

Infraestructuras, hábitats y biodiversidad

MIGUEL DELIBES DE CASTRO

Estación Biológica de Doñana.
Avda. María Luisa, s/n, 41013 Sevilla.
mdelibes@ebd.csic.es

La sociedad necesita infraestructuras, las infraestructuras modifican los hábitats naturales, y los cambios en los hábitats naturales afectan a la biodiversidad. La decisión de ejecutar o no una obra de infraestructura dependerá del grado en que los beneficios obtenidos compensen a la afección producida. Generalmente los beneficios son bien conocidos (llegar antes a tal sitio, acceder a tales recursos, almacenar agua dulce...) y se cuantifican económicamente, pero las afecciones y el modo de valorarlas lo son mucho menos. Ello hace muy difícil la toma de decisiones, puesto que se contraponen valores medidos de distinto modo. Pero incluso una vez que la decisión positiva se ha tomado, en todos los casos deberán minimizarse los efectos perniciosos. En consecuencia, tanto a la hora de decidir como a la hora de ejecutar una obra es importante: a) la percepción del valor de la biodiversidad, b) la aceptación de una relación entre los cambios en el hábitat y la pérdida de biodiversidad, y c) el conocimiento de los mecanismos que hacen posible ese efecto (de los cambios de hábitat sobre la biodiversidad). En esta comunicación dedicaré un pequeño espacio a las dos primeras cuestiones, y algo más a la tercera.

1. EL VALOR DE LA BIODIVERSIDAD

Es ya un tópico referirse a la frase en la que Machado aludía a «los necios que confunden valor y precio». Distintas escuelas económicas han intentado, de distintas maneras, estimar cuántos euros vale un oso, o un lince, o una cigüeña negra. Las conclusiones sólo coinciden en una cosa: no tienen un precio en dinero, es cierto, pero valen más de lo que creemos. Un estudio célebre en Inglaterra consistió en preguntar a los habitantes de un condado cuánto estaban dispuestos a pagar anualmente (sumándolo a sus impuestos) por conservar nutrias en su territorio. Las cifras resultantes asombraron: el 81% de los contribuyentes estaba dispuesto a aportar entre una y cinco libras por año y la suma total ascendería a 1.600 millones de pesetas (de las de hace varios años). Hay muchos estudios con resultados parecidos, lo que quiere decir que la sociedad industrializada valora en gran medida, al menos, a las especies más carismáticas.

Aunque menos conocido, el valor de uso de la biodiversidad es muy importante. No sólo para el consumo directo, de gran importancia en los países menos desarrollados, sino también para medicamentos y pesticidas que usamos todos. Según la Organización Mundial de la Salud, más de la mitad de la humanidad depende para su asistencia sanitaria primaria de medicinas obtenidas directamente de las plantas. En nuestro mundo desarrollado, por encima de la cuarta parte de las recetas se refieren a medicamentos que incluyen compuestos químicos de plantas, aunque una vez conocidos muchos de ellos se sintetizan en el laboratorio. Los veinte fármacos más vendidos en Estados Unidos están basados en sustancias descubiertas originalmente en especies silvestres y su valor de venta anual supera los 6.000 millones de dólares (más de un billón de pesetas). Y además, ¿cuántos secretos útiles no esconderán muchas es-

pecies que hoy no parecen servir para nada? Cada vez que perdemos una especie silvestre hipotecamos un poquito el futuro.

Con todo, el mayor valor de la biodiversidad procede de los servicios que nos presta, haciendo el mundo habitable. Han sido llamados «servicios ecosistémicos» e incluyen (según una relación elaborada por el profesor Constanza y sus colaboradores) al menos: regulación de los gases atmosféricos, regulación del clima, amortiguación de las perturbaciones (inundaciones, sequías, etc), regulación de los flujos hidrológicos, almacenamiento y retención de agua dulce, control de la erosión y retención de sedimentos, formación de suelo, mantenimiento de los ciclos de nutrientes, degradación de los residuos, polinización, control biológico de las poblaciones, refugio para poblaciones explotadas (o no), producción de alimentos, aportación de materias primas, aportación de recursos genéticos, fuente de recreo, y fuente de bienes culturales. Es imposible calcular cuánto valdrían estos servicios si hubiera que pagarlos, pero el citado profesor Constanza ha estimado que, por lo bajo, es el doble del Producto Global Bruto (es decir, el doble de la suma de todos los bienes y servicios producidos y comprados en todo el mundo).

Se podrá argumentar que la pérdida de esta o aquella especie no va a alterar la prestación de los servicios ecosistémicos. No lo sabemos. Lo único que podemos afirmar, hoy por hoy, es que la biosfera funciona mejor con más especies, y que el número de las que se están perdiendo es muy elevado. ¿Cuántas más podemos perder sin que el «ecosistema global» pierda su homeostasis, o capacidad de control? Los científicos piensan que en la Tierra vivimos entre ocho y treinta millones de especies, pero que cada año se están perdiendo entre 10.000 y 30.000. Estos valores son propios de un periodo de extinción masiva como el del final del Secundario.

2. HÁBITAT Y BIODIVERSIDAD

Es posible pensar que muchas especies desaparecen porque se las mata, o porque se las comen otras, o, simplemente, porque les toca desaparecer. Que las afecciones a los hábitats, en definitiva, no deben tener un gran papel en la actual ola de extinción. Es cierto que hay ejemplos para todos los gustos, y también que muchas veces unas causas y otras se entremezclan hasta el extremo de que no es posible asignar la responsabilidad a una o a otra. En una frase que hizo fortuna, el biólogo Jared Diamond se refirió al «Cuarteto del Mal» (que podemos asimilar a nuestros «Cuatro Jinetes del Apocalipsis») para caracterizar a los agentes responsables de las extinciones. Se trataría de la mortandad abusiva, la destrucción del hábitat, las especies introducidas y las cadenas de extinciones.

Todo el mundo entiende bien lo de la mortandad abusiva. Las ballenas llegaron al borde de la extinción porque se las sobrexplotó. En una situación pa-

recida están muchas pesquerías. Los osos desaparecieron de Los Alpes porque los mataron, ya que perjudicaban al ganado y asustaban a la gente. Hace tiempo se extinguieron las cabras monteses del noroeste ibérico porque fueron cazadas en exceso. También sabemos que acabaremos con un bosque si cortamos los árboles sin dejarles renovarse. No necesitamos aprender a relacionar el nivel de explotación con la supervivencia; está en nuestros genes; llevamos, como especie, cientos de miles de años haciéndolo.

Los restantes «jinetes» son, en cambio, menos evidentes, al menos para nuestra intuición. Se puede aceptar que los gatos introducidos han acabado con muchas especies de aves en islas remotas; estas especies eran «ingenuas», no se escondían ni buscaban defenderse del depredador, pues nunca en su historia evolutiva lo habían visto y no lo temían. Pero ¿a quién se le ocurre una cosa así, sin estar previamente informado, cuando ve un gato en la isla de Gran Canaria? Y eso que el sueco Torbjörn Ebenhard, que ha pasado revista al efecto sobre la fauna y flora nativas de numerosas introducciones de especies exóticas, ha llegado a afirmar: «el gato doméstico es el depredador más peligroso jamás introducido por el hombre». Antes de dejar el tema hay que hacer, cuando menos, una mención al papel de algunas infraestructuras beneficiando a especies exóticas colonizadoras. El más evidente es el caso de los canales que conectan distintas cuencas y permiten que pasen especies dulceacuícolas de unos ríos a otros, pero también las carreteras cumplen el papel de vías de invasión. Luego veremos algún caso más sutil, pero cabe recordar que sólo con la reparación de un camino de tierra en Doñana se generó hace unos años una pequeña comunidad de plantas invasoras, cuyos propágulos habían llegado con los áridos necesarios para la obra.

Si es poco intuitivo el efecto pernicioso de las especies introducidas, menos aun lo es el de las cadenas de extinciones. Como ocurrió en Gran Bretaña, puede suceder que un pesticida por lo demás inocuo acabe con los pulgones. Sin pulgones, desaparecen las hormigas que se alimentaban ordeñándolos. Sin hormigas, los pollitos de perdiz pardilla no encuentran suficiente alimento en sus primeras dos semanas de vida y desaparecen también. ¡Hace falta mucha información para relacionar el aficida inocuo para los no-pulgones con la escasez de perdices!. Algún autor ha reclamado que como todas las especies están relacionadas ecológicamente con otras, por cada una que desaparece acaban haciéndolo decenas de otras, antes o después.

Pero nos falta repasar un cuarto «jinete», que es el que nos ocupa. ¿Hasta qué extremo es destacado el papel de la destrucción y alteración del hábitat en el proceso actual de extinciones? Los expertos están casi por completo de acuerdo: se trata del factor de riesgo más importante. Se podrá estar o no de acuerdo, pues como ya he señalado es difícil, con frecuencia, concretar en una las causas que llevan a una especie a la desaparición, pero incluso si hay errores, las magnitudes son reveladoras: según un estudio de Georgina M. Mace y Andrew Balmford casi el 50% de las especies amenazadas de mamíferos lo es-

tán por alteraciones de su hábitat. El porcentaje es solamente un poco inferior en el caso de las aves y, aunque desconocido, sin duda muy superior para los invertebrados.

La razón para que el deterioro del hábitat sea tan grave es que puede tener efectos muy importantes incluso si ocurre a niveles reducidos. Nadie discutirá que si destruimos diez mil kilómetros cuadrados de selva tropical desaparecerán con ella un gran puñado de especies. Pero es menos claro que si apenas destruimos nada, pero dividimos los diez mil kilómetros cuadrados en cien parcelas de cien kilómetros cada una, podemos acabar asimismo con gran número de especies. Reconocerán conmigo que si partimos en cien trozos un billete de diez mil pesetas no hemos «perdido billete», pero lo que queda no es lo mismo. Pues otro tanto ocurre con los hábitats. Ello puede ser relevante a la hora de evaluar y minimizar el impacto de las infraestructuras, ya que a veces se perjudica a la biodiversidad solamente porque no se es consciente de que se podrían hacer las cosas de otra manera. Analizaremos, pues, a través de qué procesos puede ser alterado el hábitat perjudicando a la flora y fauna silvestres.

3. DESTRUCCIÓN, ALTERACIÓN Y FRAGMENTACIÓN DEL HÁBITAT

La destrucción directa del hábitat es un importante motivo de extinciones. Transformando un bosque en un campo de maíz, o una estepa en una plantación de pinos, acabaremos muy probablemente con los osos, en el primer caso, y con los sisones y alcaravanes, en el segundo. Pero es algo tan evidente que no merece la pena discutirlo mucho: haciendo una carretera, o embalsando un río, una parte del hábitat original se pierde. Leía no hace mucho que en el mundo hay ya casi medio millón de kilómetros cuadrados inundados por embalses, lo que representa una superficie considerable por sí misma. Pero como es bien sabido, la pérdida directa de hábitat no es el único efecto del embalse sobre el hábitat fluvial (de hecho, hay más agua, y podría pensarse que la cantidad de hábitat idóneo se ha incrementado; así se contempla en algunas promociones en el entorno de presas, que se refieren a los «valores ecológicos generados»). Los efectos reales son más y van más lejos.

3.1. La calidad del hábitat

Normalmente hay que tener en cuenta tres elementos diferentes, a la hora de hablar de las perturbaciones del hábitat y su efecto sobre la biodiversidad: la calidad del hábitat, la cantidad de hábitat y su situación en relación con otras parcelas semejantes. Cuando el hábitat se destruye por completo, como decíamos antes, no tiene sentido el análisis, pero en situaciones normales las obras de infraestructura (o cualquier otro factor) influirán de distinto modo en

uno o varios de estos tres elementos. Si seguimos con el caso del embalse, por ejemplo, la calidad del hábitat fluvial se verá muy modificada aguas abajo de la presa ya que, entre otras cosas, llegarán menos nutrientes, la temperatura del agua tenderá a bajar y uniformizarse, el régimen de flujo también será distinto, la ausencia de limos en suspensión, retenidos en el pantano, podrá afectar a la propia estructura y ubicación del cauce... Aguas abajo de la presa del Cañón de Glen, en el río Colorado, el agua pasó de oscilar estacionalmente entre 0° y 27°C, antes de su construcción, a una temperatura casi constante de 8°C después; a ello se atribuye la mayor responsabilidad en la extinción de al menos tres especies de peces, mientras que otras cinco se encuentran en grave peligro.

Con frecuencia, también, la calidad del hábitat se ve modificada, incluso si es de una forma indirecta y poco evidente, en las inmediaciones de la infraestructura. El agua que fluye desde los embalses suele ser de peor calidad que la que llega a ellos desde el río, por ejemplo. Algunos casos son todavía más llamativos. Un estudio muy reciente ha permitido comprobar que las ratas comunes, invasoras de las Islas Canarias, tienden a ser más frecuentes cerca de las carreteras, y utilizan éstas para avanzar en el proceso de colonización de algunas islas: allí donde no llegan las carreteras, es difícil que lleguen las ratas. Se puede argüir que en este caso el efecto es, con toda probabilidad, indirecto: cerca de la carretera hay más restos de comida de origen humano, por ejemplo. Es completamente cierto, pero no lo es menos que se trata de una alteración del hábitat que sin la carretera no se hubiera producido (en este sentido son muy frecuentes los estudios que demuestran que la densidad de carreteras asfaltadas es un magnífico predictor de la presencia/ausencia de especies raras, como, por ejemplo, el lobo, en Norteamérica; no se trata tanto de que la carretera los mate como de que la abundancia de vías de acceso origina invariablemente un cambio en la calidad del hábitat, que se humaniza). En el mismo sentido, carreteras y urbanizaciones han «ayudado» a ciertas especies domésticas a contactar con especies silvestres, a las que han transmitido enfermedades; así parece haber ocurrido con la rabia y el moquillo, transmitidas con funestas consecuencias desde los perros domésticos a los licaones o perros cazadores africanos.

Otro caso claro de deterioro del hábitat, aunque apenas lo vamos a tocar aquí, es la contaminación. De todos modos, no puede ignorarse que los embalses pueden funcionar como reservorios de contaminantes, por ejemplo, o que la contaminación química transmitida por el aire y la contaminación acústica se incrementan cerca de las carreteras.

3.2. La fragmentación del hábitat

La fragmentación de los hábitats naturales está considerada como uno de los factores mas insidiosos produciendo pérdidas de biodiversidad, y puede re-

lacionarse directamente con las infraestructuras. Por un lado, la fragmentación provoca reducciones de la cantidad total de hábitat disponible (ya lo hemos mencionado), pero por otro, y sobre todo, da lugar a «parches» de pequeño tamaño (fragmentación en sentido estricto) donde actúan distintas fuerzas que incrementan directamente la vulnerabilidad de las especies.

Los parches de pequeño tamaño pueden ser incapaces de mantener a largo plazo una población, por distintas razones. La más evidente es que en el parche «no quepan» suficientes individuos o, dicho de otra manera, que el hábitat disponible no ofrezca los recursos necesarios para sustentar una población mínima. Cuando se construyó el Canal de Panamá se formó artificialmente la isla de Barro Colorado, cuya biodiversidad ha sido estudiada rutinariamente desde entonces. Muchas especies, sobre todo los grandes depredadores, han desaparecido, pues en la isla no hay recursos suficientes para mantener ni siquiera una pareja. A otras escalas puede ocurrir algo parecido: Una familia de osos a la que rastreamos en la Cordillera Cantábrica, por ejemplo, nunca fue localizada en bosquetes menores de cuatro hectáreas, y en cambio lo fue con una frecuencia desproporcionada en las masas forestales mayores de cincuenta hectáreas.

Más común es que sí que quepa una pequeña población, pero estas pequeñas poblaciones son muy vulnerables por razones principalmente estocásticas. Les afectan mucho el azar ambiental (un mal año, un incendio, una inundación...), factores demográficos de tipo aleatorio (proporción de sexos al nacer o al morir, por ejemplo) y riesgos de tipo genético (deriva genética, endogamia...). Algunos grandes embalses constituyen barreras para la nutria, que o bien no supera la presa o bien evita las orillas desnudas de la masa de agua. Pues bien, en cuencas mediterráneas la porción de río que queda aguas arriba del embalse es con alguna frecuencia demasiado pequeña para mantener una población de nutrias, única razón que explica que no pueda encontrarse a la especie allí.

Otros factores de importancia afectan a las poblaciones «encerradas» en pequeños fragmentos de hábitat. Por ejemplo, la influencia del exterior sobre los fragmentos, a través de lo que se han denominado efectos de borde, es muy grande, y puede tener consecuencias difíciles de prever, tanto en la interfase entre un medio y otro como muy dentro del propio fragmento. Y también ocurre que la distancia, o las dificultades de comunicación, entre distintos fragmentos, hacen imposible que animales o plantas viajen de unos a otros, con lo cual dejan de formar un sistema interactuante que tiende a equilibrarse. La consecuencia es que cuanto más pequeños y más aislados son los fragmentos de hábitat conservados, menos especies podrán albergar. A este respecto, las obras de infraestructura son bien conocidas tanto por fragmentar el territorio como por generar barreras que dificultan el movimiento entre unas manchas de hábitat y otras.

3.3. EL EFECTO BARRERA

Decíamos previamente que eran importantes la calidad del hábitat, la cantidad de hábitat y el lugar en el que ese hábitat se hallara. ¿Qué quiere decir esta última afirmación? Pues simplemente que pueden existir hábitats muy favorables, pero que si están en un mal lugar, al que no se puede acceder, por ejemplo, nunca serán ocupados. La consecuencia, en ese caso, es que funcionan en la práctica como hábitats destruidos.

Fauna y flora encuentran dificultades para acceder a determinadas zonas porque topan con barreras que les impiden el paso. Parte de esas barreras son naturales (una estepa es una barrera para un mamífero forestal) y otras, aunque artificiales, están de algún modo incorporadas al paisaje y el territorio (como las grandes superficies cultivadas desde hace siglos). Existen, no obstante, obstáculos físicos que impiden el desplazamiento de animales y plantas y son de origen reciente. Con mucha frecuencia, las consecuencias de estas barreras van mucho más allá de lo que cabría prever dadas sus dimensiones. Las presas de los embalses (y volvemos a nuestro caso «modelo») son casi siempre barreras infranqueables para los peces migradores. Ello ha provocado en el último medio siglo la desaparición de las anguilas de toda la España interior, y con ella cambios importantes en la ecología de todos los sistemas fluviales.

El efecto barrera de algunas infraestructuras lineales ha merecido mucha atención. En lugar de repetir aquí cosas ya dichas, incluyo como Anexo un artículo reciente sobre el tema.

4. CONCLUSIONES

1. La biodiversidad tiene un valor importante, incluso económico, para las sociedades humanas, y merece ser conservada.
2. La destrucción y alteración de los hábitats es hoy por hoy el factor de riesgo más importante para la biodiversidad.
3. Las obras de infraestructura tienen un papel destacado en la modificación de los hábitats, tanto alterándolos directamente, como fragmentándolos o generando barreras que dificultan o impiden el movimiento de fauna y flora.
4. Estos efectos negativos deben ser considerados, tanto en el momento de decidir sobre la oportunidad o no de ejecutar una obra, como después, si se ejecuta, para minimizarlos.
5. Sólo un conocimiento preciso de los mecanismos mediante los que las infraestructuras afectan a la biodiversidad puede permitir reducir al mínimo los efectos negativos. Ello requiere incrementar la investigación en ese campo.

Anexo

El efecto barrera de infraestructuras lineales sobre los vertebrados*

ALEJANDRO RODRÍGUEZ*, GIULIA CREMA** Y MIGUEL DELIBES***

* Doctor en Biología e investigador.

** Biólogo Naturalista.

*** Departamento de Biología Aplicada.
Estación Biológica de Doñana.

Amplios sectores sociales, o al menos sus representantes políticos, insisten en que el número de infraestructuras del transporte, fundamentalmente carreteras, y el de grandes obras públicas, básicamente embalses, es insuficiente en gran parte del país. La reclamación de nuevas obras va acompañada de una lista de sus beneficios, en términos no sólo de desarrollo económico sino también de empleo y bienestar. A estas ventajas, por otra parte no siempre unánimemente admitidas, pocas veces se contraponen los efectos negativos de las infraestructuras sobre la población humana y sus importantes impactos sobre el medio natural. En el presente artículo tratamos uno de esos impactos, el efecto barrera, y sus consecuencias sobre los vertebrados terrestres. Los conceptos revisados pueden ser útiles en la evaluación del impacto de obras ya proyectadas o construidas, así como en la determinación de los costes ambientales de futuros proyectos.

EL EFECTO BARRERA

Respecto a la vida silvestre, la consecuencia principal de la instalación de estructuras lineales es la división del espacio, de forma que la fauna se ve obligada a cruzarlas para acceder a los recursos que utilizaba antes del establecimiento de la línea.

En ecología se denomina barrera a una discontinuidad notable de hábitat, generalmente coincidente con un accidente geográfico, que impide la expansión de determinadas especies. El obstáculo parcial o total al libre tránsito de la

* Una versión sólo ligeramente modificada de este artículo ha sido publicada en *Quercus* (167: 22-27; 2000) por los dos primeros autores.

vida silvestre por parte de una estructura lineal es conocido como efecto barrera, porque la estructura puede funcionar como un caso particular de barrera ecológica.

El factor principal que condiciona la funcionalidad de las barreras biogeográficas es generalmente su extensión. Una especie terrestre que no pueda vivir a una altitud superior a los 400 m, o que no nade, difícilmente podrá cruzar los Pirineos o el Amazonas, respectivamente, aunque quizá sí lo haga a través de sierras menos espesas o ríos más estrechos, aprovechando coyunturas favorables. Algunas estructuras no lineales de origen humano, como las campiñas agrícolas, funcionan como barrera bajo el mismo principio de vastedad. Se ha sugerido, por ejemplo, que la pérdida de contacto entre poblaciones de lince ibérico (*Lynx pardinus*) que habitan las cadenas montañosas del sur de la Península Ibérica se debe a las grandes extensiones de cultivo que ocupan los valles de los ríos principales (1).

La eficacia aisladora de las barreras lineales artificiales es a veces tan alta como la de las biogeográficas, aunque las primeras son de menor entidad. El efecto barrera se debe básicamente a tres mecanismos: un aumento de la resistencia a los movimientos de los animales, una pérdida de la calidad de su hábitat en el área de influencia de la estructura, y una menor supervivencia individual en la infraestructura o cerca de ella. Estos mecanismos operan sobre los individuos, pero a menudo pueden tener consecuencias relevantes para muchas poblaciones animales.

MECANISMOS IMPLICADOS EN EL EFECTO BARRERA

Resistencia a los movimientos

La mayoría de las barreras de dimensiones moderadas ejercen una permeabilidad selectiva: unas especies pueden cruzarla y otras no. En casos extremos, las infraestructuras lineales pueden ser totalmente impermeables a los movimientos de algunos animales a su través. Un ejemplo clásico es el de las grandes presas y algunas especies de fauna acuática. Un desnivel en el cauce de un río asociado a una falla puede resolverse en una sucesión de cascadas utilizable por los salmones para llegar al tramo alto donde han de desovar. Un desnivel artificial, como una presa, si no simula la solución natural de las cascadas, impide el paso de los peces. Puesto que los salmones no pueden dar saltos de decenas de metros para salvar el desnivel del muro de contención, la barrera funciona en este caso por un mecanismo de impedimento físico.

Afortunadamente, muchos vertebrados son físicamente capaces de superar la mayoría de las estructuras lineales artificiales. Sin embargo, en grupos con sistema nervioso evolucionado y comportamientos complejos, particularmente mamíferos y aves, esas estructuras y/o su uso provocan una

respuesta conductual que se manifiesta en forma de una fuerte aversión a cruzarlas o aproximarse a ellas, aparentemente porque son percibidas por los animales como una fuente de riesgo real para su supervivencia o su éxito reproductivo. En ocasiones, la respuesta conductual es tan fuerte que el resultado puede equivaler a la impermeabilidad absoluta de la barrera. Ciervos, corzos y jabalíes, por ejemplo, tienen dificultades físicas para franquear las vallas laterales de autopistas o ferrocarriles, pero bien podrían utilizar los grandes puentes, los pasos superiores y las obras de drenaje suficientemente espaciosas disponibles a lo largo del trazado. Sin embargo, tanto en Cataluña (2) como en Montes de Toledo (3), se ha encontrado que las especies mencionadas tampoco cruzan las vías a través de estos pasos transversales como consecuencia de su repulsión a pasar por ellos. Marcadas respuestas comportamentales como éstas, que provocan un efecto barrera absoluto, se han registrado no sólo en ungulados sino también en micromamíferos (4) y en otros grupos de vertebrados.

Otras especies candidatas a sufrir aislamiento absoluto por barreras lineales son las que tienen requerimientos de hábitat muy estrictos. Esta respuesta constituye un caso particular de una evitación comportamental porque los animales deciden no salir de su hábitat óptimo, pero la causa última es de índole ecológica: la especie en cuestión tiene muchas dificultades para sobrevivir fuera del hábitat que selecciona. Por ejemplo, Mansergh y Scotts (5) estudiaron una especie muy escasa de ratón marsupial (*Burramys parvus*) que sólo se encuentra en pedrizas periglaciares de hábitats alpinos en el sureste de Australia. Sólo se conocen con certeza dos poblaciones de esta especie y la extensión total de pedrizas disponible en la región donde habita no excede de 12 km². El hábitat de una de estas poblaciones fue perturbado mediante la instalación de una estación de esquí. Con la construcción de varios edificios y una carretera se enterraron o levantaron varias pedrizas, de tal modo que una barrera de sólo 60 m de suelo desprovisto de roca impedía el movimiento de los ratones entre las pedrizas separadas. La conexión fue recuperada tras la restauración de la continuidad de las pedrizas a través de un túnel, lo que sugiere que la especificidad de hábitat de esta especie era el mecanismo por el que se producía el efecto barrera.

Sin embargo, en la mayor parte de las combinaciones de especies y barreras estudiadas, el grado de aislamiento no suele alcanzar cotas tan espectaculares: los movimientos transversales pueden ser reducidos en mayor o menor medida pero rara vez completamente inhibidos. Los mecanismos implicados en este tipo de efecto barrera relativo también son respuestas conductuales de aversión ante estímulos directos de las infraestructuras o ante estímulos indirectos mediados por elementos de hábitat negativamente seleccionados. En menor medida los mecanismos físicos también operan. Por ejemplo, estructuras lineales tan livianas como las cercas de los cotos de caza mayor impiden salir a la mayor parte de los ungulados silvestres que habitan dentro del recinto, pero con el tiempo, los jabalíes pueden practicar huecos bajo la malla en al-

gunos puntos, que pueden ser aprovechados por otras especies. De esta forma, la impermeabilidad de la cerca no es absoluta, al menos hasta que la malla sea fijada de nuevo al suelo. Cabe esperar un fenómeno similar en las vallas de las autopistas.

Ilustrando una respuesta puramente conductual, una fracción de los miles de caribúes (*Rangifer tarandus*) que realizan migraciones estacionales en la tundra de Alaska son reacios a cruzar un oleoducto de 2 m de diámetro y unos 600 km de longitud. Donde el tubo discurre en superficie supone una barrera formidable, pero en algunos tramos va elevado sobre el nivel del suelo, dejando espacio físico para los caribúes que, pese a ello, muestran una fuerte aversión a salvar el obstáculo (6). Como ejemplo de una respuesta mediada por la selección de hábitat, muchos carnívoros ibéricos de mediano tamaño tienden a cruzar ferrocarriles y autopistas a través de pasos que se encuentren en tramos forestados y, dentro de éstos, usan con más frecuencia los pasos que tienen cobertura arbustiva en o cerca de sus entradas (3,7,8).

Área de influencia

El uso de algunas infraestructuras lineales, particularmente carreteras y autopistas, ocasiona que la respuesta conductual de los animales se extienda lateralmente a cierta distancia. De este modo, el área perturbada se amplía y el efecto barrera a veces se potencia. Algunas poblaciones de vertebrados son especialmente sensibles y responden a niveles muy bajos de molestias. Por ejemplo, en respuesta al tráfico, los osos pardos (*Ursus arctos*) tienden a evitar un área de varios cientos de metros a ambos lados de carreteras muy poco frecuentadas y en comarcas sin núcleos permanentes de población humana (9). Los pumas (*Felis concolor*) se mantienen alejados de los vehículos, maquinaria, edificios, zonas iluminadas artificialmente (como carreteras con tráfico nocturno) y otros focos de actividad humana (10,11) a menudo ligados a las infraestructuras del transporte. Esta respuesta, compartida por muchas poblaciones de grandes carnívoros, resulta en una relación inversa entre la densidad de carreteras y la probabilidad de que la especie esté presente. A escala regional, esta relación se ha encontrado por ejemplo en el lobo (*Canis lupus*) (12) y en el lince ibérico (13). Incluso estructuras lineales artificiales tan poco sofisticadas como los senderos de montaña pueden generar un área de influencia negativa cuando son regularmente visitados. Es el caso de efectos documentados sobre osos y rebecos (*Rupicapra rupicapra*), atribuidos a actividades recreativas aparentemente inofensivas como el recorrido a pie de itinerarios en espacios naturales u otras formas blandas de turismo verde (14,15). Otro mecanismo bien conocido que genera un área de influencia a ambos lados de las carreteras, particularmente, las que soportan tráfico intenso, es el ruido. Los machos de muchas especies de aves paseriformes eluden ese área de influencia, generalmente como consecuencia de la alteración de la comunicación acústica entre individuos, que es esencial para es-

tablecer territorios durante la época de cría. La extensión del área de influencia es proporcional al nivel de ruido (16).

Todos estos ejemplos indican que muchas estructuras lineales van acompañadas de discontinuidades espaciales, artificialmente generadas, en la densidad de los vertebrados afectados. Dichas discontinuidades pueden suponer un obstáculo al libre contacto entre los individuos de una población y por tanto pueden considerarse una componente del efecto barrera asociado a las estructuras. El alcance del impacto del área de influencia depende de la carga de actividad humana que soporta la estructura y de la sensibilidad de las especies afectadas.

Mortalidad

La frecuencia de contacto entre individuos separados por estructuras lineales también disminuye si cruzarlas supone para cada uno de ellos un mayor riesgo de morir en el intento. Varios tipos de estructuras producen importantes mortandades en numerosas especies de vertebrados. Las líneas eléctricas de alta tensión son el origen de una fracción importante de la mortalidad no natural en aves de gran tamaño (17), como el águila imperial ibérica (*Aquila adalberti*; 18), que perecen por colisión o electrocución. Mamíferos de todos los tamaños mueren ahogados en las redes de canales que distribuyen el agua almacenada en grandes obras hidráulicas como el extremeño embalse de la Serena. Los atropellos de vertebrados terrestres en carreteras constituyen otro ejemplo típico. La probabilidad de que un animal muera en una de estas estructuras depende básicamente de los atributos técnicos de las mismas (p.ej. diseño de las torres de tendido eléctrico, caudal en los canales, velocidad de los vehículos que transitan por las carreteras) y de los hábitos de las especies afectadas. En el caso de las carreteras, Bennett (19) identifica tres grupos de riesgo compuestos por fracciones de la población de determinadas especies que, por sus hábitos, parecen ser más vulnerables a ser atropelladas: a) animales atraídos por el alimento, el refugio, la posibilidad de reproducción u otro recurso disponible en la carretera o en sus inmediaciones; b) animales que realizan movimientos regulares entre dos hábitats separados por la estructura lineal; y c) animales que crían cerca de las carreteras. El número de vertebrados muertos en sus encuentros con estructuras lineales dista de ser insignificante: sólo en carreteras, se barajan cifras del orden de un millón de vertebrados al día en países grandes como Estados Unidos, o de siete millones anuales de aves en un país como Bulgaria, con un parque móvil reducido respecto a los países occidentales (ver 19). En España, se ha estimado en unos 10 millones el número de vertebrados atropellados anualmente (20).

En algunas especies, también se producen incrementos en las tasas de mortalidad atribuidos a efectos inducidos por la presencia de carreteras. La muerte de los animales no se produce directamente por el contacto físico con la barrera, sino por los usos que ésta favorece. La colonización humana de áreas remotas provoca la aparición de nuevos conflictos con la fauna silvestre que a

menudo redundan en una nueva causa de mortalidad para las especies afectadas (21). Una mayor mortalidad inducida resulta asimismo del incremento de la presión cinegética legal e ilegal favorecida por la facilidad de acceso que proporcionan las carreteras (22).

CONSECUENCIAS DEL EFECTO BARRERA

Mediante los mecanismos descritos, algunos individuos fracasan en sus intentos de cruzar las estructuras lineales que encuentran a su paso. Las implicaciones que ello tiene dependen del proceso ecológico afectado por el efecto barrera que opera en cada caso, es decir, de la finalidad que incita a los animales a desplazarse al otro lado del obstáculo. Esa finalidad puede ser, entre otras, el patrullaje cotidiano del área de campeo, la reproducción, la migración o la dispersión juvenil. Una reducción del éxito individual producida por la barrera en la realización de esas funciones puede tener repercusiones en la población si una fracción significativa de los individuos que la componen se ve afectada y, además, no entran en juego los mecanismos de compensación que tienden a estabilizar el tamaño de población. Veamos algunos ejemplos de los cuatro procesos citados.

Se ha observado en turones, ginetas y varias especies de roedores (23) que los individuos ajustan los límites de sus áreas de campeo a los bordes de caminos y autopistas. Para un micromamífero, el riesgo de ser capturado por un predador en la superficie despejada de un camino probablemente afecta a la decisión de no incluirlo dentro de su área de campeo. Lo mismo puede decirse de una gineta y el riesgo de morir atropellada en la autopista vecina. Además, en ambos casos, puede resultar caro en términos energéticos englobar un espacio yermo que ha de ser regularmente utilizado en los movimientos diarios. La disposición de las áreas de campeo de los individuos residentes a uno u otro lado de una carretera da, sin embargo, una falsa idea de aislamiento poblacional, ya que los individuos dispersantes franquean el obstáculo con frecuencia similar a la observada en ausencia de barrera (23), y por tanto la conexión está asegurada.

Las barreras pueden originar problemas de encuentro entre individuos reproductores. Ya se han mencionado las dificultades de muchas especies de aves para establecer territorios junto a fuentes de ruido permanentes (16). En el estudio referido, como consecuencia de la pérdida de calidad del hábitat en el área de influencia de la autopista debido a la contaminación acústica, al menos el 60% de las especies de aves respondieron disminuyendo su densidad. Puesto que la reserva natural afectada en este ejemplo es pequeña y aislada, y la densidad de algunas especies se reduce a una distancia de la autopista de hasta 2800 m, es muy probable que la perturbación acústica afecte a las poblaciones locales de muchas de ellas.

Los anfibios dependen del agua para reproducirse. Las especies de hábitos terrestres, como los sapos, se trasladan en gran número durante la época de cría en busca de charcas temporales. En estos desplazamientos, si hay carreteras por medio, se producen importantes mortandades. Sin embargo, tanto en sapos como en otros vertebrados de pequeño tamaño y alto potencial reproductivo, las pérdidas por atropello pueden compensarse con mayores puestas o mayor supervivencia de huevos y larvas de los individuos que logran alcanzar las charcas. Sin quitar importancia al efecto nocivo de las carreteras sobre la migración estacional de los anfibios, sus consecuencias a escala poblacional suelen ser pequeñas comparadas con las que tendrían tasas de mortalidad similares en poblaciones de vertebrados con menor capacidad reproductiva.

Es el caso del lince ibérico, aunque el proceso afectado en la población de esta especie que habita en la comarca de Doñana es la dispersión juvenil. El fenómeno de la dispersión pone en contacto genético y demográfico núcleos de individuos residentes relativamente aislados, y es un proceso esencial para la estabilidad regional de la población. A pesar de la probada capacidad de muchos individuos para salvar infraestructuras lineales y otros obstáculos de mayor entidad, como anchas franjas cultivadas (24), el número de individuos que sobrevive a la fase de dispersión es muy reducido, debido entre otras causas a las muertes por atropello en las carreteras (25,24). El efecto barrera manifestado en la reducción de las tasas de inmigración juvenil puede ser relevante para una población tan pequeña como la de los lince de Doñana.

Los efectos barrera absolutos tienen consecuencias más serias, ya que casi invariablemente repercuten en la viabilidad poblacional, sobre todo en poblaciones que viven en paisajes fragmentados. Las barreras absolutas incrementan el grado de fragmentación de los hábitats e interrumpen procesos ecológicos vitales a escala del paisaje. Los resultados son los bien conocidos efectos de la aleatoriedad demográfica, ambiental y genética sobre la probabilidad de extinción de las poblaciones pequeñas y aisladas, que ya han sido resumidos con anterioridad en esta revista (26).

Por ejemplo, la supresión de la dispersión juvenil a causa de un aislamiento absoluto puede tener notables implicaciones demográficas. Desviaciones significativas de las proporciones de sexo o edad conducen a menudo a un declive del tamaño de población. Volviendo al caso de los ratones marsupiales (5), durante el periodo de aislamiento las proporciones de juveniles y machos eran anormalmente elevadas, debido a que la dispersión de machos adultos en época de cría (normal dentro del sistema social de esta especie) y la de los machos juveniles durante el resto del año, eran impedidas por la barrera. Esta alteración demográfica causaba una disminución del 21% en la supervivencia invernal de las hembras adultas respecto a una población no perturbada, ya que debían compartir recursos con los machos que, en condiciones normales, no deberían estar presentes.

SOLUCIONES

Tomando conciencia de la inevitabilidad de algunos efectos, como el de pequeñas carreteras apenas utilizadas que generan áreas de influencia sobre especies sensibles como grandes carnívoros, queda patente que la conservación de dichas especies pasa por mantener grandes áreas libres, o con una densidad muy baja, de carreteras. Esta tarea corresponde básicamente a las agencias de ordenación del territorio de las administraciones públicas. En segundo lugar, el conflicto entre la conservación de los vertebrados y las estructuras lineales se minimiza con la máxima eficacia cuando éstas se encuentran en la fase de proyecto: es evidente que la traza de un canal o un ferrocarril debe evitar las pocas zonas de alto valor ecológico que van quedando, en especial si afecta a hábitats escasos o a especies amenazadas. Tercero, si con todo el conflicto se produce, antes de decidir las soluciones técnicas más adecuadas es preciso identificar qué poblaciones y en qué modo resultan afectadas, y qué relevancia tienen esos efectos e escala local y regional, en función del estatus de hábitats y especies. De momento no hay recetas generalmente aplicables, por lo que cada impacto suele precisar estudios específicos. A este respecto cabe hacer dos consideraciones: 1) resulta llamativa la escasez de efectos barrera documentados en nuestro país -claramente es conveniente dedicar más atención a este asunto-, y 2) los estudios de impacto ambiental que informan de estructuras lineales necesitan plazos más largos para poder incorporar investigaciones específicas, y han de ser, además, interactivos con las decisiones acerca del trazado de dichas estructuras en lugar de recomendar, en el mejor de los casos, la menos mala de varias alternativas previamente fijadas. Por último, se han propuesto y ensayado numerosas soluciones técnicas (medidas correctoras) para mejorar la permeabilidad a los movimientos o reducir la mortalidad de vertebrados en diversos tipos de estructuras lineales, tales como modificaciones en los postes de tendidos eléctricos, diseño de pasos para fauna en infraestructuras del transporte, o adecuación de drenajes y otras obras transversales como pasos de fauna (2,3,17,27). Un seguimiento de la eficacia de esas medidas es fundamental para obtener pautas de respuesta por parte de los distintos grupos de vertebrados y generar criterios que puedan ser utilizados en la selección de la medida más adecuada.

BIBLIOGRAFÍA

- RODRÍGUEZ, A. Y DELIBES, M. (1990). *El lince ibérico (Lynx pardina) en España*. Distribución y problemas de conservación. Colección Técnica. ICONA, Madrid (1).
- ROSELL, C., PARPAL, J., CAMPENY, R., JOVÉ, S., PASQUINA, A. Y VELASCO, J.M. (1996). *Características que determinan la permeabilidad de las grandes infraestructuras viarias para el paso de la fauna. Aplicación al diseño de medidas correctoras*, pp. 765-768, en: III Simposio nacional sobre carreteras y medio ambiente. Asociación Técnica de Carreteras, Madrid (2).

- RODRÍGUEZ, A., CREMA, G. Y DELIBES, M. (1996). «Use of non-wildlife passages across a high speed railway by terrestrial vertebrates», *Journal of Applied Ecology*, 33: 1527-1540 (3).
- MADER, H. J. (1984). *Animal habitat isolation by roads and agricultural fields*. Biological Conservation, 29: 81-96 (4).
- MANSERGH, I.M. Y SCOTTS, D. J. (1989). «Habitat continuity and social organization of the mountain pygmy-possum restored by tunnel». *Journal of Wildlife Management*, 53: 701-707 (5).
- CURATOLO, J. A. Y MURPHY, S. M. (1986). «The effects of pipelines, roads, and traffic on the movements of caribou», *Rangifer tarandus*. Canadian Field-Naturalist, 100: 218-224 (6).
- RODRÍGUEZ, A., CREMA, G. Y DELIBES, M. (1997). «Factors affecting crossing of red foxes and wildcats through non-wildlife passages across a high-speed railway». *Ecography*, 20: 287-294 (7).
- ROSELL, C., PARPAL, J., CAMPENY, R., JOVÉ, S., PASQUINA, A. Y VELASCO, J.M. (1997). *Mitigation of barrier effect of linear infrastructures on wildlife*. Pp. 367-372, en: K. Canters (ed.), *Habitat fragmentation and infrastructure*. Ministry of Transport, Public Works and Water Management, Delft, Holanda (8).
- MCLELLAN, B.N. Y SHACKLETON, D.M. (1988). «Grizzly bears and resource-extraction industries: effects of roads on behaviour, habitat use and demography». *Journal of Applied Ecology*, 25: 451-460 (9).
- DYKE, F.G. VAN, BROCKE, R.H., SHAW, H.G., ACKERMAN, B.B., HEMKER, T.P. Y LINDZEY, F.G. (1986). «Reactions of mountain lions to logging and human activity». *Journal of Wildlife Management*, 50: 95-102 (10).
- BEIER, P. (1995). «Dispersal of juvenile cougars in fragmented habitat». *Journal of Wildlife Management*, 59: 228-237 (11).
- MECH, L.D., FRITTS, S.H., RADDE, G.L. Y PAUL, W.J. (1988). «Wolf distribution and road density in Minnesota». *Wildlife Society Bulletin*, 16: 85-87 (12).
- RODRÍGUEZ, A. (1997). *Fragmentación de poblaciones y conservación de carnívoros*. Tesis doctoral, Universidad Complutense de Madrid (13).
- MACE, R.D. Y WALLER, J.S. (1996). «Grizzly bear distribution and human conflicts in Jewel Basin Hiking Area, Swan Mountains, Montana». *Wildlife Society Bulletin*, 24: 461-467 (14).
- CEDERNA, A Y LOVARI, S. (1985). *The impact of tourism on chamois feeding activities in an area of the Abruzzo National Park, Italy*. Pp. 216-225, en: S. Lovari (ed.), *The biology and management of mountain ungulates*. Croom and Helm, London (15).
- REIJNEN, R., FOPPEN, R., TER BRAAK, C. Y THISSEN, J. (1995). «The effects of car traffic on breeding bird populations in woodland. III. Reduction of density in relation to the proximity of main roads». *Journal of Applied Ecology*, 32: 187-202 (16).
- NEGRO, J.J. (1987). «Adaptación de los tendidos eléctricos al entorno». *Mono-grafías de Alytes*, 1: 1-125 (17).
- CALDERÓN, J., CASTROVIEJO, J., GARCÍA, L. Y FERRER, M. (1988). *El águila im-*

- perial* (Aquila adalberti): dispersión de los jóvenes, estructura de edades y mortalidad. Doñana Acta Vertebrata, 15: 79-98 (18).
- BENNETT, A.F. (1991). «Roads, roadsides and wildlife conservation: a review». Pp. 99-118, en: Saunders, D.A. y Hobbs, R.J. (eds.), Nature conservation 2: the role of corridors. Surrey Beatty & Sons, Chipping Norton (19).
- LÓPEZ REDONDO, J. (editor) (1992). *I Jornadas para el estudio y prevención de la mortalidad de vertebrados en carreteras*. CODA, Madrid (20).
- FOLLMANN, E.H. Y HECHTEL, J.L. (1990). «Bears and pipeline construction in Alaska». *Arctic*, 43: 103-109 (21).
- LITVAITIS, J.A., MAJOR, J.T., Y SHERBURNE, J.A. (1987). «Influence of season and human-induced mortality on spatial organization of bobcats (*Felis rufus*) in Maine». *Journal of Mammalogy*, 68: 100-106 (22).
- SWIHART, R.K. Y SLADE, N.A. (1984). «Road crossing in *Sigmodon hispidus* and *Microtus ochrogaster*». *Journal of Mammalogy*, 65: 357-360 (23).
- PALOMARES, F. (1998). «El hábitat del lince ibérico». *Quercus*, 151: 18-22 (24).
- FERRERAS, P. (1993). «Incidencia de las carreteras sobre las poblaciones de lince ibérico». *Quercus*, 83: 22-23 (25).
- BLANCO, J.C. (1993). «Efecto barrera: el principio del fin de nuestros mamíferos». *Quercus*, 83: 23-24 (26).
- VELASCO, J.M., YANES, M. Y SUÁREZ, F. (1995). *El efecto barrera en vertebrados. Medidas correctoras en las vías de comunicación*. Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas. Ministerio de Obras Públicas, Transportes y Medio Ambiente, Madrid (27).