos años. Desde finales de la década de los 90, miles de estudios científicos han medido diversas respuestas ambientales a la existencia de las vías y su tráfico, con la intención de cuantificar el alcance y la magnitud de sus efectos ecológicos. En la actualidad sin embargo, los retos de la ecología vial consisten en el manejo de grandes volúmenes de datos, integración de conjuntos de datos y su incorporación a modelos. Además está el reto de sintetizar la información entre disciplinas, por ejemplo combinando datos sobre efectos hidrológicos, químicos y sanitarios, para comprender la profundidad y el alcance de las respuestas ecológicas. Es por este motivo que a medida que la ecología vial madura y aborda estos retos, surge una comprensión más matizada y completa de los efectos ecológicos de las vías.

Los sistemas de vías rurales de menor volumen no suelen estar tan bien cartografiados ni estudiados como sus homólogos de mayor volumen, pero constituyen la mayor parte de la red mundial de vías, y están en las fronteras donde los patrones y dinámicas ecológicas tienen gran influencia en las actividades humanas. En contraste las características de las redes de vías en estos lugares lejanos (p. ej., qué tan bien conectadas están) tienen implicaciones para el futuro de las comunidades rurales y de los paisajes en los que se insertan. Si bien estos caminos ofrecen muchos beneficios para las personas que viven en áreas rurales remotas, lidiar con los impactos que generan y encontrar soluciones para mitigar sus efectos ecológicos negativos es una prioridad para la ecología vial. La comunidad de científicos de la ecología vial coopera con los administradores de las tierras y con los tomadores de decisiones, con el compromiso de identificar problemas y evaluar posibles soluciones para gestionar mejor los impactos ecológicos relacionados con las vías en los paisajes rurales.

## INTRODUCCIÓN

Desde el espacio se pueden ver vastas redes de asentamientos humanos que se extienden por todo el planeta y que están casi en su totalidad conectadas por vías. La gente se ha aventurado y seguirá yendo allí donde haya una vía, por lo que es probable que el uso del suelo adyacente a la vía cambie. Las vías prometen un mayor acceso a los recursos naturales, así como a los mercados y al comercio para los productores. Una vía por sí sola no es más que un trozo de tierra removida, pero cuando se conecta con otras vías, se convierte en un eslabón de una red más amplia. Las redes de vías pueden abrir regiones enteras al comercio, al desarrollo económico, a nuevas ideas y usos, y la gente suele verlas como signos de progreso; por lo que no es de extrañar que el desarrollo de la red de vías sea

fundamental para muchos objetivos de desarrollo socioeconómicos. Sin embargo las vías alteran y degradan el valor escénico y natural de los paisajes que fragmentan, socavando potenciales fuentes de desarrollo económico. Producto de recientes esfuerzos independientes para realizar la cartografía de la red mundial de vías, han surgido estimaciones de la extensión de la red vial en el mundo, oscilando entre 9,1 y 64,3 millones de kilómetros, dependiendo de los datos del mapa vial utilizado. Incluso la estimación más conservadora indica que hay suficientes caminos como para rodear el ecuador de la Tierra más de 200 veces. Esta gran producción humana de vías explica la importancia del papel que desempeña la infraestructura vial en las economías locales y regionales, pero también se constituye en una enorme huella humana con un alto potencial de impactos ecológicos no deseados.

\*El Global Roads Open Access Data Set (gROADS) v1 (1980-2010) reportó 9,1 millones de km de vías en todo el mundo, mientras que el "World Factbook" de la Agencia Central de Inteligencia de Estados Unidos informó de 64,3 millones de km en 2013.

De manera inevitable las vías alteran los paisajes a través del espacio y del tiempo. Mucho después que desaparezca el motivo inicial para construir una vía, pueden perdurar sus efectos, en ocasiones durante siglos. A pesar de las intenciones y propósitos lo cierto es que las vías cambian de manera permanente los paisajes. Por ejemplo: los restos de los antiguos sistemas de vías del suroeste de Asia, como el Camino Real Persa que unía a la antigua Susa y Persépolis (Irán) con Sardis (Turquía) en el año 500 a. C., en la actualidad aún son evidentes.

Los elementos más perdurables de estas vías incluyen infraestructuras como el histórico “Puente de los Diez Ojos” cerca de Diyarbakir (Turquía), que cruza el río Tigris. Hoy en día es difícil determinar la influencia específica del uso del suelo de esta antigua vía, sin embargo el historiador griego Heródoto describió que ésta facilitaba las comunicaciones en el Imperio Persa, lo que implicaba una administración territorial más rápida y eficaz. Mientras que la evidencia de las vías puede permanecer en el tiempo, los caminos remotos sin pavimentar tienden a ser efímeros. Las vías temporales para la tala de árboles, por ejemplo, pueden utilizarse

## RECUADRO 1.

### ¿QUÉ ES UN VÍA RURAL?

Buena parte de los viajeros más observadores podrían ser capaces de decir si la vía por la que viajan se encuentra dentro del campo, en un suburbio o en una ciudad, pero la respuesta a esta pregunta tan general, sobre la definición de vía, no es tan fácil. No existe una definición universal y aceptada de “vía rural”. La definición más sencilla es la de una vía o camino en una zona rural, lo que lleva a preguntarse: ¿Qué es una zona rural?

Según el Departamento de Transporte de EE. UU., las zonas rurales están “fuera de los límites del censo ajustado y aprobado por la Administración Federal de Vías (FHWA de las siglas del inglés Federal Highway Administration) de las pequeñas zonas urbanas y urbanizadas”. Basándose en la medida de densidad de población utilizada por la Oficina del Censo de EE.UU., más del 96% del territorio estadounidense sería rural. En el 2018 la Administración Federal de Vías de EE. UU. informó que alrededor de 2,9 millones de millas (4,7 millones de km) de vías públicas que recibieron financiación federal para vías en EE. UU. (incluyendo el Distrito de Columbia, Alaska, Hawái y territorios de EE. UU.) eran rurales, es decir cerca del 70 % del sistema de vías públicas; de éstas 1,27 millones de millas (2 millones de km) correspondían a vías rurales sin pavimentar, cerca del 30 % de todas las vías públicas en los EE. UU.



Normalmente las vías se clasifican por su función, por ejemplo como vías de acceso limitado, arterias, colectoras y vías locales. Las vías rurales pueden definirse también en función de los paisajes que atraviesan, ya sean granjas, bosques, montañas o desiertos. Las vías también han sido clasificadas por su función de conexión; así se ha definido que las vías rurales conectan las granjas con los pueblos y los pueblos con los mercados.

Un término relacionado es el de “vías de bajo volumen”, es decir vías con un bajo promedio anual del volumen de tráfico diario, a menudo considerado inferior a 1.000 vehículos al día. Más del 80 % de todas las vías de EE. UU. son de bajo volumen, una proporción coherente para muchas de las redes de vías del país.

Aunque estas vías hacen parte de la infraestructura crítica para los habitantes de las zonas rurales, el nivel

de uso no siempre equivale a que una vía sea “rural”. Hay muchas vías de bajo volumen en zonas urbanizadas y al contrario, hay muchas vías de mayor volumen que atraviesan zonas rurales. Por ejemplo, la red de autopistas Transcanadiense atraviesa zonas rurales remotas de Canadá con un gran volumen de tráfico de vehículos de pasajeros y camiones. De manera adicional, un volumen de 1.000 vehículos al día puede tener un gran impacto. Incluso un volumen de tráfico de 300 vehículos al día puede afectar a algunas especies.

Sea cual sea su definición, las vías rurales están tanto pavimentadas como sin pavimentar. Los caminos sin pavimentar pueden ser de tierra o estar cubiertos por algún material de revestimiento, como grava u otros agregados de piedra. Los caminos no mejorados son caminos de tierra sin material de revestimiento y sin mantenimiento regular.

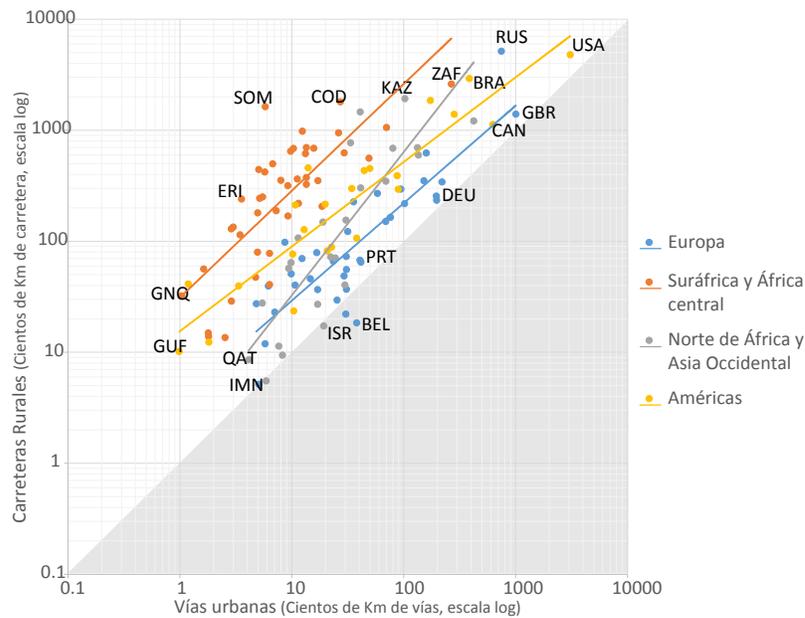
Para el propósito de este artículo centramos la atención en aquellas vías rurales que tienden a:

- 1) Estar más alejadas de los centros culturales,
- 2) ser objeto de mantenimientos no regulares; y
- 3) proporcionar los primeros enlaces críticos entre los centros poblados y las zonas de uso del suelo remoto, como la minería y la silvicultura.

durante meses o años, pero también volverse prácticamente invisibles en pocos años o en décadas.

La inmensa mayoría de la red mundial de vías está formada por vías en zonas rurales, en su gran mayoría sin pavimentar y con un volumen de tráfico predominantemente bajo. Sin embargo en comparación con autopistas y vías pavimentadas con grandes volúmenes de tráfico, estas vías rurales han sido generalmente descuidadas en la investigación ecológica (Recuadro 1). Las redes de vías rurales más largas se encuentran en Rusia, los Estados Unidos de América (EE.UU.), Australia, China, Brasil e India, y van desde unos 287 mil kilómetros en India hasta unos 517 mil kilómetros en Rusia (Figura 1). Los países de África central y meridional tienden a tener una proporción mayor de vías rurales frente a las urbanas, y esta proporción es mayor que los países de América y Europa, sin importar el tamaño. Sin embargo, salvo algunas excepciones en países más pequeños y altamente urbanizados como Bélgica, predomina una mayor proporción de vías rurales en la red de vías. En EE.UU., donde las redes de vías están bien documentadas, la mayoría de las vías rurales públicas están etiquetadas como "locales" y "vías alternas secundarias" (Figura 2). No es de extrañar que la mayoría de las vías de EE.UU. sean más bien pequeñas y de bajo volumen, y es probable que este patrón describa las redes de vías rurales de todo el mundo.

La red mundial de vías revela un nivel de acceso humano al planeta, extenso y constante; en cuestión de años aparecen nuevas vías, así como cambios en el uso del suelo, que se suman para transformar completamente los paisajes (Figura 3). En el 2016 un análisis de las vías mundiales indicó que si bien las zonas sin vías (a una distancia mínima de 1 km de una vía) cubrían el 80 por ciento de la superficie terrestre de la

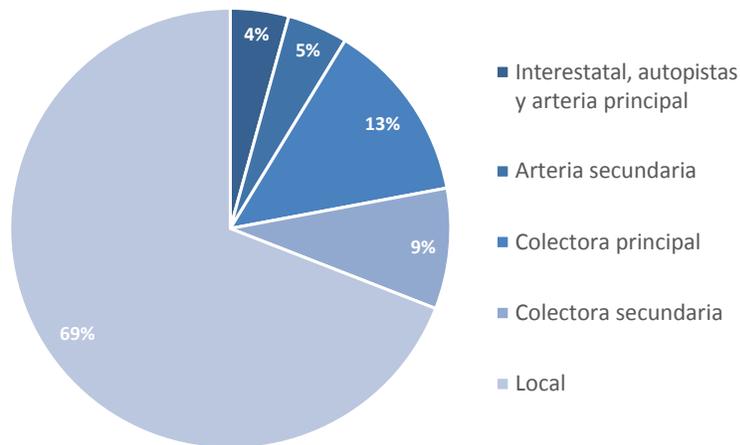


Tierra, más de la mitad de estas zonas son parches de menos de 1 kilómetro cuadrado. Ya sea por la extracción de recursos, la colonización o el comercio a larga distancia, la construcción de una vía que atraviese una región previamente aislada abre la oportunidad para nuevos desarrollos en el paisaje. Los impactos de las vías en la biodiversidad son generalizados; de hecho, los efectos acumulativos de las vías han sido denominados el "gigante dormido" de la biología ambiental.

En este informe abordamos las siguientes preguntas sobre los caminos rurales: ¿Cuál es el estado de la investigación sobre la ecología de los caminos rurales, y qué investigación adicional ayudaría a los gestores del territorio a mitigar sus impactos?, ¿cuáles son los principales efectos de los caminos rurales en el ambiente de la mayoría de las zonas bioclimáticas?, ¿qué políticas y prácticas pueden utilizar los gestores de tierras en la planificación y construcción de caminos rurales para minimizar los impactos ecológicos? En resumen, ¿cómo podemos considerar mejorar las compensaciones entre los beneficios sociales y económicos, y los efectos ecológicos asociados al desarrollo y uso de los caminos rurales?

**Figura 1.** Extensión de las redes de vías rurales vs. vías urbanas en varios países, clasificados por las principales regiones geográficas de Europa, África Central y Meridional, África del Norte y Asia Occidental, y América, incluyendo líneas de tendencia para cada región. Se usaron las áreas urbanas globales para diferenciar entre vías rurales vs. vías urbanas en la base de datos mundial de vías. En la mayoría de los países, las vías rurales son predominantes en toda la red. Abreviaciones de los países: Bélgica – BEL, Brasil – BRA, Canadá – CAN, República Democrática del Congo – COD, Eritrea – ERI, Alemania – DEU, Reino Unido – GBR, Guinea Ecuatorial – GNQ, Guyana Francesa – GUF, Isla de Man – IMN, Israel – ISR, Kazajstán – KAZ, Portugal – PRT, Catar – QAT, Rusia – RUS, Somalia – SOM, Estados Unidos de América – EE.UU., Sudáfrica – ZAF. Fuente de datos: Centro para la Red Internacional de Información sobre Ciencias de la Tierra (CIESIN por sus siglas del inglés Center for International Earth Science Information Network / Universidad de Columbia y Servicios de Extensión de Tecnología de la Información (ITOS por sus siglas del inglés Information Technology Outreach Services) / Universidad de Georgia. 2013. Conjunto de datos de acceso abierto de Vías Globales, versión 1 (gROADSv1). Palisades, NY: Centro de Aplicaciones y Datos Socioeconómicos de la NASA (SEDAC por sus siglas del inglés Socioeconomic Data and Applications Center)

**Figura 2.** Proporción de vías públicas por categoría en los EE.UU. para el año 2018. Las vías locales y las colectoras menores constituyen casi el 80% de todas las vías rurales públicas de EE.UU., clasificadas por el Departamento de Transporte de EE.UU. Esta proporción se ha mantenido estable desde 1980. No se han recogido datos sobre las vías rurales privadas de todo el país.



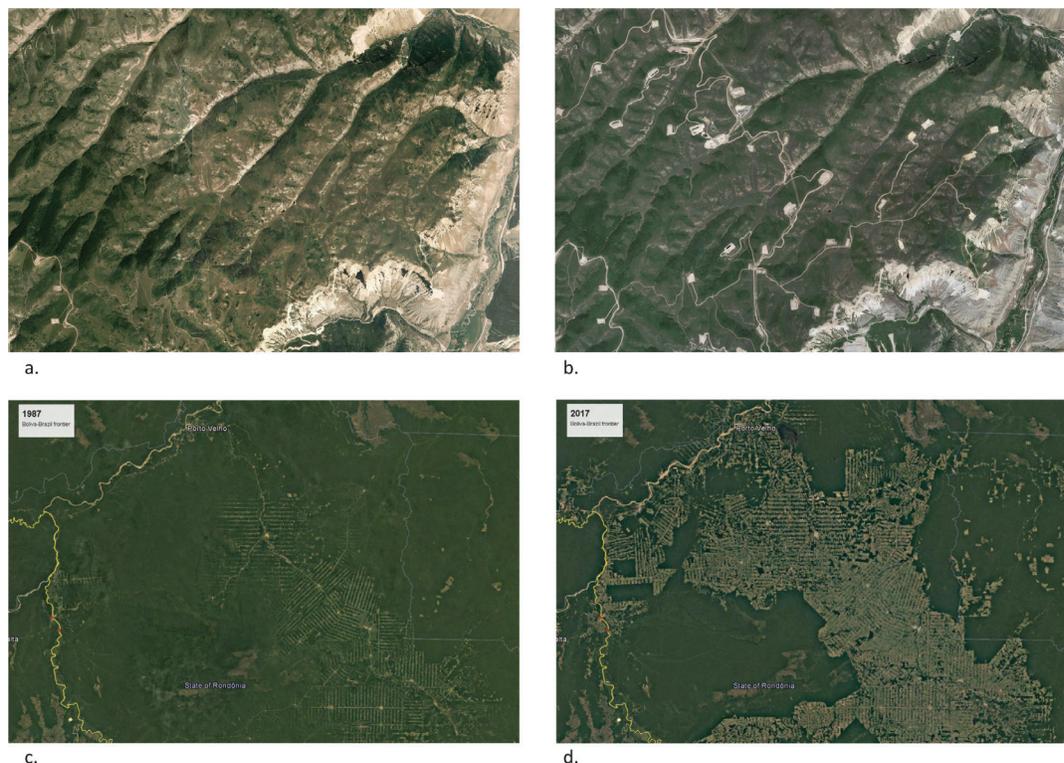
La notable expansión de la investigación científica en el campo de la ecología vial en las últimas décadas nos permite responder a estas preguntas, haciendo uso de un marco conceptual que describe la ecología vial como el elemento central de tres "esferas" del desarrollo y uso de vías: la comprensión de los efectos ecológicos de las vías (efectos); la información de las decisiones sobre el transporte, la mitigación y los planes de paisajismo (decisiones); y la ayuda en la implementación de estrategias de diseño, construcción y uso

de las vías (acciones; Figura 4). Sin embargo la mayoría de las investigaciones en ecología vial no están diseñadas con un enfoque particular en las vías rurales, razón por la cuál a lo largo de este documento nos preguntamos: "¿Qué significado tienen las investigaciones revisadas, en el contexto de las vías

rurales?". Comenzamos con una descripción de la ecología vial, incluyendo el surgimiento y desarrollo de esta rama de la investigación científica. Después describimos algunos de los principales efectos ecológicos de las vías rurales que se apoyan en estudios de casos, como por ejemplo los efectos biogeoquímicos, hidrológicos y atmosféricos, los efectos de las especies invasoras y los efectos sobre la vida silvestre, que están respaldados por estudios de casos.

Continuamos con el reconocimiento de las políticas nacionales e internacionales vigentes en materia de vías rurales, en los casos en que se han desarrollado. Describimos las

**Figura 3.** Imágenes que muestran las redes de vías en las zonas rurales de Colorado, EE.UU., en 2005 (a) y 2014 (b), así como Rondônia, Brasil, en 1987 (c) y 2017 (d). Los patrones de desarrollo vial de Colorado son indicativos de la extracción de gas y petróleo, mientras que las configuraciones de Rondônia muestran los patrones típicos de "espina de pescado" de la colonización agrícola y expansión agrícola. (Imágenes proporcionadas por Google Earth: USDA, Administración de Servicios Agrícolas, Programa Nacional de Imágenes Agrícolas; Landsat / Copernicus)



mejores prácticas de gestión y mitigación (MPG) para la planificación, diseño y uso de vías rurales, incluyendo una lista de MPG para cada una de las fases de desarrollo. El informe termina con un análisis de las

necesidades actuales de investigación, especialmente en lo que respecta a redes de vías rurales; y se comparten unas conclusiones y recomendaciones.



**Figura 4.** Gráfico que muestra la relación de la Ecología vial con esferas de decisiones, acciones y efectos. Estas relaciones forman un marco conceptual que ilustra las asociaciones de la ciencia y la práctica de la ecología vial con varias etapas de planificación, desarrollo y uso del sistema vial

## EL AUGE DE LA ECOLOGÍA VIAL

A medida que la gente fue comprendiendo que las vías tienen un impacto ambiental, a principios del siglo XX surgió un campo de investigación que llamó la atención sobre sus efectos perjudiciales. Mientras las vías se extendían por los paisajes del mundo para dar cabida a los vehículos motorizados, los profesionales de la biología observaban las inevitables colisiones de animales con los vehículos. Los primeros estudios eran rudimentarios, por lo general diseñados para ayudar a mejorar la seguridad de las vías, al reducir las colisiones de vehículos con animales. Los investigadores contaban sistemáticamente el número, las especies

y la ubicación de los animales muertos por los vehículos. En 1981 Heinz Ellenberg, un alemán ecólogo vegetal, junto a sus colegas utilizaron por primera vez en alemán el término ecología vial (*Straßenökologie*), dando un nombre distintivo a este campo de investigación. Su estudio destacó los efectos de las emisiones, la sal de las vías, el ruido y los cambios en las condiciones climáticas sobre la vegetación y la fauna, y advirtieron una mayor fragmentación de los paisajes como consecuencia de la construcción de vías. Incluso formularon recomendaciones para reducir el uso de herbicidas, para la elección de la vegetación de los bordes de las vías basándose en principios ecológicos, para reducir las colisiones con animales y para recuperar vías que no

**Figura 5.**

El volumen de publicaciones en inglés con palabras clave "road" (vía) y "ecology" (ecología) se ha multiplicado desde la publicación en 1998 de los primeros artículos influyentes que acuñaron el término "road ecology" (ecología vial). La altura de la barra indica el número de publicaciones descubiertas mediante una búsqueda de palabras clave en la base de datos "Environment Complete" de EBSCOhost. Aunque muchos estudios de ecología vial se realizan en zonas rurales, la proporción de publicaciones que incluyen explícitamente el término "rural" se produjo en aproximadamente el 3% de los estudios que se muestran aquí en naranja.

fueran necesarias. Richard T. T. Forman, un estadounidense ecólogo del paisaje y sus colegas, tradujeron el término en 1998 para una editorial de *Landscape Ecology*, en el que se refirieron al estudio de Ellenberg y sus colegas en 1981. El uso del término en inglés se amplió tras la publicación en 2003 del libro *Road Ecology: Science and Solutions*.

Los estudios de mortalidad de animales en vías siguen constituyendo la mayor parte de la investigación de la ecología vial; diferenciada y específica para cada lugar, la investigación correspondiente conlleva a un ámbito de trabajo bien definido y limitado. Estos estudios proporcionan información útil sobre las especies afectadas, así como el momento y ubicación de las colisiones. Siguen siendo fundamentales en la planificación y el diseño de medidas de mitigación a lo largo de vías de gran volumen en paisajes rurales. Además, el aumento de la ciencia ciudadana, que involucra al público en proyectos científicos, junto con la posibilidad, durante la última década, de reportar datos a través de la web, también ha beneficiado la recopilación de casos de atropellamientos en todo el mundo. Las aplicaciones para teléfonos inteligentes de descarga gratuita ilustran el potencial en aumento para obtener grandes conjuntos de datos, en áreas geográficas extensas y con menores costos.

Aunque los estudios tradicionales sobre la mortalidad de los animales contribuyen a nuestra comprensión de las colisiones entre animales y vehículos, no explican en qué medida las colisiones con vehículos afectan a las poblaciones de animales salvajes. Para ello se requiere una comprensión más profunda de las poblaciones de animales,

así como de su longevidad, reproducción y respuestas más amplias del ecosistema a factores como la vegetación, que a su vez afectan a la fauna. En consecuencia un número de estudios emergentes han recopilado información sobre las respuestas estacionales, anuales y decenales a las vías, los cuáles han proporcionado datos, por ejemplo de los movimientos de los animales y sus relaciones con los patrones de tráfico. Uno de estos estudios reportó que los alces de Rocky Mountain evitan los caminos con vehículos todoterreno, pero no los que tienen tráfico ecuestre (Estudio de caso 1). El seguimiento a distancia de los animales mediante etiquetas que registran o transmiten su posición, junto con estudios genéticos y de observación, también revelan los efectos de las vías en el comportamiento de los animales.

Otros estudios sobre los efectos de las vías en lugares específicos, como los que examinan los cambios en luz, el microclima, el polvo, los contaminantes, la hidrología, las especies no autóctonas y otros efectos medibles, han aumentado enormemente nuestra comprensión de cómo las vías afectan a las propiedades y procesos de los ecosistemas, así como a la flora y la fauna locales. De hecho, el número de estudios sobre ecología vial se ha disparado en las dos últimas décadas (Figura 5), con un aumento de más del 400% en el número de publicaciones desde 1996. Aunque estos avances son impresionantes, es necesario seguir investigando para relacionar los efectos de la gestión de las vías con el comportamiento de los animales en amplias escalas temporales y espaciales. Por ejemplo los estudios que evalúan la eficacia de las medidas de mitigación suelen tener un alcance limitado, un diseño de estudio deficiente y falta de financiación. Un análisis reciente de los estudios de mitigación señaló que se puede mejorar la evaluación de eficacia, si éstos incorporan una duración mínima de cuatro años y comparan las condiciones antes y después de la aplicación de la medida de mitigación. deficiente y falta de financiación. Un análisis reciente de los estudios de mitigación señaló que se puede mejorar la evaluación de eficacia, si éstos incorporan una duración mínima de cuatro años y comparan las condiciones antes y después de la aplicación de la medida de mitigación.

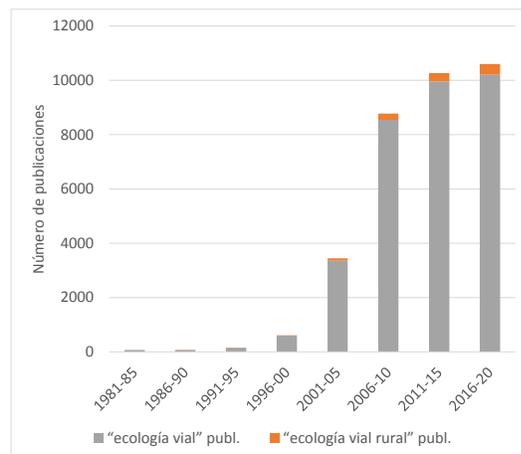


TABLA 1. EFECTOS DE LAS VÍAS Y EL TRÁFICO EN LOS PAISAJES Y LOS ECOSISTEMAS

TEMA	EFFECTOS AMBIENTALES EN LAS VÍAS O CERCA DE ELLAS
Elementos del paisaje 	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Ocupación del suelo para la superficie de la vía y los márgenes de la vía</li> <li>• Compactación o sellado de la superficie del suelo</li> <li>• Alteraciones de la geomorfología (p. ej., cortes, terraplenes, presas, estabilización de taludes)</li> <li>• Eliminación y alteración de la vegetación</li> </ul>
Clima local 	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Modificación de las condiciones de temperatura (p. ej., calentamiento de la superficie de la vía; aumento de la variabilidad de la temperatura)</li> <li>• Acumulación de aire frío en los terraplenes de las vías</li> <li>• Modificación de las condiciones de humedad (p. ej., menor contenido de humedad en el aire debido a una mayor radiación solar y a la reducción de la vegetación; humedad estancada en los márgenes de las vías debido a la compactación del suelo)</li> <li>• Modificación de las condiciones de luz</li> <li>• Modificación de las condiciones del viento (p. ej., debido a los corredores en los bosques)</li> <li>• Formación de gradientes microclimáticos pronunciados que actúan como barreras</li> </ul>
Emisiones 	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Gases de escape de vehículos, contaminantes, sustancias fertilizantes que conducen a la eutrofización (exceso de nutrientes en las masas de agua que provoca un crecimiento excesivo de plantas)</li> <li>• Emisiones de polvo y partículas (p. ej., la abrasión de los neumáticos y los forros de los frenos)</li> <li>• Aceite, combustible, etc. (p. ej., como resultado de accidentes de tráfico)</li> <li>• Sal de vía y compuestos de deshielo en latitudes y elevaciones más altas.</li> <li>• Ruido, según el tráfico de vehículos y las condiciones atmosféricas</li> <li>• Estímulos visuales; iluminación del tráfico, infraestructuras y actividades asociadas a la vía</li> </ul>
Agua 	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Drenaje, eliminación más rápida de las aguas pluviales, prevención de la infiltración de las aguas subterráneas</li> <li>• Modificación de los cursos de agua superficiales</li> <li>• Modificación de los flujos de aguas subterráneas</li> <li>• Contaminación del agua por la deposición de emisiones cerca de las vías</li> </ul>
Flora/Fauna 	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Muerte de animales causada por colisiones con vehículos (en parte debido a la atracción de los animales por las vías)</li> <li>• Formación de una zona de efecto de las vías con menores densidades de población cerca de ellas</li> <li>• Mayores niveles de perturbación y estrés, pérdida de refugios</li> <li>• Fragmentación, reducción y pérdida de hábitat para muchas especies; creación de nuevos hábitats para unas pocas especies</li> <li>• Descomposición de las poblaciones de animales y plantas, reducción de la biodiversidad, pérdida de especies y extinción</li> <li>• Aislamiento genético, efectos de endogamia, aumento de la deriva genética e interrupción de los procesos de desarrollo evolutivo</li> <li>• Interrupción de la dinámica metapoblacional, cambios en la proporción de sexos, cambios en la estructura de la población y la composición de la comunidad (p. ej., liberación de la depredación mediante la eliminación de grandes depredadores)</li> <li>• Efecto barrera, efecto filtro para el movimiento de los animales (reducción de la conectividad)</li> <li>• Interrupción de las vías de migración estacional, impedimento de la dispersión, reducción de la recolonización de hábitats vacíos</li> <li>• Alteración del acceso a los recursos dispersos en el paisaje, modificación de la disponibilidad de alimentos y de la composición de la dieta (p. ej., reducción de la disponibilidad de alimentos para los murciélagos debido a la acumulación de aire frío a lo largo de los terraplenes de las vías por la noche)</li> <li>• Aumento de la intrusión y distribución de especies invasoras</li> <li>• Creación de vías que facilitan la propagación de enfermedades infecciosas</li> </ul>

Fuente: Jaeger, J. (2003): II-5.3 Landschaftszerschneidung [II-5.3 Landscape dissection]. - En: Konold, W., R.Böcker, U. Hampicke (Eds.) (1999ff.): Handbuch Naturschutz und Landschaftspflege. 11° fascículo 11/2003. Ecomed-Verlag, Landsberg, Alemania. 30 pp. [artículo de enciclopedia]

Nota: No se incluyen los efectos de las obras de construcción, como la excavación y deposición del suelo, las vibraciones y las perturbaciones acústicas y visuales

## EFFECTOS DE LAS VÍAS RURALES EN LOS ECOSISTEMAS

Muchos países valoran y protegen sus espacios rurales abiertos como algo esencial para su carácter nacional. En la Historia Geográfica de América, Gertrude Stein escribió: "En Estados Unidos hay más espacio donde no hay nadie que donde hay alguien. Eso es lo que hace que Estados Unidos sea lo que es". Pero en EE. UU. y en todo el mundo, hasta los espacios más vacíos "donde no hay nadie" tienen vías, e incluso las que se utilizan poco pueden tener un profundo impacto acumulativo en el ambiente; por las sustancias químicas que vierten, por las cuencas hidrográficas que atraviesan, por las especies invasoras que introducen y por la forma en que afectan a la vida silvestre (Tabla 1). Cabe destacar los efectos ecológicos de las vías en las selvas tropicales, que son sustancialmente diferentes de los efectos de las vías en otras ecorregiones. Aunque los impactos ecológicos descritos a continuación no se centran en ninguna una ecorregión particular, las condiciones climáticas, biológicas y económicas de los bosques tropicales exacerbaban muchos de los efectos. Por ejemplo, en los trópicos húmedos las lluvias intensas pueden provocar una grave erosión de las vías, lo que da lugar a la formación de barrancos que no sólo destruyen la vía, sino que repercuten en los ecosistemas acuáticos aguas abajo, donde se depositan los sedimentos.

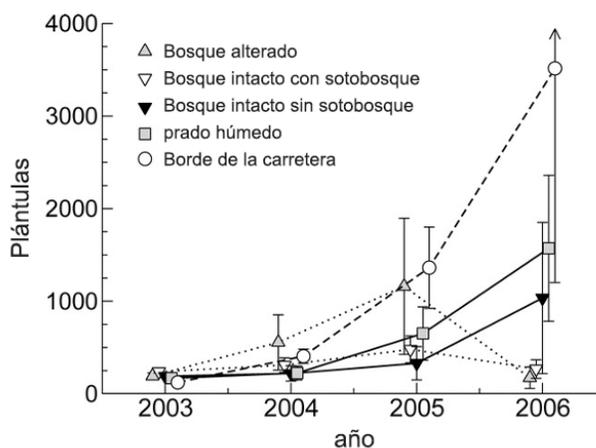
### Efectos biogeoquímicos

Los efectos biogeoquímicos incluyen la familia de efectos causados cuando los elementos o sustancias químicas se transfieren al ambiente. Las vías tienen impactos biogeoquímicos cuando las sustancias químicas relacionadas con las propias vías o con los vehículos que circulan por ellas son arrastradas o depositadas a lo largo de los gradientes, lejos de la vía. Muchos de estos gradientes son relativamente cortos (< 200 metros) y la mayor parte de la deposición se produce en los primeros 5-10 metros, pero a veces las sustancias químicas son transportadas mucho más

lejos por los cursos de agua. Estos productos químicos incluyen metales pesados como el zinc (Zn), el cobre (Cu), el cadmio (Cd), el plomo (Pb), el cromo (Cr), el manganeso (Mn) y el níquel (Ni), procedentes del desgaste de los motores, de los neumáticos y frenos; sales como el cloruro de sodio (NaCl) y el cloruro de calcio (CaCl) procedentes del deshielo y del control del polvo; gases como los óxidos de nitrógeno (NOx) y el amoníaco (NH<sub>3</sub>) procedentes de las emisiones de escape; e hidrocarburos como los hidrocarburos aromáticos policíclicos (HAP). Por ejemplo, en una comparación de estudios europeos, los investigadores encontraron niveles de Cd, Cr, Cu, Ni, Pb y Zn más altos que el promedio, en el área entre los 0-5 m más cerca de la vía, y algunos de ellos guardaban una fuerte correlación con un menor pH del suelo. Estos estudios sin embargo se enfocaron principalmente en vías con alto volumen de tráfico, mayor variabilidad y con concentraciones medias de metales. Por lo tanto, se puede esperar que las concentraciones de metales fueran menores en las vías de menor volumen. El impacto de las sustancias químicas en el ambiente varía, pero muchas no pueden ser descompuestas por los microorganismos, por lo tanto, su toxicidad persistente a largo plazo en plantas, animales y personas es preocupante.

La vía en sí es una fuente de polvo, sedimentos y partículas que tienen efectos biogeoquímicos. Los agregados superficiales (mezclas de roca o grava triturada) se utilizan con frecuencia en las vías de tierra y grava para crear una superficie segura para la conducción. Tanto por escorrentía directa como por la creación de polvo, los efectos

**Figura 6.** La recolección de plántulas de la hierba zancuda japonesa (*Microstegium vimineum*) fue mayor en los parches adyacentes de las vías, asociados a niveles más altos de pH en el suelo. (Fuente: Nord, Andrea N., David A. Mortensen y Emily S. J. Rauschert. 2010. *Environmental Factors Influence Early Population Growth of Japanese Stiltgrass [Microstegium vimineum]*. *Invasive Plant Science and Management* 3:17-25).



del agregado pueden sentirse mucho más allá de la propia vía, alterando el pH del suelo y afectando a la vegetación. Por ejemplo, un pH más alto del suelo adyacente a las vías con superficie de agregados calcáreos, probablemente ayudó a que la hierba invasora zancuda japonesa se estableciera a lo largo de los bordes de las vías (Figura 6).

Una gran cantidad de estudios han examinado los metales pesados asociados a las vías, midiendo su contenido en la escorrentía de las aguas pluviales y en los suelos de los bordes de las vías. Por ejemplo, las investigaciones realizadas en los bordes de las vías de la meseta china de Qinghai-Tibet, revelaron que la concentración de metales pesados en los suelos de los bordes de las vías dependía de la densidad del tráfico, variaba con el terreno y el viento, y disminuía exponencialmente con la distancia a la vía, alcanzando normalmente niveles de referencia a los 50 metros. En Australia los científicos descubrieron una mayor contaminación cuando los sedimentos y el polvo de las vías que contenían metales pesados llegaban a los arroyos cercanos, esto dio lugar a mayores concentraciones de metales pesados en los sedimentos de los arroyos. En otro estudio los investigadores descubrieron mayores concentraciones de metales pesados en las hierbas de los primeros 10 metros de los bordes de las vías, contaminando posibles fuentes de alimento para el ganado y la fauna silvestre.

Otras sustancias químicas asociadas a los vehículos, como las emisiones y los contaminantes orgánicos, también aumentan en cantidad con el aumento del tráfico. Estas sustancias químicas son fuentes en la combustión incompleta de la gasolina, junto con el desgaste de los neumáticos y la abrasión de la superficie de la vía. El nitrógeno (NOx y NH3) emitido en los tubos de escape de los vehículos cae a la vía y llega a los arroyos locales, donde influye en la disponibilidad de nutrientes para las plantas en el suelo, afecta la composición de las especies vegetales cercanas y contribuye a la contaminación de los sistemas acuáticos, de manera potencial a distancias mucho mayores. En la mayoría de las zonas rurales las vías con bajo volumen de tráfico suelen estar libres de emisiones nocivas. Sin embargo, en el caso de algunas

vías rurales, como las asociadas a minas o pozos activos que pueden experimentar un tráfico intenso y periódico de camiones, estos contaminantes son un problema que requiere de atención y mitigación.

Los administradores de vías aplican productos químicos (p. ej., sal) a las vías para mantener unas condiciones de conducción seguras, para controlar el polvo y, en climas fríos, para derretir el hielo y la nieve. Una parte importante de la sal de la vía (entre el 20 y el 63% en un estudio sueco) se desprende de la vía y se deposita en las proximidades. Numerosos estudios describen los efectos medioambientales de la sal de vía, pero el impacto varía de un lugar a otro en función de factores locales como la temperatura y las precipitaciones, la topografía, el drenaje de la vía y la cantidad de sal aplicada. Además del daño físico de las hojas, la sal de la vía también inhibe el crecimiento de las plantas al modificar el estrés osmótico, lo que reduce su capacidad de absorber agua. La sal de la vía se disuelve en el agua y se filtra en el suelo, donde cambia su estructura, disminuyendo la permeabilidad y la aireación, alterando la química del suelo y aumentando el pH. La escorrentía superficial transporta la sal disuelta a los lagos y ríos cercanos, donde aumenta las concentraciones de sodio y cloruro. Los aditivos de la sal de vía son tóxicos para muchas especies de plantas y animales que viven en estos ecosistemas acuáticos y pueden alterar las cadenas tróficas acuáticas. Bajo la superficie, las aguas subterráneas cargadas de sal de vía han llegado a contaminar suministros de agua potable. La sal de vía es corrosiva para el hormigón y las estructuras metálicas, y degrada las infraestructuras de puentes y vías, liberando y aumentando la movilidad de metales pesados.

## Efectos hidrológicos y atmosféricos

Las vías cambian el flujo de aire y agua, y estos cambios afectan el ambiente. En las zonas rurales las vías y el tráfico interactúan con las cuencas hidrográficas y las cuencas atmosféricas, causando una serie de efectos que se originan en la vía y que se extienden al aire y al paisaje circundantes, a veces a cientos de metros. Como se ha descrito con anterioridad, las sustancias químicas

asociadas a las vías y su tráfico se combinan con la acción del viento y el agua para extender los impactos biogeoquímicos hasta a 50 metros de distancia del borde de la vía, o incluso mucho más lejos, dependiendo del terreno y de los vientos predominantes.

Las superficies de las vías y los sistemas de drenaje afectan al movimiento de las aguas superficiales y subterráneas a través del paisaje, alterando los sistemas acuáticos locales y regionales. La superficie semi impermeable de la vía y de los sistemas de drenaje de aguas pluviales actúan como conductos para sacar el agua de la superficie de la vía lo más rápido posible, agua que de otro modo, se infiltraría para reponer las reservas de agua subterránea y ser utilizada por las plantas, para regresar después a la atmósfera a través de la evapotranspiración. La canalización veloz del agua hacia los arroyos y otras masas de agua, da lugar a mayores caudales máximos e inundaciones asociadas. El rápido desplazamiento del agua hacia las zanjas de drenaje de las vías que ocupan un área relativamente pequeña en comparación con toda la superficie de la vía, crea condiciones más húmedas en el suelo de la zanja y cerca de ella, las cuáles se hacen evidentes en especial en los entornos semiáridos y áridos, donde las especies de los humedales aprovechan la mayor disponibilidad de agua y el crecimiento de plantas es más exuberantes. La erosión de los caminos sin pavimentar en zonas agrícolas y forestales, que se usan sobre todo para trasladar la maquinaria de estas actividades y los productos cosechados, provoca sedimentación aguas abajo. Los finos sedimentos producidos en los bordes de las vías reducen la claridad del agua, cambian la forma en la que fluye y aumentan su temperatura, cambiando a su vez el hábitat acuático y haciendo que los arroyos rurales más pequeños sean menos habitables para especies acuáticas como la trucha o el salmón, que requieren arroyos fríos y claros con sustratos de grava. Las cuencas con mayor densidad de vías experimentan más flujos de sedimentos y escombros cuando el relleno de la vía se erosiona o se desliza hacia los arroyos cercanos. Las redes de vías que parten las cabeceras de cuencas rurales pueden afectar la resiliencia de las comunidades de plantas y animales acuáticos debido a los cambios en las redes de los arroyos y

a la intensidad de los picos de inundación causados por las vías.

En los lugares donde las vías se cruzan con redes de drenaje o corren en paralelo a los ríos de los valles, los puentes, alcantarillas y lechos asociados a las vías, alteran el flujo de agua y los sedimentos que mantienen los hábitats fluviales. De esta forma, fragmentan y degradan los ecosistemas de las llanuras de inundación y reducen los beneficios de las zonas de amortiguación ribereñas. En las zonas de bajo relieve, como la cuenca del Amazonas o el sureste de EE.UU., los puentes y las alcantarillas limitan el flujo de la corriente, lo que provoca un aumento de la velocidad que draga los lechos de los arroyos. Además, las vías sobre calzadas interrumpen el flujo laminar del agua a través de grandes áreas, provocando condiciones más húmedas aguas arriba de las vías y más secas aguas abajo. Este es el caso de la ruta Tamiami (US 41) que atraviesa los Everglades (Cañaverales) en el sur de Florida y en donde en el último siglo, este tipo de cambios han alterado tanto los procesos ecológicos claves, como los patrones de incendios, los flujos de nutrientes y el desplazamiento de los animales. En la actualidad hay grandes planes para restaurar los Everglades, que incluyen modificaciones de la ruta de Tamiami para restaurar el flujo hídrico y la conectividad ecológica mediante la construcción de caminos elevados. Cuando el terreno es más accidentado, como en las regiones montañosas del mundo, es más probable que las vías circulen paralelas a los canales de los arroyos y ríos en los valles. Allí las vías pueden formar una barrera entre el canal del arroyo y las zonas de la llanura de inundación que corren paralelas a él, impidiendo que el agua se desplace hacia estas zonas típicamente inundables, alterando los patrones históricos de inundación ribereña. Las vías y su tráfico afectan la atmósfera local creando un microclima que se disipa más allá de la vía. Al reemplazar la vegetación por suelo desnudo o el pavimento, las vías alteran la temperatura, humedad, cantidad de radiación solar entrante, reflectancia de la luz y velocidad del viento del área de impacto directo. Como la mayoría de las vías son más abiertas y más edificadas que sus alrededores, sus microclimas tienden a ser más calurosos durante el día (más frescos por la noche), más secos, más luminosos

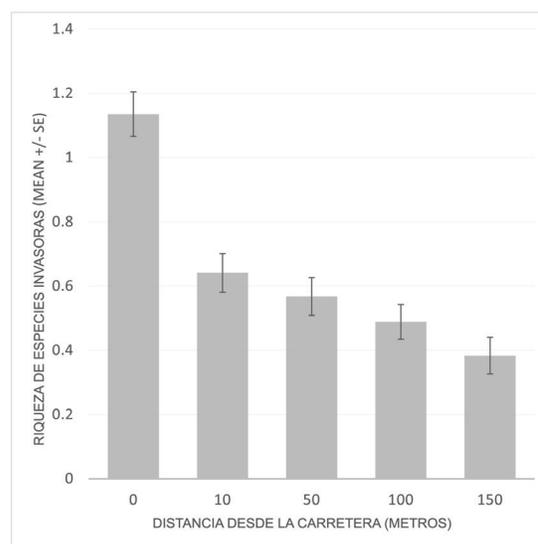
y más ventosos que los de las zonas adyacentes. Las condiciones específicas varían según la región, la estación, la hora del día y el diseño de la vía. Por ejemplo, a lo largo de una vía sin asfalto en la Amazonia central brasileña, como consecuencia de una mayor turbulencia del aire cerca de la vía, las tasas de transpiración de los árboles cercanos a ella han sido más altas que la de los árboles más alejados. Además, este "efecto de borde" se extendió más y a mayor distancia de la vía durante el período seco, que durante el período húmedo. Aunque los efectos de las vías en los microclimas pueden ser significativos a nivel local, sus efectos acumulativos a escalas más grandes aún no están claros. No sabemos por ejemplo, a lo largo del tiempo, cómo los cambios microclimáticos causados por las redes de vías afectan las condiciones del suelo, la producción forestal, y la biodiversidad a escala regional y de paisaje. Mientras que las vías en sí mismas son elementos estructurales que alteran el flujo de agua y aire, el movimiento de los vehículos a lo largo de las vías levanta polvo que afecta la calidad del aire. El tráfico en las vías rurales suele ser escaso y muchas de ellas no están asfaltadas. El "polvo fugitivo" del tráfico en las vías no pavimentadas tiene una serie de impactos sobre la salud y la ecología, especialmente a los primeros 20 metros de distancia de la vía. Este material particulado causa: problemas respiratorios; hace que la nieve cerca de las vías sea menos reflectante y que se derrita más fácil; reduce la productividad de las plantas al recubrir las hojas; y proporciona superficies a las que se adhieren los contaminantes, que acaban depositándose a favor del viento o río abajo.

## Efectos sobre las especies invasoras

La asociación entre las vías y las especies invasoras está bien establecida y documentada. La densidad global de las vías está asociada a la presencia de especies invasoras y la prevalencia de especies exóticas es generalmente mayor a lo largo de las vías que lejos de ellas (Figura 7). Las vías crean un hábitat más favorable para las especies invasoras al proporcionar espacios de luz, corredores de dispersión

y una menor competencia. En algunos casos, las especies exóticas, plantadas deliberadamente a lo largo de las vías para estabilizar el suelo, se suman al número de plantas invasoras a lo largo de las vías.

Las semillas de las plantas se adhieren a las superficies y neumáticos de los autos, camiones y equipos utilizados para el mantenimiento periódico de las vías, lo que significa que las especies de plantas invasoras tienden a dispersarse más rápido a lo largo de las vías rurales. Por ejemplo, la Scotch Broom, traducida al español como la retama de escobas (*Cytisus scoparius*), que en su momento se plantó para estabilizar los suelos a lo largo de las vías en el oeste de EE.UU., prolifera ahora en sus bordes, superando a la vegetación autóctona y considerándose invasora (Figura 8).



La mayoría de las redes de vías rurales están sin pavimentar y la cuestión de si la pavimentación influye o no en la propagación de las especies invasoras se ha abordado en pocos estudios. Un estudio sobre la abundancia de *Ambrosia spp.* descubrió que se extendía y establecía más fácilmente cerca de las vías pavimentadas que de las no pavimentadas. En el caso de las vías pavimentadas, los estudios suelen encontrar una mayor biomasa de plantas invasoras adyacentes a las vías en comparación con las plantas encontradas a mayor distancia de éstas; este patrón es menos pronunciado en las vías no pavimentadas. Estos estudios sugieren que la pavimentación de un camino rural favorece la propagación de algunas especies invasoras. Sin embargo, todas las

**Figura 7.** La riqueza de las especies invasoras disminuye en relación con la distancia a la vía, un resultado común de muchos estudios de ecología vial o de plantas invasoras. Los resultados mostrados proceden de los datos publicados en un estudio de Mortensen, D.A., Rauschert, E.S.J., Nord, A.N., y Jones, B.P. 2009. Forest Roads Facilitate the Spread of Invasive Plants, *Journal of Invasive Plant Science and Management* 2: 191-199.

**Figura 8.** Scotch Broom o retama de escobas en un paisaje de Oregón, tras extenderse desde una vía cercana. Foto: Eric Coombs, Departamento de Agricultura de Oregón.

[Bugwood.org](http://Bugwood.org)



redes de vías rurales proporcionan acceso a zonas remotas, lo que crea oportunidades para la reintroducción de estas especies, contribuyendo a su proliferación.

Aunque los estudios sobre las conexiones entre las vías y las especies invasoras se han centrado principalmente en las plantas, las vías también influyen en la dispersión y redistribución de animales no autóctonos y patógenos. En el sureste de EE.UU., las hormigas rojas de fuego (*Solenopsis invicta*), una especie exótica, se encuentra comúnmente en los hábitats de las vías. En Australia los sapos invasores de la caña (*Rhinella marina*) se dispersaron a lo largo de los bordes de las vías: cuanto mayor es la densidad de las vías, mayor son las poblaciones de sapos de la caña. En EE.UU. los insectos invasores como el Emerald Ash Borer que al español se traduce como barrenador esmeralda del fresno (*Agilus planipennis*) y patógenos no autóctonos como las raíces mohosas de cedros, se propagan a través de los vehículos que circulan por las vías rurales. De forma menos directa, cuando se construyen vías que atraviesan zonas remotas, las enfermedades infecciosas (p. ej., los patógenos diarreicos) se propagan con mayor facilidad cuando los cambios en el entorno, que están relacionados con las vías, se combinan para crear las condiciones para una mayor transmisión.

Estas condiciones incluyen la alteración en los patrones de drenaje de las cuencas hidrográficas, usos de la tierra más intensivos y con mayor contacto entre humanos, así como con la vida silvestre, y poblaciones humanas más densas acompañadas de una infraestructura de saneamiento inadecuada.

## Efectos sobre la vida silvestre

Las vías afectan la vida silvestre de muchas maneras, actuando de manera directa cuando se fragmentan las poblaciones y de manera indirecta cuando inducen cambios en el comportamiento de los animales. Son cuatro los mecanismos principales por los que las vías afectan a las poblaciones de fauna silvestre, éstos incluyen:

- i. disminución de la superficie de hábitat, fragmentación de la superficie restante y reducción de la calidad del hábitat en las zonas adyacentes;
- ii. aumento de la mortalidad causada por las colisiones de vehículos;
- iii. reducción de la conectividad del paisaje, porque las vías actúan como barreras (p. ej., algunos animales evitan las vías y no las cruzan) interrumpiendo algunas veces las rutas migratorias estacionales; y
- iv. subdivisión de las poblaciones en subpoblaciones más pequeñas y vulnerables.

Para apreciar el modo en que estos cuatro mecanismos afectan a la vida silvestre, debemos reconocer que algunos de ellos influyen de forma inmediata y otros actúan en periodos de tiempo más largos. El efecto de la pérdida de hábitat es casi inmediato, la reducción de la calidad del hábitat y la mortalidad por tráfico pueden llevar más tiempo, y la reducción de la conectividad aún más. Los sistemas de vías también afectan a la fauna a diferentes escalas, desde el individuo hasta las zonas locales donde muchos individuos de la misma especie forman un grupo (población), y hasta regiones donde viven múltiples poblaciones de especies. Además, los impactos de las vías recién descritos (p. ej., biogeoquímicos e hidrológicos) también pueden afectar a la fauna. Aunque es menos común, los bordes de las vías a veces son el hábitat de ciertas especies y como se ha mencionado, las vías son vectores de especies invasoras.

La fragmentación del hábitat causada por la presencia de vías con alto tráfico aumenta la relación borde a interior de los parches de hábitat, lo que a su vez puede perjudicar a las especies que necesitan grandes bloques

de hábitat o redes de parches de hábitat unidos por corredores de desplazamiento. Un problema clave de la fragmentación del hábitat es que puede aislar a grupos de animales, impidiendo que se reproduzcan, reduciendo el flujo genético y disminuyendo sus posibilidades de persistencia. El uso de la genética en la ecología vial, aunque hasta ahora se ha subutilizado, es muy prometedor para ayudar a los investigadores a entender los efectos de las vías en las poblaciones de animales. En Australia, por ejemplo, tras analizar los datos genéticos de la ardilla planeadora (*Petaurus norfolcensis*), los investigadores descubrieron que a los cinco años de construcción de una estructura de cruce de vías, se restableció eficazmente el flujo genético de la población, cuando habían observado con anterioridad una barrera al flujo genético.

Las vías actúan como barreras pero también pueden actuar como filtros, porque algunos individuos o especies las evitan, mientras que otros no. Un ejemplo son el topillo de las praderas (*Microtus ochrogaster*) y la rata cañera o rata algodónera (*Sigmodon hispidus*), que en EE.UU. eran incapaces de cruzar vías de tres metros de ancho. El comportamiento de evitar las vías varía mucho según la especie y depende de los rasgos físicos del animal, de las elecciones del individuo, de su capacidad para moverse en el paisaje y de la densidad de su población. El momento en que se produce el tráfico es claramente un factor que determina si un individuo va a cruzar una vía. Por ejemplo, el lince rojo o gato montés (*Lynx rufus*) y los coyotes (*Canis latrans*) observados en el sur de California cruzaron las vías para llegar a parches dentro de sus áreas de distribución, en momentos en los que los niveles de tráfico eran bajos. De manera adicional, las características de las vías son importantes para muchos de los animales que las cruzan. Las investigaciones en pumas (*Puma concolor*), una especie gregaria de amplia distribución, demostraron que los felinos cruzaban con más frecuencia los caminos de tierra no mejorados, que los caminos asfaltados o de superficie dura. La medición de la respuesta de los animales a las vías y su tráfico es un área importante de investigación en la ecología vial. Haciendo uso de la telemetría, en el oeste de EE.UU. varios estudios han examinado los

movimientos de los animales para controlar su comportamiento en relación con las vías y el tráfico. Durante las migraciones anuales, el venado burra o ciervo mulo (*Odocoileus hemionus*) experimentó mayores tasas de mortalidad en los cruces de vías y el ciervo canadiense (*Cervus canadensis nelsoni*) evitó los vehículos todoterreno (Estudio de caso 1). En la misma región por medio de dispositivos de seguimiento GPS se observó que el urogallo de Gunnison (*Centrocercus minimus*) evitó las vías; el estudio trazó sus movimientos en relación con los vehículos que circulaban y los lugares de lek o zonas de cría conocidas (Estudio de caso 2, Figura 9).

Un debate no resuelto en la ecología vial se centra en el perjuicio relativo que supone para la fauna el cercado vs no cercado de las vías o el uso de otras tecnologías como reflectores de advertencia para la fauna silvestre, destinados a interrumpir el movimiento de los animales en las vías durante la noche cuando hay vehículos. Las investigaciones explican los diferentes tipos de compensación entre éstos, así como las razones por las que determinados enfoques pueden ser apropiados en distintas situaciones (p. ej., pequeñas vías rurales vs. vías de alto tráfico). La interrupción del movimiento de los animales con cercas



reduce las colisiones con los coches, pero éstas también interfieren en la conectividad del hábitat. La pregunta central del debate es: ¿bajo cuales condiciones los efectos de aislamiento causados por las interrupciones de la conectividad, debidas a las barreras para el cruce de animales, son peores que los efectos de la mortalidad animal causada por las colisiones de vehículos? Aquellos que consideran que las colisiones son peores, señalan las consecuencias inmediatas de la

**Figura 9.** Imagen fija del vídeo (Código QR abajo) que muestra el seguimiento simultáneo del tráfico de vehículos en relación al movimiento de dos individuos de urogallo. La imagen en color falso muestra un paisaje de Colorado, con líneas negras como vías, delineando en naranja los sitios conocidos de lek y como puntos azules los sitios potenciales de lek. La línea verde indica un pulso monitoreado del tráfico de la vía.



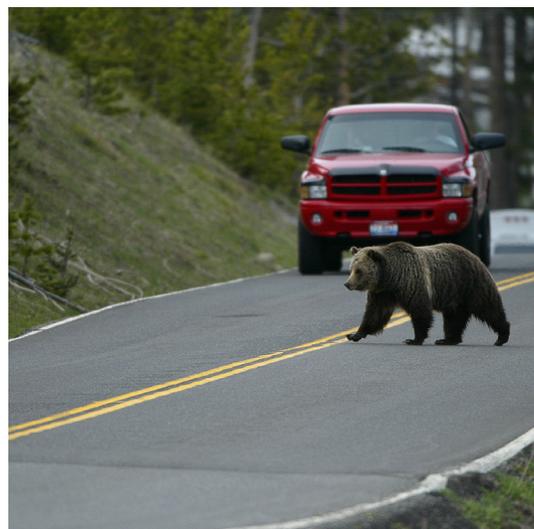
mortalidad y sugieren, que de manera ideal, las vallas deberían utilizarse junto con pasos de fauna para mejorar el efecto barrera. Además, subrayan que si las vías no están cercadas, las colisiones entre animales y vehículos continuarán, lo que hace que las poblaciones disminuyan, independiente de que estén conectadas a través de la vía. Aunque son muy efectivos en relación a su costo, los reflectores de advertencia de vida silvestre son objeto de debate, pues estudios anteriores mostraron que no reducían las colisiones entre animales y vehículos. Sin embargo, un análisis reciente de este trabajo sugirió que la investigación no tuvo en cuenta los factores de confusión y se realizó usando una variedad de métodos; por tanto, es necesario incluir más enfoques de investigación y metodologías estandarizadas para evaluar su eficacia. La importancia relativa de una solución potencial sobre otra, depende en gran medida del comportamiento de las especies focales en cuestión, la cantidad de tráfico y la naturaleza de la gestión de la zona de la vía (privada o pública). En zonas rurales con volúmenes bajos de tráfico (menos de 300 vehículos al día) puede que no se justifique el gasto de implementación de estructuras de cruce de vías y vallas, aún así un volumen de tráfico de 300 vehículos al día, es significativo para algunas especies. Esto podría ocurrir con facilidad durante las épocas de migración de anfibios a través de una vía rural, aún con volúmenes de tráfico mucho más bajos. Incluso en ese caso, estrategias como el cierre temporal de vías rurales durante periodos críticos, podrían ser más adecuadas. En el caso de vías rurales pequeñas, la investigación destinada a resolver estas preguntas no se ha desarrollado a plenitud.

En algunas zonas, las vías forestales han dejado un legado de acceso humano no gestionado a regiones remotas, con graves consecuencias para las poblaciones de fauna. Este problema se ha visto acentuado en especial en regiones tropicales, donde las vías facilitan el acceso a los cazadores furtivos de grandes mamíferos. En África Central las vías han sido uno de los principales motores de la caza furtiva de elefantes y del consiguiente descenso de sus poblaciones; y los proyectos de desarrollo de vías previstos pueden reducir los beneficios económicos del ecoturismo. Los carnívoros grandes son muy sensibles

a los efectos de las vías en zonas remotas (Figura 10) porque tienden a evitar tanto la vía como las zonas cercanas a ella, por tanto, se ven afectados en la reducción de la superficie del hábitat viable. Al igual que ocurre con los elefantes, los carnívoros sufren un aumento de la caza furtiva en los lugares donde las vías permiten el acceso de los cazadores. Un estudio reciente modeló la viabilidad de las poblaciones de carnívoros en todo el mundo, revelando que un gran número de ellos está expuesto a los efectos negativos de las vías. Los modelos que combinaron la densidad de las vías y el hábitat disponible con los rasgos de las especies (p. ej., la tasa de crecimiento de la población), mostraron que muchas especies, entre ellas el lince ibérico (*Lynx pardinus*), el tejón japonés (*Meles anakuma*) y la marta japonesa (*Martes melampus*), están muy expuestas a las vías y es posible que se vuelvan muy escasas o desaparezcan en las próximas décadas.

Aunque para la mayoría de las especies nativas las vías suponen un reto para sus individuos y poblaciones, algunas especies se benefician. Un ejemplo son los tendidos eléctricos y las vallas que a menudo acompañan a las vías, y que su vez proporcionan nuevos parches para una gran variedad de aves rapaces. Las especies que se alimentan de carroña pueden beneficiarse también de las colisiones entre animales y vehículos al comer los restos. Sin embargo, esta dinámica es un arma de doble filo cuando estos mismos individuos se arriesgan a ser atropellados por los vehículos. Resultados de un estudio reciente

**Figura 10.** Oso cruzando una vía en Montana, EE.UU.  
Foto: Doug Ouren, US Geological Survey.



que modeló la respuesta de la población animal a los cambios en la densidad de las vías, mostró que en el caso de los animales atraídos por los recursos de las vías, un aumento en la densidad de éstas no necesariamente aumenta su población. Cuando la abundancia de una especie aumenta en zonas con mayor densidad de vías debido a la falta de depredadores, se produce un “efecto agravador”, también conocido como “liberación de depredación”. Esta es la situación del venado cola blanca (*Odocoileus virginianus*) en el este de EE UU, en donde la falta de grandes carnívoros ha permitido que las poblaciones de venados aumenten, lo que a su vez afecta de manera negativa la diversidad y el rejuvenecimiento de los árboles y plantas del sotobosque, que componen los bosques donde ellos viven, además de aumentar la frecuencia y el costo de las colisiones entre venados y vehículos.

En resumen, los efectos de las vías tienden a ser generalmente negativos para la fauna, actuando como barreras o filtros, reduciendo su hábitat disponible y causando su muerte por colisiones con vehículos. Estos impactos sobre la fauna repercuten en el espacio, desde una escala local hasta una regional, y en el tiempo, de una escala inmediata a una generacional. Esta combinación de tiempo y espacio significa que las vías pueden afectar profundamente la capacidad de supervivencia de la fauna silvestre, tanto a nivel individual como de población y en última instancia, de especie.

## Paisaje y Efectos regionales

Debido a que las vías son redes, sus efectos ecológicos se extienden a través de amplias zonas y causan efectos acumulativos que no pueden ser descritos correctamente si solo se analiza un solo segmento de una vía. Adoptar una perspectiva paisajística de los efectos de las vías le permite a los científicos abordar el problema de forma más holística. Esta perspectiva requiere que los investigadores presten atención a aspectos más amplios de los sistemas de vías que estudian, como los usos del suelo adyacentes, las características del tráfico y las conexiones, así como la disposición espacial de la red de vías en general. Estas consideraciones constituyen la base de una teoría ecológica de la red vial, que se basa en los campos de la ecología

del paisaje y la geografía del transporte. La ecología del paisaje puede utilizarse para cuantificar diversos aspectos ecológicos de los paisajes y las regiones. Para medir los efectos acumulados del desarrollo vial a lo largo del tiempo, los investigadores utilizan numerosos indicadores que describen cómo va cambiando el paisaje de acuerdo al tamaño y forma de áreas que no tienen vía, así como a la cantidad de superficie sin vía. Por ejemplo, un estudio realizado en el norte de Wisconsin (EE.UU.), a lo largo de un período de 50 años de desarrollo, demostró que el tamaño de las zonas sin vías disminuía y la forma de éstas se volvía más regular a medida que aumentaba la densidad de las vías. De la misma manera, investigadores en la cuenca del Congo desarrollaron una herramienta estadística para medir el espacio sin vías y descubrieron que, con el tiempo, todas las zonas de concesiones madereras perdían espacio, mientras que las zonas de parques nacionales no lo hacían. Sin embargo, este estudio se limitó a áreas protegidas y concesiones madereras, por lo que aún carecemos de información sobre una parte mayor del paisaje que no entra en ninguna de esas categorías. Dado que los sistemas de vías fragmentan el paisaje, los indicadores que miden los niveles de conectividad a escala de paisaje y a escala regional son útiles para modelar, medir y describir las interacciones entre las vías y el paisaje. Incluso mediciones simples de la densidad de las vías y de la distancia a éstas pueden ayudar a establecer los niveles previstos de los efectos ecológicos en una región determinada.

A medida que las vías se desarrollan en las regiones provocan cambios en la cobertura del suelo, sin embargo la aparición de las vías es el resultado de los cambios en el uso del suelo. En las últimas décadas los estudios centrados en la deforestación tropical han constatado repetidamente que el desarrollo de las vías es uno de los factores clave en los patrones predecibles de transformación de la tierra. En muchas situaciones de frontera, el desarrollo de las vías está vinculado a la minería y la silvicultura. Cuando la tierra está mal vigilada y la protección legal es prácticamente inexistente, las vías construidas por razones legítimas, como el acceso a puertos nacionales, se convierten en conductos para actividades ilícitas como

la minería ilegal, la extracción de madera y la caza furtiva. La minería ilegal, por ejemplo, se produce cuando los controles gubernamentales sobre una zona son débiles y los individuos o comunidades explotan informalmente sin permisos, provocando cambios en los patrones de asentamiento y el uso de la tierra en zonas remotas. Con el tiempo, a medida que el costo del transporte disminuye, la región se vuelve más atractiva para los agricultores y ganaderos, y los bosques o praderas dan paso a la agricultura, extendiéndose a cientos de metros de la vía. En consecuencia, las vías se construyen para facilitar el acceso a terrenos de uso más intensivo y en última instancia se

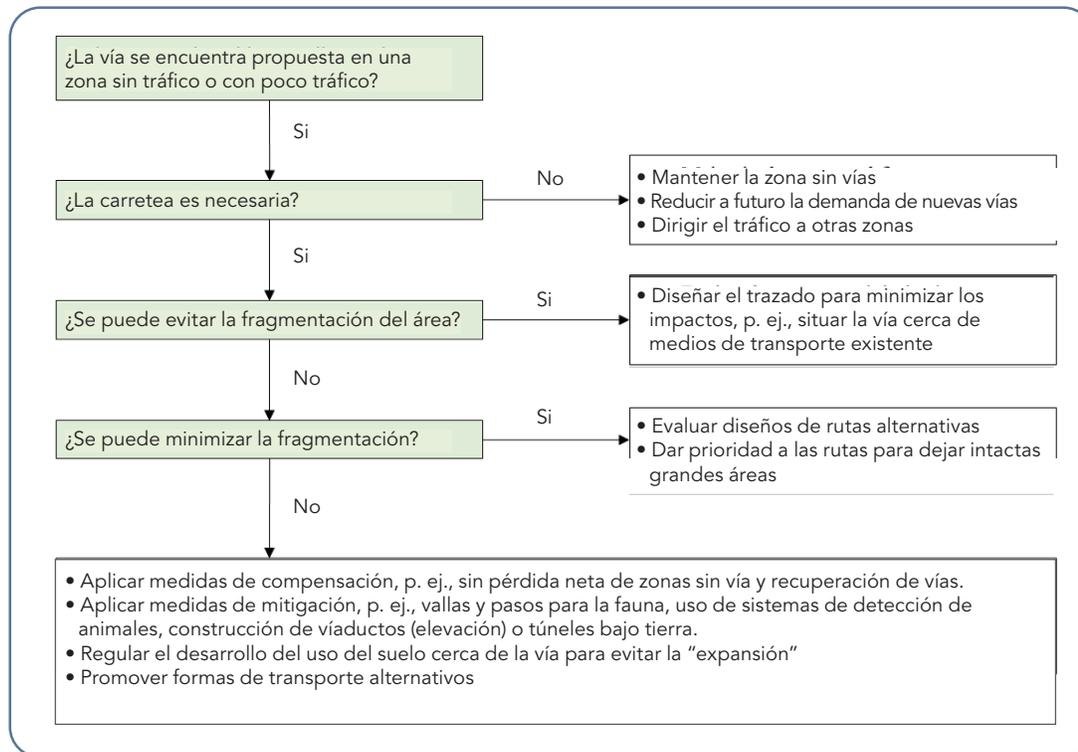
transforma todo el paisaje. En la cuenca del Amazonas donde la deforestación se observa desde hace tiempo, una combinación de la postura política de los gobiernos y sus políticas económicas han impulsado esta transformación destructiva.

## DECISIONES Y ACCIONES: POLÍTICA Y MEJORES PRÁCTICAS PARA LAS VÍAS RURALES

A medida que la investigación sobre la ecología vial sigue desarrollándose, las políticas de transporte incorporan cada vez más los principios de la ecología del paisaje y la gestión adaptativa en las directrices para el desarrollo y la gestión de las vías. Los planificadores y gestores del transporte disponen cada vez de más recursos sobre la ecología vial, desde artículos científicos que aportan preguntas para la reflexión (figura 11), hasta manuales y guías. Sin embargo, gran parte de los últimos conocimientos adquiridos sobre los efectos acumulativos de las vías en las poblaciones de plantas y animales, aún no se han incorporado a las decisiones políticas, ni tampoco se han traducido en acciones, especialmente aquellos conocimientos o conceptos que se producen a escalas espaciales y temporales más amplias. Dado que la política vial existe a nivel nacional, subnacional y local, la incorporación de los conocimientos de la ecología vial a la política y a la práctica requiere del compromiso de una gran

cantidad de diversas instituciones. Cuando esas instituciones carecen de recursos o de la suficiente capacidad para funcionar con eficacia, la tarea es mucho más difícil. En países tropicales y subtropicales, las grandes redes de vías rurales se combinan con zonas de gran concentración (*hotspots*) de biodiversidad, esto puede ser visto como una de las oportunidades más estratégicas de mitigación de “alto rendimiento”, en las que medidas relativamente sencillas para evitar o corregir los impactos negativos de las vías, pueden suponer un cambio significativo para la conservación. Sin embargo, estas áreas a menudo se tratan de lugares en los que la gobernanza funciona con una capacidad limitada y las instituciones centralizadas de control están muy alejadas de las zonas de construcción de las vías. Es por esto que la adopción de la ecología vial en las políticas de planificación y gestión está menos desarrollada.

Esta situación subraya la importancia de la aplicación de MPG ecológicas para el desarrollo de las vías en estas regiones.



**Figura 11.** Cuatro preguntas centrales que hay que plantearse al planificar un proyecto vial en zonas sin vías o con poco tráfico. (Fuente: adaptado de Selva Et al. 2015. "Why Keep Areas Road-Free? The Importance of Roadless Areas" en eds R. van der Ree, D. J. Smith, y C. Grilo. *Manual of Road Ecology*. John Wiley & Sons).

## Enfoques políticos en Estados Unidos y la Unión Europea

Los ejemplos más notables de políticas viales y ordenamiento territorial que aprovechan la ciencia de la ecología vial se da en los países industrializados, incluido EE.UU y la UE, con los cambios más recientes a su política vial. A lo largo de la historia las políticas de gestión del transporte rural no han tenido en cuenta una dinámica más amplia a escala del paisaje, relacionada con los efectos ecológicos acumulativos del desarrollo y uso de la red de vías rurales. Los procesos típicos de toma de decisiones basados en proyectos a escalas pequeñas, generan afecciones graduales y alteran de manera acumulativa los paisajes. En otras palabras, es como "una muerte causada por mil heridas". Las soluciones políticas que incorporan enfoques ecológicos del paisaje a gran escala, resultan más eficaces para gestionar los efectos espaciales difusos de las vías en procesos de los ecosistemas a escala regional o continental. Las soluciones pueden por ejemplo, dar prioridad a las zonas de conservación en las que el desarrollo de

las vías alteraría fundamentalmente los procesos ecológicos regionales, como las migraciones de animales o los patrones de inundación en toda la cuenca. La incorporación de normas ambientales en la planificación, el diseño, el desarrollo y el mantenimiento de las vías redundan en el interés público, ya que permite tener en cuenta los efectos a largo plazo de los sistemas de vías rurales en los recursos naturales y la biodiversidad. La mayoría de los organismos de desarrollo vial mantienen cierto nivel de normas ambientales en sus políticas y procedimientos. En un caso particular, la Administración Federal de Vías de EE.UU. y su iniciativa de Autopistas Sostenibles, ofrece numerosas publicaciones y herramientas para ayudar a los planificadores viales en el desarrollo de autopistas y vías. A pesar de ello, en EE.UU. organismos gubernamentales a nivel estatal, de condado y municipal, también son responsables de las políticas de vías rurales y pueden aplicar sus propias normas, lo que a veces crea procesos de toma de decisión complejos y de varios niveles. A nivel mundial la magnitud en la que las normas usadas por los departamentos viales han integrado de manera efectiva las soluciones de la ecología vial, es aún una pregunta abierta, pues no existe ninguna revisión

exhaustiva de las normas. Por lo tanto, se trata de un área de investigación valiosa y de gran potencial.

El Servicio Forestal de EE.UU (USFS por sus siglas en inglés) gestiona extensas áreas de tierra que incluyen miles de kilómetros de vías rurales de bajo volumen. A finales de la década del 90, debido al aumento en el uso del suelo del USFS con fines recreativos, así como de una insuficiente financiación para mantener el sistema de vías existente y un creciente conjunto de pruebas científicas sobre los impactos ecológicos de las vías, el USFS dirigió su atención a la política de gestión vial. En 2001 el USFS publicó la "Roadless Area Conservation Rule" (Norma de Conservación de Áreas sin Vías), que cambió de manera fundamental su antigua orientación de gestión de aproximadamente 58,5 millones de hectáreas (236,7 mil km<sup>2</sup>), que corresponden al área inventariada sin vías, lo que sería un tercio del sistema nacional federal de bosques y praderas. En lugar de gestionar el desarrollo de vías, a través de planes de gestión de tierras independientes para cada bosque nacional, la norma abarca todo el sistema de tierras gestionadas por el USFS y prohíbe en mayor medida la construcción y reconstrucción de vías, así como el aprovechamiento de la madera en zonas inventariadas sin vías. Pero más de una década de litigios puso en tela de juicio la aplicación de la norma, y durante ese periodo un proceso de petición dirigido por los entes de control estatales dio lugar a dos normas estatales (Colorado e Idaho) con mayor flexibilidad que la de la norma original, que estaba llena de prohibiciones. En la actualidad se ha aprobado una norma para el bosque nacional de Tongass (Alaska), que lo exime de la norma de áreas sin vías del 2001. Pero desde el 2012 la norma sigue siendo Ley en el país y aplica para la mayoría de los estados. \*\*

Otra política del USFS que mitiga el impacto de las vías y que pretende reducir los costos en aumento y relacionados con el

mantenimiento de las vías, es la Norma de Gestión de Viajes del 2005. Ésta norma frena el acceso motorizado sin restricciones, designando cuándo y dónde está permitido el uso de vehículos motorizados. En el pasado el uso de vehículos motorizados era ilimitado dentro de los bosques nacionales, esto dio lugar a la proliferación de rutas creadas por los usuarios, que llegaron a ser decenas de miles de kilómetros en todo el país, aunque no existe un inventario definitivo. En resumen, la norma ofrece una forma de encontrar oportunidades para reducir el número total y la longitud de las vías abiertas, lo que no es insignificante dado que el USFS gestiona más kilómetros de vías que cualquier otra entidad del país.

En la UE son pocas las iniciativas que restringen de manera específica el desarrollo de las vías en zonas naturales o que pretenden proteger zonas sin vías o con poco tráfico. La política de conservación de la UE se basa principalmente en la red Natura 2000. Consta de "Zonas de Protección Especial" y "Zonas Especiales de Conservación", según la "Directiva de Aves" y "Directiva de Hábitats", respectivamente (79/409/CEE y 92/43/CEE).

Sin embargo, una gran proporción de los espacios Natura 2000 están situados en las proximidades de grandes infraestructuras de transporte o de manera potencial podrían verse afectadas por futuros desarrollos de la red europea de transporte, debido a que el nivel de las normas de protección es a menudo demasiado débil para evitar una mayor fragmentación del hábitat, como han demostrado varios ejemplos recientes. Muchos instrumentos legales en Europa tienen como objetivo la protección de la conectividad de los hábitats de la vida silvestre, los procesos de los ecosistemas o la integridad de los mismos; pero ninguno considera hoy las áreas sin vías o de bajo tráfico como un objetivo de conservación.

En los últimos años la política de la UE ha

\*\*El primero de octubre del año 2012, el Tribunal Supremo se negó a revisar la decisión del Tribunal de Apelación del Décimo Circuito, de mantener la norma original del 2001. La norma no se aplica necesariamente en Idaho y Colorado, donde las normas específicas del estado se finalizaron en 2008 y 2012, respectivamente, en virtud del proceso de petición estatal. El 29 de octubre del 2020, el USDA adoptó una norma específica por la que se exime al Bosque Nacional Tongass de la norma de áreas sin vías del 2001 ([www.federalregister.gov/d/2020-23984](https://www.federalregister.gov/d/2020-23984)). Para más información: <https://www.fs.usda.gov/roadmain/roadless/home>.

pasado de la protección de especies y hábitats, a enfoques que abarcan medidas de conservación ecológica más amplias. Por ejemplo, la Ley Federal de Conservación de la Naturaleza de 2009 de Alemania estableció que “las infraestructuras de tráfico, energía y proyectos similares, se deben integrar de manera que la fragmentación, el uso del paisaje y el deterioro ecológico se eviten o se reduzcan al mínimo”. Alemania es el primer país europeo en hacer público los datos sobre la distribución y tamaño de las zonas de bajo tráfico.

La Agencia Federal Alemana para la Conservación de la Naturaleza desarrolló el concepto de áreas no fragmentadas por el tráfico (UAT) para respaldar las evaluaciones del paisaje. Las UAT son áreas de más de 100 km<sup>2</sup> que están libres de vías de mayor volumen (> 1000 vehículos/día, un volumen mucho más alto que los umbrales ecológicos descritos anteriormente), ferrocarriles, asentamientos humanos, aeropuertos y canales. El primer inventario de 2008 identificó unos 9 millones de hectáreas de UAT en Alemania, de las cuales solo una cuarta parte están protegidas por las directivas europeas. La mayoría de las zonas poco transitadas (75%) están fuera de la red Natura 2000 y por tanto quedan sin protección.

Otro ejemplo de políticas diseñadas para abordar el impacto de las vías de forma más bien amplia y holística, es la destinada a reducir la fragmentación en los Alpes suizos. El “artículo de los Alpes” de la Constitución Federal suiza (artículo 84), limita la capacidad de transporte transalpino por vía (es decir, “no debe aumentar”) y exige un cambio hacia el transporte ferroviario de mercancías. El Convenio de los Cárpatos del 2003, firmado por siete países, aborda la regulación de los impactos del tráfico y del desarrollo, y anima a las partes a desarrollar políticas de transporte sostenible. Sin embargo, en la actualidad ni en la UE ni la mayoría de las leyes nacionales, reconocen en sus políticas de conservación la importancia de las áreas con bajos niveles de fragmentación por vías. Incluso este ejemplo que acabamos de presentar, de una política que tiene en cuenta la sostenibilidad

del transporte, se enfrenta al reto de incorporar los conocimientos científicos sobre la gran dimensión de los impactos de la red mundial de vías. Para centrar la atención sobre este vacío en los marcos jurídicos, los participantes de la conferencia internacional de la Red de Infraestructuras y Ecología de Europa (IENE 2014) en el año 2014, pidieron de manera inequívoca una estrategia a nivel de toda Europa para proteger las zonas sin vías que incorpore explícitamente estas zonas “como objetivos de conservación en la política y la legislación nacional y europea”.

## Mejores prácticas para el desarrollo de vías rurales

Las directrices, estrategias específicas y soluciones de diseño para las redes de vías rurales, a las que nos referimos como un bloque de “mejores prácticas de gestión” (MPG; Cuadro 2), están en desarrollo y se codifican a diversos grados en diferentes lugares. Las instituciones encargadas de elaborar los planes de transporte son cada vez más conscientes de la existencia de mejores prácticas de gestión en la planificación, el diseño, la construcción y el mantenimiento, tanto de nuevas vías como de las existentes.

El desarrollo de la red de vías se produce en fases que comienzan con la planificación y el diseño, luego con la construcción y por último con el mantenimiento, durante el cuál se pueden incluir soluciones ecológicas. Este proceso es típico en vías nuevas y se reinicia siempre que las redes de vías existentes evolucionan para satisfacer las demandas socioeconómicas en constante cambio de una región. Algunas veces, al final las vías se terminan desmantelando, y cada vez más se someten a un proceso de restauración ecológica. En el futuro las decisiones de desmantelar ciertas vías y de no construir otras, incluirán probablemente evaluaciones de los impactos previstos del cambio climático, que pueden agravar los efectos ecológicos de una vía y su tráfico. Aunque los impactos ecológicos directos están claramente asociados a las fases de construcción y mantenimiento de una vía, la fase de planificación y diseño puede ofrecer oportunidades más rentables, para

## RECUADRO 2. MEJORES PRÁCTICAS DE GESTIÓN ECOLÓGICA PARA MITIGAR EL IMPACTO DE LAS VÍAS

Las mejores prácticas de gestión (MPG) son estrategias y acciones que pretenden ofrecer soluciones equilibradas a problemas ambientales complejos. Por lo general se trata de medidas directas, adoptadas para mejorar las actividades que en potencia serán perjudiciales en el momento en el que se produzcan, como el uso de balas de heno o vallas textiles a lo largo de los canales de drenaje para reducir la contaminación de las vías fluviales por la erosión de los sedimentos producidos durante las construcciones. Sin embargo, evitar efectos ecológicos al restringir, limitar o prohibir el desarrollo de vías, también es parte del conjunto de herramientas de MPG. Esto incluye la opción de evitar proyectos de construcción de vías con presupuestos insuficientes para seguir con el diseño, la construcción y las prácticas de gestión que incorporan medidas de mitigación y su mantenimiento. De manera típica la mitigación consiste en un enfoque de tres vertientes para abordar los impactos ambientales que incluye: la prevención, la minimización y la compensación. Este marco proporciona una forma útil de pensar en las MPG para las redes de vías. Un ejemplo común de mitigación de los efectos de las vías en la fauna silvestre es el diseño y construcción de estructuras de cruce para conectar parches de hábitat y facilitar así el paso seguro de los animales. Las estructuras son de dos tipos, tanto las que están por encima del suelo, mediante pasos elevados y vallas, como las que están por debajo de él, mediante alcantarillas con diseño especial o pasos de túneles. Otros diseños para mitigar el impacto de las vías en la fauna silvestre son: dispositivos de detección de cruces de fauna, elementos disuasorios para posarse (*perch-deterrents*) en los tendidos eléctricos y las vallas, así como la restauración de zonas muy alteradas por causa de las vías y su uso.

El informe "Ingeniería de vías de bajo volumen: Guía de Campo de Mejores Prácticas de Gestión (*Low-Volume Road Engineering: Best Management Practices Field Guide*)", de G. Keller y J. Sherar, ofrece una excelente visión general de las MPG para vías que suelen encontrarse en entornos rurales, y seguir sus "prácticas recomendadas" ofrece la mejor oportunidad de proteger los ecosistemas en estos casos. Así mismo, la Comisión Permanente de Medio Ambiente de la Asociación Americana de Funcionarios de Vías y Transportes Estatales (AASHTO por sus siglas del inglés *American Association of State Highway and Transportation Officials*) ofrece directrices para que los planificadores y diseñadores de transporte evalúen el impacto ambiental de los proyectos de desarrollo de vías. A continuación, se presenta una lista con los elementos de las MPG, extraídas de guías de campo y otras fuentes, que pueden ser aplicadas a distintas fases del desarrollo de una vía. Sin ser exhaustivas, estas listas complementan las prácticas recomendadas descritas en las fuentes mencionadas.

### 1) FASE DE PLANIFICACIÓN Y DISEÑO DE MPG

Las consideraciones ambientales deben incluirse desde las primeras fases de la planificación y el diseño de los proyectos de vías, apoyando las decisiones sobre si se van a construir nuevas vías y dónde, o si se van a remodelar las existentes. Deben realizarse evaluaciones exhaustivas que tengan en cuenta el contexto del proyecto y utilizar los principios de planificación ecológica y diseño sostenible para minimizar los efectos negativos sobre el ambiente.

#### Considerar el contexto:

- Identificar niveles cuantitativos de fragmentación o índices de zonas sin vías en el paisaje circundante (p. ej., la densidad de las vías).
- Sincronizarse con objetivos ecológicos regionales más amplios para la protección de la dinámica de los ecosistemas regionales, como la preservación y gestión de zonas de bajo tráfico o sin vías.
- Mantener los hábitats y corredores de desplazamiento de la vida silvestre, así como identificar y mantener las redes de corredores existentes.

- Evitar o minimizar la fragmentación del hábitat causada por las vías.
- Preservar las zonas intactas sin vías mediante una planificación y diseño cuidadosos, por ejemplo, "agrupando" las vías para así, agrupar los impactos que generen.

#### Utilizar métodos de planificación ecológica para apoyar las decisiones de localización y alineación de nuevas vías o de mejora o realineación de las existentes.

- Realizar inventarios de los recursos biológicos y culturales en las propuestas de derechos de paso (*rights-of-way*) y de aquellos que se podrían ver afectados en el paisaje circundante.
- Realizar la cartografía para establecer un inventario de referencia de las vías existentes.
- Analizar los conflictos existentes y potenciales entre la fauna y el tráfico, así como los problemas de calidad del agua y del aire.
- Considerar escenarios alternativos que minimicen los efectos ecológicos.
- Desarrollar e incorporar enfoques de "reducción del tráfico" que identifiquen las zonas rurales en las que se puede reducir el tráfico de la red de vías mediante su desvío hacia vías

principales, con posibilidad de disminuir o cerrar algunas vías existentes.

- Cuando se prevean impactos, establecer objetivos para su mitigación.

**Utilizar el diseño paisajístico sostenible y los principios de ingeniería para el diseño de vías. Además de las MPG publicadas, considerando lo siguiente:**

- Alinear las vías para minimizar interrupciones tales como los flujos de agua superficiales, subterráneos y de movimiento de peces.
- Crear zonas de amortiguación adyacentes a las vías para la gestión de aguas pluviales y para la atenuación del polvo y el ruido.
- Reducir el ancho de la vía siempre que sea posible para minimizar la alteración del hábitat.
- Siembra de plantas nativas para la estabilización y el mantenimiento de los bordes de las vías, evitando la introducción de plantas invasoras.
- Reducir y gestionar el flujo de aguas pluviales utilizando canales y cuencas de retención que eviten la erosión y la introducción directa de sedimentos y contaminantes en los sistemas de drenaje naturales.
- Incorporar las mejores opciones de estructuras, que faciliten el cruce seguro de la fauna, como: pasos para peces, vallas y pasos subterráneos o elevados.
- Utilizar normas de diseño e ingeniería de distancia de visibilidad, con el objetivo de reducir colisiones entre animales y vehículos, por ejemplo, el diseño de reducción de la velocidad.
- Minimizar la generación de ruido y polvo mediante la especificación de materiales de revestimiento de bajo impacto.
- Reducir el deslumbramiento y la luz excesiva con normas de iluminación de bajo consumo y pinturas reflectantes.

**2) MPG EN LA FASE DE CONSTRUCCIÓN**

Cuando se construyen vías el terreno se transforma en vínculos de transporte. Una planificación y gestión cuidadosas del proceso de construcción, puede ayudar a limitar los efectos negativos del desarrollo de las vías. Las normas de construcción de alta calidad incluyen la planificación y la mitigación de impactos relacionados con la construcción. Además de las MPG publicadas para la construcción de vías, se

debe considerar lo siguiente:

- Limitar áreas de construcción a zonas claramente identificadas dentro del derecho de paso (right-of-way).
- En zonas remotas, limitar la caza furtiva por parte de los obreros de construcción de vías, proporcionándoles provisiones suficientes y desalentando la caza furtiva.
- Incorporar medidas de control de la erosión, como vallas de sedimentación.
- Limpiar el equipo y la maquinaria de construcción de vías antes de ingresar en una zona nueva, para evitar la propagación de especies "oportunistas" invasoras.
- Incorporar planes de gestión de seguridad, incluyendo medidas de protección y respuesta ante derrames químicos.
- Minimizar la generación de polvo.
- Retirar y eliminar adecuadamente los residuos de la zona de construcción.

**3) MPG EN LA FASE DE MANTENIMIENTO Y GESTIÓN**

Las actividades de mantenimiento y gestión de las vías provocan perturbaciones crónicas en su entorno. La gestión de las MPG se centra en minimizar los efectos negativos y en adaptarse a circunstancias cambiantes. Además de las MPG publicadas para la mitigación ambiental, se deben considerar las siguientes MPG para el mantenimiento de vías:

- Después de establecer unas líneas de base bien pensadas, se deben monitorear los efectos de las vías en la vida silvestre, en las comunidades de plantas, así como en la calidad del agua y del aire, evaluando periódicamente la efectividad de las medidas de mitigación, p. ej., monitoreando si los puntos críticos de atropellamientos varían.
- Adaptar las soluciones de gestión para cumplir los objetivos ambientales según varíen las condiciones.
- Establecer especificaciones de gestión de vías, de bordes de vías y de programas de mantenimiento que perturben un poco la vida silvestre y los procesos naturales, evitando siempre que sea posible el uso de contaminantes.
- Considerar el cierre temporal o permanente de las vías en zonas críticas y durante épocas críticas (p. ej., temporadas de cría o migración), para minimizar los conflictos entre la fauna silvestre y el tráfico, y reducir así las colisiones entre animales y vehículos.

evitar o minimizar los efectos ecológicos perjudiciales. Esto es evidente en zonas rurales donde es más probable que el desarrollo, la existencia y el uso de las vías alteren o afecten a los ecosistemas.

Formular las preguntas adecuadas en la fase de planificación y diseño (figura 11) puede ayudar a orientar los procesos de decisión y planificación, para evaluar soluciones alternativas para el desarrollo de vías, evitando efectos negativos innecesarios. Si los impactos relacionados con la vía no se pueden evitar, se deben abordar entonces mediante la mitigación, aunque a veces puede ser costoso. Los diseños de vías para mitigar los efectos de la fragmentación del hábitat en la vida silvestre son cada vez más comunes, como se muestra en el documental de NOVA de 2016 "Wild Ways", producido por WGBH Boston ([www.pbs.org/wgbh/nova](http://www.pbs.org/wgbh/nova)). En las áreas protegidas, los organismos de gestión del territorio tienen mayor autoridad para promulgar planes de gestión del tráfico que limiten la circulación en las vías y pueden hacerlo de forma temporal o permanente. El seguimiento de los patrones de tráfico en las áreas protegidas es un paso fundamental para poder evaluar no sólo la eficacia de los planes de gestión del tráfico público, sino también el tráfico asociado a la propia gestión del territorio, que como se señala en el estudio de caso 3, también pueden contribuir a perturbaciones relacionadas con la vía.

## NECESIDADES DE INVESTIGACIÓN DE LA ECOLOGÍA VÍAL

La investigación en ecología vial está alcanzando nuevos niveles de madurez con mayor atención a nivel internacional. No es extraño que se preste atención a grandes impactos causados por las vías que atraviesan paisajes, en especial cuando la presencia de especies en peligro de extinción son motivo de gran preocupación. Como consecuencia del aumento en la investigación y síntesis de la ecología vial, se observa un cambio en la forma como las organizaciones están desarrollando y gestionando las vías en áreas protegidas. Por ejemplo, las agencias de tierras públicas pueden desmantelar o

cerrar temporalmente las vías, limitando el acceso de vehículos motorizados a algunas zonas para proteger especies y paisajes sensibles. Pero, aunque los investigadores han recopilado información cada vez más amplia sobre el modo en que las vías afectan al comportamiento de los animales y sus poblaciones, aún quedan muchas preguntas sin respuesta. Las más importantes son: la incertidumbre acerca de la complejidad de las interacciones entre las vías y su uso, el comportamiento de los animales y su abundancia, así como la modificación de los paisajes debido a las vías. Los investigadores buscan respuestas sobre el impacto de estos factores en las reservas genéticas, los conjuntos de especies y los procesos evolutivos de los animales a lo largo de muchas décadas. Por ejemplo, son escasas las investigaciones científicas que evalúan tanto los efectos ecológicos del cierre permanente y estacional de vías, como de los beneficios acumulados de dichas acciones. Se requieren diseños de estudio adecuados que puedan abordar estas necesidades de investigación, especialmente teniendo en cuenta los escenarios de cambio climático.

## Análisis de datos necesarios para Ecología vial rural

Los datos sobre las redes de vías y su uso por el tráfico, junto con las metodologías analíticas para medir, simular y evaluar las respuestas ecológicas a las vías, son componentes básicos de la ecología vial. Los flujos de datos de este tipo suelen ser de gran volumen y los métodos para analizarlos requieren conocimientos especializados, además de innovación y creatividad para combinarlos con claridad y rigor.

La velocidad vertiginosa a la que ha avanzado la teledetección y el análisis geoespacial, nos ha acercado mucho más de lo que estábamos hace una década de disponer de mapas de vías precisos y de extensión adecuada, que son esenciales si queremos cuantificar los efectos ecológicos de las vías. Para los estudios de áreas grandes, hay nuevas y prometedoras tecnologías cartográficas que utilizan métodos como la detección automatizada y el "crowd sourcing" (colaboración abierta distribuida o externalización abierta de tareas) para recopilar y proporcionar gratuitamente datos

viales a escala más detallada en extensiones espaciales sin precedentes (p.ej., [www.openstreetmap.org](http://www.openstreetmap.org)). Aunque sigue siendo difícil encontrar mapas completos, bien documentados y precisos de las redes de vías rurales, el “terreno” de la cartografía de vías ha cambiado drásticamente en los últimos años. El establecimiento de sistemas globales de navegación por satélite, así como la proliferación de servicios celulares de bajo costo en zonas rurales del mundo entero está haciendo posible localizar vías remotas con la precisión adecuada, acelerando el proceso de elaboración de la cartografía de vías. Además, los sistemas informáticos de alto rendimiento que implementan sistemas de “inteligencia artificial” se están volviendo muy hábiles en la detección automática de vías en imágenes de satélite, con una claridad cada vez mayor. En el pasado los cartógrafos o bibliotecarios de mapas más perspicaces, a veces archivaban los conjuntos de datos, pero hasta hace muy poco archivarlos no era una parte estándar (ni siquiera común) del proceso de investigación. Al igual que con la elaboración de mapas, archivar conjuntos de datos históricos se han vuelto más manejable con la conversión a sistemas cartográficos digitales. Por ejemplo, las fotografías instantáneas del conjunto de datos de vías mundiales, producidas por la comunidad de cartógrafos de la Fundación OpenStreetMap y archivadas de manera periódica a partir del 2013, se pueden descargar de manera gratuita desde su depósito de datos ([www.openstreetmap.org](http://www.openstreetmap.org)).

Aunque sin lugar a dudas estos avances aportarán a la ciencia de la ecología vial, todavía existen retos importantes relacionados con la calidad y precisión del conjunto de datos de las vías que limitan la investigación, con frecuencia en los mismos lugares en donde esta investigación podría ser más impactante como en bosques o sabanas mal cartografiados, cuyos efectos por construcción de vías son más graves en la vida silvestre y en las especies en peligro de extinción. La confiabilidad de los conjuntos de datos sobre vías varía de un lugar a otro, y al no existir normas claras ni evaluaciones sistemáticas sobre su precisión, no se dispone de mediciones de su incertidumbre espacialmente. Esta situación es sobre todo problemática en las regiones en las que los recursos cartográficos son escasos, que suelen ser áreas menos pobladas

y fronteras del desarrollo, en las que la necesidad de realizar estudios de ecología vial puede ser más crítica. Estos problemas obstaculizan a los investigadores de la ecología vial, que suelen utilizar los mapas históricos y actuales de la red de vías como conjuntos de datos de “antes y después” para modelar los cambios ambientales. Sigue siendo difícil para los investigadores adquirir mapas de vías precisos que retraten las vías rurales más pequeñas y de bajo volumen en más de un momento. Esto se debe a los elevados costos de creación de conjuntos de datos, combinados con la falta de normas cartográficas universales que aborden cuestiones de escala, precisión y características de las vías.

Los mapas de la red de vías proporcionan información espacial crítica sobre la ubicación, pero no proporcionan con facilidad información crítica sobre los patrones de tráfico. Los datos de los patrones del tráfico mantenidos por las autoridades locales y regionales de transporte, son más comunes en zonas urbanas y suburbanas, así como en los peajes de las autopistas, donde se controla y se mide el tráfico. Los estudios que documentan los patrones de tráfico en las vías rurales son prácticamente inexistentes. Dado que gran parte del impacto de las vías rurales depende del volumen y el horario del tráfico, comprender los patrones reales de uso de las vías a lo largo del tiempo en estas regiones es fundamental para evaluar sus impactos.

Mientras que los mapas de la red de vías y los datos de tráfico nos ayudan a comprender las presiones de las vías sobre los ecosistemas circundantes, las mediciones del aire, el agua, los suelos, las plantas y los animales, proporcionan información fundamental sobre las respuestas. Las respuestas de los animales vivos suelen medirse mediante telemetría, con dispositivos de seguimiento por GPS que permiten un control indirecto y casi constante de los movimientos de los animales en relación con los vehículos y el tráfico. El volumen de datos que producen estos estudios es considerable y los requisitos para el análisis de datos son del mismo modo formidables. Aunque los conocimientos estadísticos son muy solicitados y difíciles de conseguir, la disponibilidad de herramientas de modelización estadística para apoyar a los ecólogos en los estudios sobre el movimiento

**Figura 12.** Cinco preguntas para identificar los efectos relativos de las vías en la persistencia de las poblaciones de fauna silvestre. (Fuente: Roedenbeck, I. A., Fahrig, L., Findlay, C. S., Houlihan, J. E., Jaeger, J. A. G., Klar, N., Kramer-Schadt, S. y Grift van der, E. A. (2007) "The Rauschholzhausen agenda for road ecology", *Ecology and Society*, 12 (1):11.

de los animales se está desarrollando con rapidez.

## Vacíos y limitaciones de la investigación en la ecología vial rural

Un vacío importante en la investigación de la ecología vial es la comprensión de los efectos acumulativos de las vías rurales y su tráfico en los ecosistemas y paisajes. Roedenbeck et al. (2007) plantean cinco preguntas de investigación que pretenden identificar los efectos de las vías en la permanencia de las poblaciones de fauna silvestre a escala de paisaje (Figura 12). Además, esbozan un marco experimental para aumentar la solidez de las conclusiones sobre las causas y los efectos en la investigación de la ecología vial, tanto para avanzar en el conocimiento del campo, como para aplicar ese conocimiento a la planificación de los sistemas de transporte en el mundo real. Señalan la necesidad de realizar experimentos bien diseñados que documenten los efectos antes y después del desarrollo de las vías o de la instalación de medidas de mitigación, y que incluyan lugares de control para comparar las observaciones intencionadas y la recolección de datos en zonas con y sin vías, que por lo demás son similares (el diseño denominado BACI).

Otro vacío en la investigación de la ecología vial es la comprensión de los umbrales de densidad de las vías a partir de los cuáles las poblaciones de fauna silvestre disminuyen, así como entender sus tiempos de respuesta a la pérdida de hábitat, al aumento de la mortalidad y a la reducción de la conectividad. Hay un rango de tiempo entre la construcción de la vía y las respuestas de las poblaciones de fauna, después del cuál las poblaciones se hacen más pequeñas y más vulnerables a la extinción. La respuesta completa puede llevar varias décadas y es probable que dependa de la densidad de la red de vías. Aunque los tiempos de respuesta de la mayoría de las especies son desconocidos, están relacionados con "el tiempo de generación" de cada especie; esta comprensión es importante para la evaluación del impacto ambiental (EIA), porque implica que el declive y la pérdida

### PREGUNTA 1

¿En qué circunstancias las vías afectan la persistencia de la población?

### PREGUNTA 2

¿Cuál es la importancia relativa de los efectos de la vía frente a otros impactos en la persistencia de la población?

### PREGUNTA 3

¿En qué circunstancias se pueden mitigar los efectos de una vía?

### PREGUNTA 4

¿Cuál es la importancia relativa de los distintos mecanismos por los que las vías afectan la persistencia de una población?

### PREGUNTA 5

¿En qué circunstancias las redes de vías afectan la persistencia de las poblaciones a escala del paisaje?

de poblaciones podría continuar durante varias décadas después de la construcción de una vía. El término "deuda de extinción" denota el número de poblaciones que se extinguirán debido a los cambios que ya se han producido en el paisaje. Por lo tanto, los EIA y la planificación de la conservación del paisaje deben tener en cuenta los efectos del uso del suelo sobre la permanencia y el movimiento de los animales, así como los tiempos de respuesta asociados. Respecto a lo anterior, surge el cuestionamiento de nuestra capacidad para revertir posibles efectos negativos durante este periodo de desfase. Revertir los impactos significa un gran esfuerzo que no solo implica detenerlos, sino también restaurar el ecosistema. Aunque tenemos algunas ideas sobre los intervalos de tiempo de las poblaciones y las deudas de extinción basadas en la investigación actual, se trata de un área importante de investigación en la que nuevos enfoques que combinen la genética, la cartografía y los modelos informáticos, podrían mejorar las estimaciones y ayudar a divulgar la comprensión que tenemos de los efectos acumulativos de las vías, así como de la eficacia que en potencia generarían las medidas de mitigación.

Una prioridad de investigación urgente es la evaluación explícita de las estrategias de configuración de la red vial que modifican la densidad de las vías, frente a las estrategias que modifican los volúmenes de tráfico en paisajes existentes. Por ejemplo, ¿es menos perjudicial para la vida silvestre adaptar una red vial a un aumento en el número de vehículos, mejorando así las vías existentes para que puedan soportar mayores volúmenes de tráfico, o aumentar la longitud total de las vías de la red? Con cualquiera de las dos estrategias, las tasas de mortalidad en las vías aumentarán, pero es difícil intuir cuál de ellas producirá un menor aumento de la mortalidad, una menor pérdida de hábitat, una menor reducción de la conectividad, etc. Estas preguntas podrían plantearse sobre cualquiera de los efectos descritos con anterioridad, como por ejemplo las consecuencias hidrológicas y atmosféricas. Los modelos ecológicos pueden hacer contribuciones importantes para abordar estas preguntas a la escala del paisaje, a propósito de que los enfoques experimentales no suelen ser factibles a esta escala.

A partir de los conocimientos que la ecología vial ha producido sobre aspectos como la fragmentación de la población, así como de los efectos químicos y físicos de las vías y su tráfico, la investigación en ecología vial se encuentra ahora en una fase en la que necesita enfoques generales e integrados con los esfuerzos coordinados entre los profesionales de la ecología y las agencias de transporte, para producir resultados de investigación más útiles y con mayor mérito científico. Armonizar la escala espacial y la escala temporal de una gran cantidad de datos de la investigación en ecología vial es una prioridad clave para avanzar. Esto incluye la adecuación de las escalas de construcción de vías y de los volúmenes de tráfico proyectados, con preguntas sobre la distribución de las especies, la calidad del aire y del agua, así como del comportamiento y la mortalidad de los animales. En esta perspectiva, la creación de un protocolo de recolección de datos que sea fácil de ejecutar y útil para las agencias de transporte rural, al tiempo que cumpla con el rigor científico de los estudios ecológicos, ayudaría a avanzar en la aplicación práctica de la ecología vial. Un protocolo de este tipo que identifique

las normas mínimas de recolección de datos, con un conjunto común de términos para las redes de vías rurales, podría ayudar a estandarizar los conjuntos de datos en regiones amplias, de modo que los efectos de las vías puedan compararse y evaluarse de manera adecuada a lo largo del tiempo.

## CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Las redes de vías y su tráfico provocan múltiples efectos ecológicos a largo plazo como se ha demostrado en numerosos y detallados estudios científicos. Aunque la gente necesita las vías para acceder a los recursos, éstas tienen consecuencias importantes en la ecología de los paisajes rurales. La construcción y mantenimiento de las redes de vías se encuentran entre las inversiones más costosas en el uso de la tierra por parte del ser humano; además el costo total del desarrollo de las vías es mucho más elevado, pues incluye el valor de las "externalidades", es decir la pérdida o disminución de servicios ecosistémicos como la biodiversidad y filtración del agua. El reto es planificar y gestionar los paisajes rurales para minimizar la necesidad de vías rurales y mitigar sus efectos adversos en los ecosistemas rurales, un objetivo que sustenta las economías regionales.

La ecología vial proporciona una ontología útil de los sistemas de vías para describir el alcance y la naturaleza de sus impactos; modelar, diseñar, y probar estrategias y soluciones para la mitigación del impacto; así como producir información aplicable para tomar decisiones sobre las redes de vías (Figura 4). Antes de construir una vía es fundamental tener en cuenta sus efectos ecológicos a corto y largo plazo, incluyendo su uso, mantenimiento y considerando las alternativas, incluida la opción de no construirla. Las medidas de mitigación pueden parecer costosas, pero con el tiempo pueden ser el enfoque más rentable para el desarrollo de las vías, gracias al ahorro que suponen al prevenir accidentes y mantener los servicios ecosistémicos. Seguramente, para los intereses de las comunidades que habitan las zonas rurales o las áreas de impacto de las vías, será de vital importancia que durante las fases de planificación y

diseño, se adopten enfoques de desarrollo de vías que tengan como objetivo mantener todo el valor y la integridad ecológica a largo plazo.

En el caso de las vías que ya están en uso, pueden aplicarse medidas de mitigación para adaptarlas y reducir su impacto. Incluyen soluciones de diseño, gestión y mantenimiento. Estas medidas tienen la ventaja de reducir los efectos de las vías en los sistemas ecológicos y al mismo tiempo mejorar la seguridad de las vías existentes, al reducir reducir daños innecesarios causados por las colisiones entre animales y vehículos. En el caso de las vías rurales más transitadas y pavimentadas se pueden considerar soluciones de diseño para gestionar el movimiento de la fauna, por ejemplo, a través de vallas y estructuras de cruce; y para la gestión de la escorrentía de las aguas pluviales, por ejemplo, con cuencas de retención. En el caso de las vías rurales poco transitadas las medidas de mitigación podrían comenzar con el estudio de los ecosistemas y de los taxones potencialmente afectados, junto a la ubicación, las condiciones y el uso de las vías existentes para evaluar su impacto y utilizar ésta información, en la proposición de enfoques de gestión específicos y creativos que reduzcan los impactos. La investigación sugiere que es más eficaz adaptar la aplicación de la mitigación a las necesidades de las especies que se ven afectadas negativamente por las vías. Algunos ejemplos de estos enfoques podrían ser las medidas para limitar el acceso a determinados lugares

o durante determinadas épocas del año para minimizar los efectos negativos sobre la fauna.

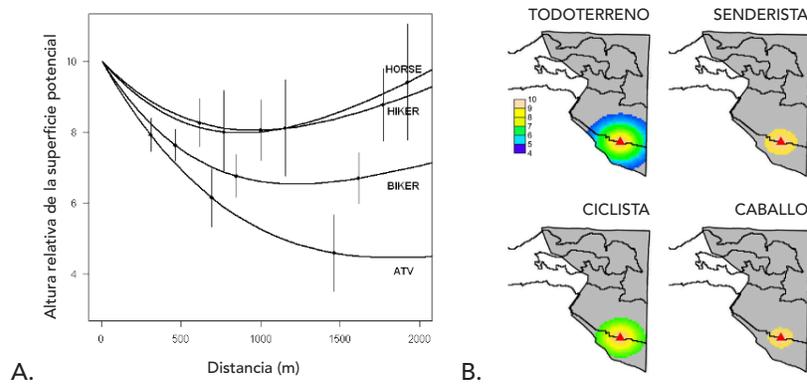
La sociedad humana ha creado un ingenioso sistema de transporte que permite un acceso coordinado y sin trabas a la superficie terrestre, pero las investigaciones científicas demuestran que existen múltiples impactos ecológicos de la creciente red mundial de vías a largo plazo, la mayoría de las cuales se encuentran en zonas rurales. Para gestionar de manera sostenible un sistema de este tipo, hay que idear estrategias igual de ingeniosas y aplicarlas. Ya existen numerosos enfoques para mitigar los efectos ecológicos adversos de las vías rurales, incluidas las mejores prácticas de gestión, pero existen obstáculos que impiden su aplicación, como; la falta de conocimientos, la falta de voluntad para aplicar medidas desconocidas o aparentemente costosas, la falta de atención al medio ambiente y a las generaciones futuras, y en muchas regiones, la falta de recursos y capacidad de gobernanza. Es esencial educar a los ciudadanos, a los conductores y a los gestores del territorio sobre los verdaderos costos de las vías, incluidos sus impactos ecológicos acumulados y las mejores prácticas de gestión para mitigar sus efectos negativos. La traducción efectiva de esta información en la acción, podría dar lugar a herramientas de política de uso del suelo y a acciones de gestión basadas en ciencia, promoviendo así un enfoque más holístico y sostenible del desarrollo y la gestión de las vías.

## ESTUDIO DE CASO 1

### Respuesta del alce a las actividades recreativas en las vías rurales

El uso de los caminos rurales impacta en la vida silvestre cuando el tráfico y la presencia humana causan interrupciones fragmentando de manera periódica los hábitats naturales. Utilizando tecnología GPS, investigadores de Oregón (EE.UU.) rastrearon la respuesta del alce de Rocky Mountain (*Cervus canadensis nelsoni*) a las actividades recreativas en vías rurales. Durante cuatro años hicieron un seguimiento de cuatro tipos de actividades recreativas: senderismo, montar en bicicleta, montar a caballo y montar en vehículos todoterreno (ATV). Midieron la reacción de los alces mediante la estimación de una "superficie potencial", un concepto estadístico que describe el movimiento de los animales como una superficie espacio-temporal con puntos de atracción (p. ej., las zonas de alimentación) y puntos de repulsión (p. ej., la perturbación causada por un vehículo). Se utilizó una ecuación matemática para modelar el movimiento de los alces, que describe la fuerza

de la repulsión o evasión en función de la distancia a la actividad; cuanto más pronunciada sea la función estimada, más fuerte será la repulsión. Los resultados mostraron que en promedio los alces se alejaban cuando se encontraban a unos cientos de metros de cualquier perturbación, pero que la “repulsión” era más fuerte en el caso de los vehículos todoterreno, observándose cierta repulsión hasta a un kilómetro de distancia. En cambio, en el caso de los jinetes, el efecto de repulsión sólo se observó hasta unos 200 metros (Figura 13).

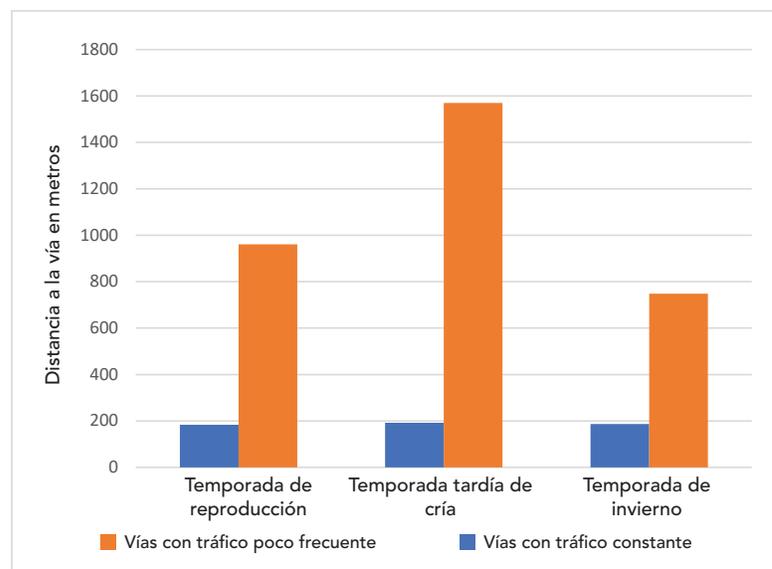


**Figura 13.** Evasión por parte de los alces a cuatro actividades en caminos rurales: senderismo (SENDERISTA) y conducción de vehículos todo terreno (TODOTERRENO), bicicletas (CICLISTA) y caballos (CABALLO). La pendiente de la curva (A) reflejó la fuerza de la evasión. Las líneas perpendiculares finas muestran los límites de confianza de 95% aproximadamente. Las superficies potenciales estimadas (B) mostraron que cuando la perturbación humana se situó en el triángulo rojo, la evasión más fuerte fue para los usuarios de vehículos todoterreno y la más débil para los jinetes. (Fuente: Preisler, H.K., A.A. Ager, M.J. Wisdom. 2013. Analyzing animal movement patterns using potential. *Ecosphere*: 4[3]:art32).

## ESTUDIO DE CASO 2

### Respuestas del Urogallo de Gunnison al uso de motorizados en caminos rurales

Un número cada vez mayor de estudios recoge información sobre los cambios estacionales, anuales y decenales en las respuestas de los ecosistemas a las vías, proporcionando información sobre los movimientos de los animales y los patrones de tráfico. Investigadores del oeste de Colorado realizaron un estudio que muestra los efectos de los vehículos de motor en las vías rurales sobre el uso del hábitat por parte del urogallo de Gunnison (*Centrocercus minimus*). El urogallo de Gunnison (GUSG por sus siglas del inglés: *Gunnison sage-grouse*) es una especie amenazada y protegida por la Ley de especies en peligro de extinción, pues está en declive y quedan menos de 5.000 ejemplares en libertad. Los investigadores establecieron una red de seguimiento de vehículos, recogiendo datos sobre la fecha y hora de uso del vehículo, el tipo, la velocidad y el sentido de la marcha; con el fin de estudiar la relación entre la intensidad del uso de los vehículos motorizados con el uso de hábitat y movimientos del GUSG. Esta red lleva seis años funcionando, incluye siete lugares de seguimiento y ha contabilizado más de 25.000 vehículos. Los investigadores también le han colocado collares GPS a 13 GUSG para supervisar la relación entre el uso de los vehículos motorizados con la de la selección de recursos de GUSG,



**Figura 14.** Distancia estacional del urogallo de Gunnison a las vías, mostrando el efecto de las vías con tráfico constante y de aquellas con tráfico poco frecuente.

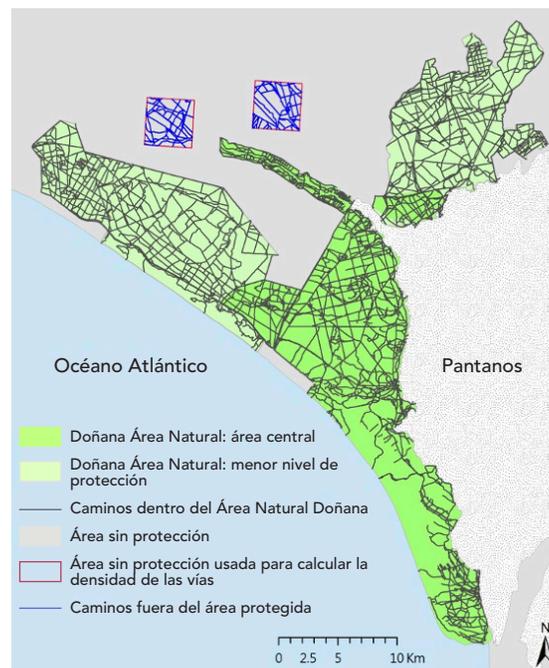
o con su uso del hábitat y movimientos. Los resultados de este proyecto en relación con el uso de vehículos motorizados en vías rurales han mostrado una clara distinción entre los efectos de las vías de uso “continuo” y las de uso “poco frecuente”. En el caso de las vías de uso continuo (más de dos vehículos al día), la selección de recursos del GUSG creció al aumentar la distancia de la vía, hasta más de un kilómetro de distancia. Estos resultados se compararon con los datos de las vías de uso poco frecuente (menor o igual a dos vehículos al día) en las que la selección de recursos se produjo a unos 200 m de las vías. Las vías y sus efectos no son iguales (Figura 14); a lo largo del año, el GUSG mantuvo la distancia de las vías con un tráfico bajo pero constante, a diferencia de su comportamiento en vías con un uso extremadamente bajo y poco frecuente. El efecto del tráfico es fuerte en especial durante el final de la temporada de cría, cuando las aves están totalmente ocupadas en la crianza de sus hijos.

**Figura 15.** Mapa del Espacio Natural de Doñana, España. El área natural central tenía una gran cantidad de caminos, y tal vez más, para las actividades de seguimiento científico dentro del área protegida. (Fuente: Román J, A Barón, E Revilla. 2010. Evaluación de los efectos del tránsito a motor sobre especies y comunidades de interés en el Espacio Natural de Doñana. Consejería de Medio Ambiente, Junta de Andalucía y Estación Biológica de Doñana CSIC. 236 pp.)

### ESTUDIO DE CASO 3

#### Caminos vehiculares en el Espacio Natural de Doñana, España

Una de las zonas de Europa con menor densidad de vías pavimentadas es el Espacio Natural de Doñana, en el suroeste de España (543 km<sup>2</sup>). Algunas partes están abiertas al público, pero el acceso está muy restringido en la zona central (Figura 15), lo que sugiere que el Área Natural sería una ubicación excelente como “control” sin vías para su uso en estudios de ecología vial. Por ello la agencia pública encargada de la conservación (Consejería de Medio Ambiente, Junta de Andalucía) y un instituto de investigación (Estación Biológica de Doñana) llevaron a cabo un proyecto de investigación para evaluar el papel de los caminos para vehículos y de las vías sin asfaltar en la zona. Sin embargo, la agencia encontró que el área protegida contiene más de 2.000 km de caminos para vehículos que ocupan el cuatro por ciento de la superficie total, con una densidad de 4 km por km<sup>2</sup>. Pero aunque el acceso a la zona protegida de Doñana está restringido, la densidad de caminos es mayor en la zona central, donde se duplicó de 1956 a 2010, y las densidades más bajas están en las zonas no protegidas. Además, la intensidad del tráfico es mayor en la zona con mayor protección. Esta intensidad en el tráfico se debe a niveles más altos de actividades de gestión, conservación e investigación en la zona central. Los resultados de este trabajo muestran que solo las actividades de gestión en el territorio, tienen impactos, a menudo con consecuencias para la conservación de muchas especies y comunidades, incluyendo diferentes tipos de vegetación considerados hábitats prioritarios en el Espacio Natural de Doñana.



## AGRADECIMIENTOS

Este artículo surgió de una sesión organizada en la reunión anual de la Ecological Society of America (Sociedad Ecológica de América) en el 2010, titulada “*Road networks and environmental change*” (Redes de vías y cambios ambientales), en la que los ponentes invitados acordaron elaborar un manuscrito para *Issues in Ecology* centrado en los efectos ecológicos de las vías rurales. Estamos muy agradecidos con los editores de la ESA por haber apoyado este proyecto durante su largo periodo de desarrollo. Agradecemos el apoyo financiero de: US Geological Survey y USDA. También agradecemos el apoyo de: US Geological Survey (Servicio Geológico de los EE.UU.), en particular del Mendenhall Postdoctoral Fellowship Program (Programa de Becas Postdoctorales Mendenhall) y a Rama Kotra, junto a la dirección y al personal del Fort Collins Science Center (Centro de Ciencias de Fort Collins) y el Rocky Mountain Geographic Science Center (Centro de Ciencias Geográficas de Rocky Mountain); Tim Strickland y el liderazgo del Southeast Area leadership of the USDA Agricultural Research Service (Área Sudeste del Servicio de Investigación Agrícola del USDA), por su revisión institucional; William Lange, Duncan McKinley, Susan Cook-Patton y Hutch Brown de USDA Forest Service Research and Development Washington Office (Oficina de Investigación y Desarrollo del Servicio Forestal del USDA en Washington), por su asistencia y contribuciones al manuscrito. LBA fue financiado por fondos nacionales portugueses a través de FCT – Fundação para a Ciência e a Tecnologia, I.P., bajo la Norma Transitoria - DL57/2016/CP1440/ CT0022.

## SOBRE LOS CIENTÍFICOS

**Alisa W. Coffin\***

Southeast Watershed Research Laboratory, USDA Agricultural Research Service, Tifton, GA 31794, USA

**Douglas S. Ouren**

Emeritus, Fort Collins Science Center, US Geological Survey, Fort Collins, CO 80524, USA

**Neil D. Bettez**

Cary Institute of Ecosystem Studies, Millbrook, NY 12545 USA

**Luís Borda-de-Água**

CIBIO/InBio, Centro de Investigação em Biodiversidade e Recursos Genéticos, Laboratório Associado, Universidade do Porto, Campus Agrário de Vairão, 4485-661 Vairão, Portugal

CIBIO/InBio, Centro de Investigação em Biodiversidade e Recursos Genéticos, Laboratório Associado, Instituto Superior de Agronomia, Universidade de Lisboa, Tapada da Ajuda, 1349-017 Lisbon, Portugal

**Amy E. Daniels**

Independent Consultant, Rua Mondlane, Luanda, Angola

**Clara Grilo**

CESAM – Centre for Environmental and Marine Studies, Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa, C2, 2.3.03 1749-016 Lisboa, Portugal

**Jochen A.G. Jaeger**

Concordia University Montreal, Department of Geography, Planning and Environment, Montreal, Quebec, H3G 1M8, Canada

**Laetitia M. Navarro**

German Center for Integrative Biodiversity Research, 04103 Leipzig, Germany

**Haiganoush K. Preisler**

Retired. Pacific Southwest Research Station, USDA Forest Service, Albany, CA, 94710 USA

**Emily S.J. Rauschert**

Department of Biological, Geological and Environmental Sciences, Cleveland State University, Cleveland, OH 44115, USA

---

\* Autora correspondiente: Alisa W. Coffin, Research Ecologist, USDA-ARS, 2316 Rainwater Road, PO Box 748, Tifton, GA, 31793; phone: 229-386-3665; email: [alisa.coffin@ars.usda.gov](mailto:alisa.coffin@ars.usda.gov)

## LISTA DE LECTURAS ADICIONALES

- AASHTO Highway Subcommittee on Design Task Force for Environmental Design, editor. 1991. A Guide for Transportation Landscape and Environmental Design. American Association of State Highway and Transportation Officials, Washington, DC.
- Balkenhol N., and L.P. Waits. 2009. Molecular road ecology: exploring the potential of genetics for investigating transportation impacts on wildlife. *Molecular Ecology* **18**(20): 4151-64.
- Borda-de-Água L., L. Navarro, C. Gavinhos, and H.M. Pereira. 2011. Spatio-temporal impacts of roads on the persistence of populations: analytic and numerical approaches. *Landscape Ecology* **26**: 253–265.
- Borda-de-Água L., C. Grilo, and H.M. Pereira. 2014. Modeling the impact of road mortality on barn owl (*Tyto alba*) populations using age-structured models. *Ecological Modelling* **276**: 29–37.
- Brundige, J. (Director). 2016. "Wild Ways." In *NOVA*, aired on April 20, 2016. Produced by WGBH, Boston, MA.
- Ceia-Hasse A., L. Borda-de-Água, C. Grilo, and H.M. Pereira. 2017. Global exposure of carnivores to roads. *Global Ecology and Biogeography* **26**: 592-600.
- Ellenberg, H., K. Müller, and T. Stottele, T. 1981. Straßen-Ökologie: Auswirkungen von Autobahnen und Straßen auf Ökosysteme deutscher Landschaften [Road ecology: Effects of motorways and roads on ecosystems in German landscapes.]. *Ökologie und Straße: Broschürenreihe der deutschen Straßenliga* [Ecology and road: Pamphlet series of the German Road League], Ausgabe [Issue] **3**: 19–122.
- Fahrig, L., and T. Rytwinski. 2009. Effects of Roads on Animal Abundance: an Empirical Review and Synthesis. *Ecology and Society* **14** (1):21.
- Faiz, A. 2012. The Promise of Rural Roads: Review of the Role of Low-Volume Roads in Rural Connectivity, Poverty Reduction, Crisis Management, and Livability. Transportation Research Circular E-C167. Transportation Research Board of the National Academies, Washington, DC.
- Forman, R.T.T., and L.E. Alexander. 1998. Roads and their major ecological effects. *Annual Review of Ecology and Systematics* **29**: 207–232.
- Forman, R.T.T., D. Sperling, J.A. Bissonette, A.P. Clevenger, C.D. Cutshall, V.H. Dale, L. Fahrig, R. France, C.R. Goldman, K. Heanue, J.A. Jones, F.J. Swanson, T. Turrentine, and T.C. Winter. 2003. *Road ecology: Science and solutions*. Island Press, Washington, DC.
- Haddad, N. M. 2015. Corridors for people, corridors for nature. *Science* **350**: 1166-1167.
- Ibisch, P. L., M. T. Hoffmann, S. Kreft, G. Pe'er, V. Kati, L. Biber-Freudenberger, D. A. DellaSala, M. M. Vale, P. R. Hobson, and N. Selva. 2016. A global map of roadless areas and their conservation status. *Science* **354**: 1423-1427,
- IENE (Infra Eco Network Europe). 2015. Protect remaining roadless areas: The IENE 2014 declaration. *Nature Conservation* **11**: 1-4.
- Keller, G., and J. Sherar. 2003. Low-volume roads engineering: Best management practices field guide. US Department of Agriculture, US Agency for International Development.
- Kleinschroth, F., J. R. Healey, S. Gourlet-Fleury, F. Mortier, and R. S. Stoica. 2017. Effects of logging on roadless space in intact forest landscapes of the Congo Basin. *Conservation Biology* **31**:469-480.
- Kuussaari, M., R. Bommarco, R.K. Heikkinen, A. Helm, J. Krauss, R. Lindborg, E. Öckinger, M. Pärtel, J. Pino, F. Rodà, C. Stefanescu, T. Teder, M. Zobel, and I. Steffan-Dewenter. 2009. Extinction debt: A challenge for biodiversity conservation. *Trends in Ecology and Evolution* **24**: 564–571.

Laurance, W.F.; M. Goosem, and S.G.W. Laurance. 2009. Impacts of roads and linear clearings on tropical forests. *Trends in Ecology and Evolution*, **24**, 659-669.

Laurance, W.F.; M.J. Campbell, M. Alamgir, M.I. Mahmoud. 2017. Road expansion and the fate of Africa's tropical forests. *Frontiers in Ecology and Evolution*, **5** (75).

National Research Council. 2005. Assessing and managing the ecological impacts of paved roads. The National Academies Press, Washington, DC.

Olson, D.D., J.A. Bissonette, P.C. Cramer, A.D. Green, S.T. Davis, P.J. Jackson, and D.C. Coster. 2014. Monitoring Wildlife-Vehicle Collisions in the Information Age: How Smartphones Can Improve Data Collection. *PLoS ONE* **9**(6): e98613.

Roedenbeck, I. A., L. Fahrig, C. S. Findlay, J. E. Houlahan, J.A.G. Jaeger, N. Klar, S. Kramer-Schadt, and E. A. van der Grift. 2007. The Rauschholzhausen agenda for road ecology. *Ecology and Society* **12**: 11.

Rytwinski, T., K. Soanes, J.A.G. Jaeger, L. Fahrig, C.S. Findlay, J. Houlahan, R. van der Ree, E.A. van der Grift. 2016. How effective is road mitigation at reducing road-kill? A meta-analysis. *PLoS ONE* **11**(11): e0166941. doi: 10.1371/journal.pone.0166941. Online: <http://journals.plos.org/plosone/article?id=10.1371/journal.pone.0166941>.

Spanowicz, A.G., F.Z. Teixeira, F.Z., and J. A. G. Jaeger. 2020. An adaptive plan for prioritizing road sections for fencing to reduce animal mortality. *Conservation Biology*, 34(5):1210-1220. [doi.org/10.1111/cobi.13502](https://doi.org/10.1111/cobi.13502)

Trombulak, S. C., and C. A. Frissell. 2000. Review of ecological effects of roads on terrestrial and aquatic communities. *Conservation Biology* **14**:18-30.

van der Grift, E. A., R. van der Ree, L. Fahrig, S. Findlay, J. Houlahan, J.A.G. Jaeger, N. Klar, L.F. Madrinan, and L. Olson. 2013. Evaluating the effectiveness of road mitigation measures. *Biodiversity and Conservation* **22**:425-448.

van der Ree, R., D.J. Smith, and C. Grilo. 2015. Handbook of Road Ecology. Wiley-Blackwell, Hoboken, NJ.

van Strien, M. J., K. W. Axhausen, I. Dubernet, A. Guisan, A. Grêt-Regamey, A. Khiali-Miab, D. O. Ortiz-Rodríguez, and R. Holderegger. 2018. Models of Coupled Settlement and Habitat Networks for Biodiversity Conservation: Conceptual Framework, Implementation and Potential Applications. *Frontiers in Ecology and Evolution* **6**:41.

## BIBLIOGRAFÍA

- AASHTO. 2001a. Guidelines for Geometric Design of Very Low-Volume Local Roads (ADT less than or equal to 400). Washington, D.C.
- AASHTO. 2001b. A Policy of Geometric Design of Highways and Streets. American Association of State Highway Transportation Officials, Washington, D.C.
- AASHTO Highway Subcommittee on Design Task Force for Environmental Design, editor. 1991. A Guide for Transportation Landscape and Environmental Design. American Association of State Highway and Transportation Officials, Washington, DC.
- Allan, J. D., and M. M. Castillo. 2007. Stream Ecology: Structure and function of running waters. 2 edition. Springer Netherlands.
- Almeida-Neto, M., G. Machado, R. Pinto-da-Rocha, and A. A. Giaretta. 2006. Harvestman (Arachnida : Opiliones) species distribution along three Neotropical elevational gradients: an alternative rescue effect to explain Rapoport's rule? *Journal of Biogeography* **33**:361-375.
- Angold, P. G. 1997. The impact of a road upon adjacent heathland vegetation: Effects on plant species composition. *Journal of Applied Ecology* **34**:409-417.
- Balkenhol, N., and L. P. Waits. 2009. Molecular road ecology: exploring the potential of genetics for investigating transportation impacts on wildlife. *Molecular Ecology* **18**:4151-4164.
- Ballesteros-Mejia, L., I. J. Kitching, W. Jetz, P. Nagel, and J. Beck. 2013. Mapping the biodiversity of tropical insects: species richness and inventory completeness of African sphingid moths. *Global Ecology and Biogeography* **22**:586-595.
- Barbosa, N. P. U., G. W. Fernandes, M. A. A. Carneiro, and L. A. C. Junior. 2010. Distribution of non-native invasive species and soil properties in proximity to paved roads and unpaved roads in a quartzitic mountainous grassland of southeastern Brazil (rupestrian fields). *Biological Invasions* **12**:3745-3755.
- Benten, A., P. Annighöfer, and T. Vor. 2018. Wildlife Warning Reflectors' Potential to Mitigate Wildlife-Vehicle Collisions—A Review on the Evaluation Methods. *Frontiers in Ecology and Evolution* **6**.
- Bezborodov, G. A., D. K. Shadmanov, R. T. Mirhashimov, T. Yuldashev, A. S. Qureshi, A. D. Noble, and M. Qadir. 2010. Mulching and water quality effects on soil salinity and sodicity dynamics and cotton productivity in Central Asia. *Agriculture Ecosystems & Environment* **138**:95-102.
- Blanton, P., and W. A. Marcus. 2009. Railroads, roads and lateral disconnection in the river landscapes of the continental United States. *Geomorphology* **112**:212-227.
- Blomqvist, G., and E.-L. Johansson. 1999. Airborne spreading and deposition of de-icing salt — a case study. *Science of The Total Environment* **235**:161-168.
- Borda-de-Água, L., C. Grilo, and H. M. Pereira. 2014. Modeling the impact of road mortality on barn owl (*Tyto alba*) populations using age-structured models. *Ecological Modelling* **276**:29-37.
- Borda-de-Água, L., L. Navarro, C. Gavinhos, and H. M. Pereira. 2011. Spatio-temporal impacts of roads on the persistence of populations: analytic and numerical approaches. *Landscape Ecology* **26**:253-265.
- Brown, G. P., B. L. Phillips, J. K. Webb, and R. Shine. 2006. Toad on the road: Use of roads as dispersal corridors by cane toads (*Bufo marinus*) at an invasion front in tropical Australia. *Biological Conservation* **133**:88-94.
- Brunen, B., C. Daguet, and J. A. G. Jaeger. 2020. What attributes are relevant for drainage culverts to serve as efficient road crossing structures for mammals? *Journal of Environmental Management* **268**:110423.
- Ceia-Hasse, A., L. Borda-de-Água, C. Grilo, and H. M. Pereira. 2017. Global exposure of carnivores to roads. *Global Ecology and Biogeography* **26**:592-600.
- Coffin, A. W. 2007. From roadkill to road ecology: A review of the ecological effects of roads. *Journal of Transport Geography* **15**:396-406.
- Coffin, A. W. 2010. Environmental Impacts of Roads. Encyclopedia of Geography. Sage Publications. Sage Publications, Thousand Oaks, USA.
- Cornish, P. M. 2001. The effects of roading, harvesting and forest regeneration on streamwater turbidity levels in a moist eucalypt forest. *Forest Ecology and Management* **152**:293-312.

- Dark, S. J. 2004. The biogeography of invasive alien plants in California: an application of GIS and spatial regression analysis. *Diversity and Distributions* **10**:1-9.
- Davidson, E. A., K. E. Savage, N. D. Bettez, R. M. Marino, and R. W. Howarth. 2010. Nitrogen in Runoff from Residential Roads in a Coastal Area. *Water Air and Soil Pollution* **210**:3-13.
- Diseker, E. G., and J. M. Sheridan. 1971. Predicting Sediment Yield from Roadbanks. Transactions of the ASAE **14**:102-0105.
- Dunlap, D. W. 1987. Development of grass-seeding specifications for use on Texas highway rights-of-way. Proceedings of Conference XVII International Erosion Control Association **18**:161-172.
- Dunne, T., and L. B. Leopold. 1978. *Water in Environmental Planning*. W.H. Freeman and Company, New York.
- Eisenberg, J. N. S., W. Cevallos, K. Ponce, K. Levy, S. J. Bates, J. C. Scott, A. Hubbard, N. Vieira, P. Endara, M. Espinel, G. Trueba, L. W. Riley, and J. Trostle. 2006. Environmental change and infectious disease: How new roads affect the transmission of diarrheal pathogens in rural Ecuador. Proceedings of the National Academy of Sciences **103**:19460-19465.
- Ellenberg, H. K., K. Müller, and T. Stottele. 1981. Straßen-Ökologie: Auswirkungen von Autobahnen und Straßen auf Ökosysteme deutscher Landschaften [Road ecology: Effects of motorways and roads on ecosystems in German landscapes.]. *Ökologie und Straße: Broschürenreihe der deutschen Strassenliga* [Ecology and road: Pamphlet series of the German Road League] Ausgabe [Issue] **3**:19-122.
- Fahrig, L., and T. Rytwinski. 2009. Effects of roads on animal abundance: an empirical review and synthesis. *Ecology and Society* **14** (1):21.
- Faiz, A. 2012. The promise of rural roads: Review of the role of low-volume roads in rural connectivity, poverty reduction, crisis management, and livability. Transportation Research Circular.
- Farmer, A. M. 1993. The effects of dust on vegetation: A review. *Environmental Pollution* **79**:63-75.
- Fay, L., and X. Shi. 2012. Environmental Impacts of Chemicals for Snow and Ice Control: State of the Knowledge. *Water, Air, & Soil Pollution* **223**:2751-2770.
- Forman, R. T. T. 1998. Road ecology: A solution for the giant embracing us. *Landscape Ecology* **13**:III-V.
- Forman, R. T. T., and L. E. Alexander. 1998. Roads and their major ecological effects. *Annual Review of Ecology and Systematics* **29**:207-232.
- Forman, R. T. T., D. Sperling, J. A. Bissonette, A. P. Clevenger, C. D. Cutshall, V. H. Dale, L. Fahrig, R. France, C. R. Goldman, K. Heanue, J. A. Jones, F. J. Swanson, T. Turrentine, and T. C. Winter. 2003. *Road Ecology: Science and Solutions*. Island Press, Washington, DC.
- Forsyth, A. R., K. A. Bubb, and M. E. Cox. 2006. Runoff, sediment loss and water quality from forest roads in a southeast Queensland coastal plain Pinus plantation. *Forest Ecology and Management* **221**:194-206.
- Forys, E. A., C. Allen, and D. P. Wojcik. 2002. Influence of the proximity and amount of human development and roads on the occurrence of the red imported fire ant in the lower Florida Keys. *Biological Conservation* **108**:27-33.
- Freudenberger, L., P. R. Hobson, S. Rupic, G. Pe'er, M. Schluck, J. Sauermann, S. Kreft, N. Selva, and P. L. Ibsch. 2013. Spatial road disturbance index (SPROADI) for conservation planning: a novel landscape index, demonstrated for the State of Brandenburg, Germany. *Landscape Ecology* **28**:1353-1369.
- Haddad, N. M. 2015. Corridors for people, corridors for nature. *Science* **350**:1166-1167.
- Haddad, N. M., L. A. Brudvig, J. Clobert, K. F. Davies, A. Gonzalez, R. D. Holt, T. E. Lovejoy, J. O. Sexton, M. P. Austin, C. D. Collins, W. M. Cook, E. I. Damschen, R. M. Ewers, B. L. Foster, C. N. Jenkins, A. J. King, W. F. Laurance, D. J. Levey, C. R. Margules, B. A. Melbourne, A. O. Nicholls, J. L. Orrock, D.-X. Song, and J. R. Townshend. 2015. Habitat fragmentation and its lasting impact on Earth's ecosystems. *Science Advances* **1**.
- Hawbaker, T. J., and V. C. Radeloff. 2004. Roads and landscape pattern in northern Wisconsin based on a comparison of four road data sources. *Conservation Biology* **18**:1233-1244.
- Hawbaker, T. J., V. C. Radeloff, M. K. Clayton, R. B. Hammer, and C. E. Gonzalez-Abraham. 2006. Road Development, Housing Growth, And Landscape Fragmentation In Northern Wisconsin: 1937-1999. *Ecological Applications* **16**:1222-1237.
- Heffernan, J. B., P. A. Soranno, M. J. Angilletta Jr, L. B. Buckley, D. S. Gruner, T. H. Keitt, J. R. Kellner, J. S. Kominoski, A. V. Rocha, J. Xiao, T. K. Harms, S. J. Goring, L. E. Koenig, W. H. McDowell, H. Powell, A. D. Richardson, C. A. Stow, R. Vargas, and K. C. Weathers. 2014. Macrosystems ecology: understanding ecological patterns and processes at continental scales. *Frontiers in Ecology and the Environment* **12**:5-14.

- Huling, E. E., and T. C. Hollocher. 1972. Groundwater Contamination by Road Salt: Steady-State Concentrations in East Central Massachusetts. *Science* **176**:288-290.
- Ibisch, P. L., M. T. Hoffmann, S. Kreft, G. Pe'er, V. Kati, L. Biber-Freudenberger, D. A. DellaSala, M. M. Vale, P. R. Hobson, and N. Selva. 2016. A global map of roadless areas and their conservation status. *Science* **354**:1423-1427.
- IENE, 2015. Protect remaining roadless areas: The IENE 2014 declaration. *Nature Conservation* **11**:1-4.
- Jaeger, J. A. G. 2000. Landscape division, splitting index, and effective mesh size: new measures of landscape fragmentation. *Landscape Ecology* **15**:115-130.
- Jaeger, J. A. G., R. Bertiller, C. Schwick, K. Müller, C. Steinmeier, K. C. Ewald, and J. Ghazoul. 2008. Implementing landscape fragmentation as an indicator in the Swiss monitoring system of sustainable development (Monet). *Journal of Environmental Management* **88**:737-751.
- Jaeger, J. A. G., J. Bowman, J. Brennan, L. Fahrig, D. Bert, J. Bouchard, N. Charbonneau, K. Frank, B. Gruber, and K. T. von Toschanowitz. 2005. Predicting when animal populations are at risk from roads: an interactive model of road avoidance behavior. *Ecological Modelling* **185**:329-348.
- Joly, M., P. Bertrand, R. Y. Gbangou, M. C. White, J. Dube, and C. Lavoie. 2011. Paving the Way for Invasive Species: Road Type and the Spread of Common Ragweed (*Ambrosia artemisiifolia*). *Environmental Management* **48**:514-522.
- Jones, J. A., F. J. Swanson, B. C. Wemple, and K. U. Snyder. 2000. Effects of roads on hydrology, geomorphology, and disturbance patches in stream networks. *Conservation Biology* **14**:76-85.
- Jordán-López, A., L. Martínez-Zavala, and N. Bellinfante. 2009. Impact of different parts of unpaved forest roads on runoff and sediment yield in a Mediterranean area. *Science of The Total Environment* **407**:937-944.
- Jordán, A., and L. Martínez-Zavala. 2008. Soil loss and runoff rates on unpaved forest roads in southern Spain after simulated rainfall. *Forest Ecology and Management* **255**:913-919.
- Jules, E. S., M. J. Kauffman, W. D. Ritts, and A. L. Carroll. 2002. Spread of an invasive pathogen over a variable landscape: A nonnative root rot on Port Orford cedar. *Ecology* **83**:3167-3181.
- Karasin, B., Ibrahim, and E. Isik. 2016. Protection of Ten-Eyed Bridge in Diyarbakir. *Budownictwo I Architectura* **15**:87-94.
- Keller, G., and J. Sherar. 2003. Low-Volume Roads Engineering: Best Management Practices Field Guide. Page 158. U.S. Department of Agriculture, U.S. Agency for International Development.
- Kleinschroth, F., and J. R. Healey. 2017. Impacts of logging roads on tropical forests. *Biotropica* **49**:620-635.
- Kleinschroth, F., J. R. Healey, S. Gourlet-Fleury, F. Mortier, and R. S. Stoica. 2017. Effects of logging on roadless space in intact forest landscapes of the Congo Basin. *Conservation Biology* **31**:469-480.
- Kramer, M. G. 2013. Our Built and Natural Environments: A Technical Review of the Interactions Among Land Use, Transportation, and Environmental Quality. in E. P. Agency, editor. Government Printing Office, Washington, DC.
- Kunert, N., L. M. T. Aparecido, N. Higuchi, J. d. Santos, and S. Trumbore. 2015. Higher tree transpiration due to road-associated edge effects in a tropical moist lowland forest. *Agricultural and Forest Meteorology* **213**:183-192.
- Kuussaari, M., R. Bommarco, R. K. Heikkinen, A. Helm, J. Krauss, R. Lindborg, E. Öckinger, M. Pärtel, J. Pino, and F. Roda. 2009. Extinction debt: a challenge for biodiversity conservation. *Trends in Ecology & Evolution* **24**:564-571.
- Laurance, W. F. 2013. Rapid Land-Use Change and its Impacts on Tropical Biodiversity. Pages 189-199 *Ecosystems and Land Use Change*. American Geophysical Union.
- Laurance, W. F., M. J. Campbell, M. Alamgir, and M. I. Mahmoud. 2017. Road Expansion and the Fate of Africa's Tropical Forests. *Frontiers in Ecology and Evolution* **5**.
- Laurance, W. F., G. R. Clements, S. Sloan, C. S. O'Connell, N. D. Mueller, M. Goosem, O. Venter, D. P. Edwards, B. Phalan, A. Balmford, R. Van Der Ree, and I. B. Arrea. 2014. A global strategy for road building. *Nature* **513**:229-232.
- Laurance, W. F., B. M. Croes, L. Tchignoumba, S. A. Lahm, A. Alonso, M. E. Lee, P. Campbell, and C. Ondzeano. 2006. Impacts of Roads and Hunting on Central African Rainforest Mammals. *Conservation Biology* **20**:1251-1261.
- Laurance, W. F., M. Goosem, and S. G. W. Laurance. 2009. Impacts of roads and linear clearings on tropical forests. *Trends in Ecology & Evolution* **24**:659-669.
- Lonsdale, W. M., and A. M. Lane. 1994. Tourist Vehicles as Vectors of Weed Seeds in Kakadu-National-Park, Northern Australia. *Biological Conservation* **69**:277-283.

- Mathisen, K., A. Wójcicki, and Z. Borowski. 2018. Effects of forest roads on oak trees via cervid habitat use and browsing.
- Mertens, B., R. Pocard-Chapuis, M. G. Piketty, A. E. Lacques, and A. Venturieri. 2002. Crossing spatial analyses and livestock economics to understand deforestation processes in the Brazilian Amazon: The case of Sao Felix do Xingu in South Para. *Agricultural Economics* **27**:269-294.
- Mortensen, D. A., E. S. J. Rauschert, A. N. Nord, and B. P. Jones. 2009. The role of roads in plant invasions. *Invasive Plant Science and Management* **2**:191-199.
- Moser, B., J. Jaeger, U. Tappeiner, E. Tasser, and B. Eiselt. 2007. Modification of the effective mesh size for measuring landscape fragmentation to solve the boundary problem. *Landscape Ecology* **22**:447-459.
- National Research Council (U.S.). Committee on Ecological Impacts of Road Density. 2005. Assessing and managing the ecological impacts of paved roads. National Academies Press, Washington, D.C.
- Nord, A. N., D. A. Mortensen, and E. S. J. Rauschert. 2010. Environmental Factors Influence Early Population Growth of Japanese Stiltgrass (*Microstegium vimineum*). *Invasive Plant Science and Management* **3**:17-25.
- Olson, D. D., J. A. Bissonette, P. C. Cramer, A. D. Green, S. T. Davis, P. J. Jackson, and D. C. Coster. 2014. Monitoring Wildlife-Vehicle Collisions in the Information Age: How Smartphones Can Improve Data Collection. *PLOS ONE* **9**:e98613.
- Ouren, D. S., R. D. Watts, and A. W. Coffin. 2010. Beyond the pavement: Scientific methods for quantifying ecological responses to off-highway vehicle use. 95th ESA Annual Meeting, Pittsburgh, PA.
- Pratt, C., and B. G. Lottermoser. 2007. Mobilisation of traffic-derived trace metals from road corridors into coastal stream and estuarine sediments, Cairns, northern Australia. *Environmental Geology* **52**:437-448.
- Preisler, H. K., A. A. Ager, and M. J. Wisdom. 2013. Analyzing animal movement patterns using potential functions. *Ecosphere* **4**:art32.
- Psaralexi, M. K., N.-E. P. Votsi, N. Selva, A. D. Mazaris, and J. D. Pantis. 2017. Importance of Roadless Areas for the European Conservation Network. *Frontiers in Ecology and Evolution* **5**(2).
- Ramakrishna, D. M., and T. Viraraghavan. 2005. Environmental Impact of Chemical Deicers – A Review. *Water, Air, and Soil Pollution* **166**:49-63.
- Rauschert, E. S. J., D. A. Mortensen, O. N. Bjornstad, and A. N. Nord. 2008. The spread of *Microstegium vimineum* (Japanese stiltgrass), an invasive weed. 93rd Annual Meeting of the Ecological Society of America, Milwaukee, WI.
- Rew, L., M. Taper, F. Pollnac, T. Brummer, and H. Balbach. 2010. Dispersal of plant propagules by vehicles. in Society for Range Management and Weed Science Society of America, Denver, Colorado.
- Roedenbeck, I. A., L. Fahrig, C. S. Findlay, J. E. Houlahan, J. A. G. Jaeger, N. Klar, S. Kramer-Schadt, and E. A. Grift van der. 2007. The Rauschholzhausen agenda for road ecology. *Ecology and Society* **12**:11.
- Rytwinski, T., and L. Fahrig. 2013. Why are some animal populations unaffected or positively affected by roads? *Oecologia* **173**:1143-1156.
- Rytwinski, T., K. Soanes, J. A. G. Jaeger, L. Fahrig, C. S. Findlay, J. Houlahan, R. van der Ree, and E. A. van der Grift. 2016. How Effective Is Road Mitigation at Reducing Road-Kill? A Meta-Analysis. *PLOS ONE* **11**:e0166941.
- Rytwinski, T., R. van der Ree, G. M. Cunnington, L. Fahrig, C. S. Findlay, J. Houlahan, J. A. G. Jaeger, K. Soanes, and E. A. van der Grift. 2015. Experimental study designs to improve the evaluation of road mitigation measures for wildlife. *Journal of Environmental Management* **154**:48-64.
- Schuler, M. S., W. D. Hintz, D. K. Jones, L. A. Lind, B. M. Mattes, A. B. Stoler, K. A. Sudol, and R. A. Relyea. 2017. How common road salts and organic additives alter freshwater food webs: in search of safer alternatives. *Journal of Applied Ecology* **54**:1353-1361.
- Selva, N., S. Kreft, V. Kati, M. Schluck, B.-G. Jonsson, B. Mihok, H. Okarma, and P. Ibisch. 2011. Roadless and Low-Traffic Areas as Conservation Targets in Europe. *Environmental Management* **48**:865-877.
- Selva, N., A. Switalski, S. Kreft, and P. Ibisch. 2015. Why Keep Areas Road-Free? The Importance of Roadless Areas. Pages 16-26 in R. van der Ree, D. J. Smith, and C. Grilo, editors. Handbook of Road Ecology.
- Siegert, N. W., D. G. McCullough, A. M. Liebhold, and F. W. Telewski. 2014. Dendrochronological reconstruction of the epicentre and early spread of emerald ash borer in North America. *Diversity and Distributions* **20**:847-858.

- Siegert, N. W., R. J. Mercader, and D. G. McCullough. 2015. Spread and dispersal of emerald ash borer (Coleoptera: Buprestidae): estimating the spatial dynamics of a difficult-to-detect invasive forest pest. *The Canadian Entomologist* **147**:338-348.
- Smith III, T. J., H. Hudson, M. B. Robblee, G. V. N. Powell, and P. J. Isdale. 1989. Freshwater Flow from the Everglades to Florida Bay: A Historical Reconstruction Based on Fluorescent Banding in the Coral *Solenastrea bournoni*. *Bulletin of Marine Science* **44**:274-282.
- Soanes, K., A. C. Taylor, P. Sunnucks, P. A. Vesk, S. Cesarini, and R. van der Ree. 2018. Evaluating the success of wildlife crossing structures using genetic approaches and an experimental design: Lessons from a gliding mammal. *Journal of Applied Ecology* **55**:129-138.
- Sollenberger, L. E., K. R. Woodard, J. M. Vendramini, J. E. Erickson, K. A. Langeland, M. K. Mullenix, C. Na, M. S. Castillo, M. Gallo, C. D. Chase, and Y. López. 2014. Invasive Populations of Elephantgrass Differ in Morphological and Growth Characteristics from Clones Selected for Biomass Production. *BioEnergy Research* **7**:1382-1391.
- Sosa-Pérez, G., and L. H. MacDonald. 2017. Reductions in road sediment production and road-stream connectivity from two decommissioning treatments. *Forest Ecology and Management* **398**:116-129.
- Spanowicz, A. G., and J. A. G. Jaeger. 2019. Measuring landscape connectivity: On the importance of within-patch connectivity. *Landscape Ecology* **34**:2261-2278.
- Stiles, J. H., and R. H. Jones. 1998. Distribution of the red imported fire ant, shape *Solenopsis invicta*, in road and powerline habitats. *Landscape Ecology* **13**:335-346.
- Sullivan, J. J., P. A. Williams, S. M. Timmins, and M. C. Smale. 2009. Distribution and spread of environmental weeds along New Zealand roadsides. *New Zealand Journal of Ecology* **33**:190-204.
- Sunnucks, P., and N. Balkenhol. 2015. Incorporating Landscape Genetics into Road Ecology. Pages 110-118 in R. van Der Ree, D. J. Smith, and C. Grilo, editors. *Handbook of Road Ecology*.
- Tigas, L. A., D. H. Van Vuren, and R. M. Sauvajot. 2002. Behavioral responses of bobcats and coyotes to habitat fragmentation and corridors in an urban environment. *Biological Conservation* **108**:299-306.
- Trombulak, S. C., and C. A. Frissell. 2000. Review of ecological effects of roads on terrestrial and aquatic communities. *Conservation Biology* **14**:18-30.
- U.S. Department of Commerce, U.S. Census Bureau, Geography Division. 2014. TIGER/Line Shapefile, 2014, 2010 nation, U.S., 2010 Census Urban Area National. in U.S. Department of Commerce, U.S. Census Bureau, Geography Division, Editor, <ftp://ftp2.census.gov/geo/tiger/TIGER2014/UAC/>.
- Urban, M. C., B. L. Phillips, D. K. Skelly, and R. Shine. 2008. A toad more traveled: The heterogeneous invasion dynamics of cane toads in Australia. *American Naturalist* **171**:E134-E148.
- US EPA (US Environmental Protection Agency). 1993. *Guidance Specifying Management Measures for Sources of Nonpoint Pollution in Coastal Waters.*, Washington, DC.
- van der Grift, E. A., R. van der Ree, L. Fahrig, S. Findlay, J. Houlahan, J. A. G. Jaeger, N. Klar, L. F. Madrinan, and L. Olson. 2013. Evaluating the effectiveness of road mitigation measures. *Biodiversity and Conservation* **22**:425-448.
- van der Ree, R., J. A. G. Jaeger, E. A. van der Grift, and A. P. Clevenger. 2011. Special Feature: Effects of Roads and Traffic on Wildlife Populations and Landscape Function. *Ecology and Society* **16**(1):48.
- van der Ree, R., D. J. Smith, and C. Grilo. 2015. *Handbook of Road Ecology*. John Wiley & Sons.
- van Strien, M., K. Axhausen, I. Dubernet, A. Guisan, A. Grêt-Regamey, A. Khiali-Miab, D. Ortiz Rodriguez, and R. Holderegger. 2018. Models of Coupled Settlement and Habitat Networks for Biodiversity Conservation: Conceptual Framework, Implementation and Potential Applications.
- Verburg, P., K. Kok, R. Pontius, and A. Veldkamp. 2008. Modeling Land-Use and Land-Cover Change.
- Wang, G., X. Yan, F. Zhang, C. Zeng, and D. Gao. 2014. Traffic-Related Trace Element Accumulation in Roadside Soils and Wild Grasses in the Qinghai-Tibet Plateau, China. *International Journal of Environmental Research and Public Health* **11**:456.
- Weiss, S. B. 1999. Cars, cows, and checkerspot butterflies: Nitrogen deposition and management of nutrient-poor grasslands for a threatened species. *Conservation Biology* **13**:1476-1486.
- Werkenthin, M., B. Kluge, and G. Wessolek. 2014. Metals in European roadside soils and soil solution – A review. *Environmental Pollution* **189**:98-110.

Wisdom, M. J., A. A. Ager, H. K. Preisler, N. J. Cimon, and B. K. Johnson. 2004. Effects of off-road recreation on mule deer and elk. *Transactions of the 69th North American Wildlife and Natural Resources Conference*: 531-550.

Yan, X., D. Gao, F. Zhang, C. Zeng, W. Xiang, and M. Zhang. 2013. Relationships between Heavy Metal Concentrations in Roadside Topsoil and Distance to Road Edge Based on Field Observations in the Qinghai-Tibet Plateau, China. *International Journal of Environmental Research and Public Health* **10**:762.

Zehetner, F., U. Rosenfellner, A. Mentler, and M. H. Gerzabek. 2009. Distribution of Road Salt Residues, Heavy Metals and Polycyclic Aromatic Hydrocarbons across a Highway-Forest Interface. *Water Air and Soil Pollution* **198**:125-132.

Zhang, H., Z. Wang, Y. Zhang, M. Ding, and L. Li. 2015. Identification of traffic-related metals and the effects of different environments on their enrichment in roadside soils along the Qinghai-Tibet highway. *Science of The Total Environment* **521-522**:160-172.

## SOBRE ISSUES IN ECOLOGY

*Issues in Ecology* utiliza un lenguaje común para comunicar el consenso de un grupo de expertos científicos sobre cuestiones relacionadas con el medio ambiente. El texto de *Issues in Ecology* es revisado en cuanto a su contenido técnico por revisores expertos externos y todos los informes deben ser aprobados por la editora jefe antes de su publicación. Este informe es una publicación de Ecological Society of America. La ESA y los editores de *Issues in Ecology* no asumen ninguna responsabilidad por las opiniones expresadas por los autores de este informe.

### EDITORA JEFE

Serita Frey, Department of Natural Resources & the Environment, University of New Hampshire, [serita.frey@unh.edu](mailto:serita.frey@unh.edu)

### CONSEJO ASESOR DE TEMAS DE ECOLOGÍA

Jessica Fox, Electric Power Research Institute

Noel P. Gurwick, Smithsonian Environmental Research Center

Clarisse Hart, Harvard Forest

Duncan McKinley, USDA Forest Service

Sasha Reed, U.S. Geological Survey

Amanda D. Rodewald, Cornell Lab of Ornithology

Thomas Sisk, Northern Arizona University

### COPIAS ADICIONALES

Este informe y todos los números anteriores de *Issues in Ecology* están disponibles de manera gratuita en formato electrónico en:

<https://www.esa.org/publications/issues/>

Los ejemplares impresos pueden solicitarse en línea o poniéndose en contacto con la ESA:

Ecological Society of America, 1990 M Street NW, Suite 700, Washington, DC 20036

202-833-8773, [esahq@esa.org](mailto:esahq@esa.org)

