

Atropellos de mamíferos en la Región Este de Uruguay y su relación con los atributos del paisaje

Run-over of mammals in Uruguay's Eastern Region and its relationship with landscape attributes

Atropelamentos de mamíferos na região leste do Uruguai e sua relação com os atributos da paisagem

RECIBIDO: 19/4/2020 → APROBADO: 4/6/2020 ✉ agusserron@gmail.com

✉ SERRÓN, AGUSTINA(1) (2); COITIÑO, HUGO (2); SEGURA, ÁNGEL (1)

(1) MODELIZACIÓN Y ANÁLISIS DE RECURSOS NATURALES, CENTRO UNIVERSITARIO REGIONAL ESTE, UNIVERSIDAD DE LA REPÚBLICA, ROCHA, URUGUAY

(2) ONG ECOBIO, URUGUAY

RESUMEN

Las carreteras constituyen una amenaza para la biodiversidad y causan impactos negativos como fragmentación de hábitats y atropellos. En el año 2015, la ONG ECOBIO Uruguay comenzó a trabajar en la temática con el fin de implementar medidas de mitigación. El objetivo de este trabajo fue describir y analizar los atropellos de medianos y grandes mamíferos en la Región Este de Uruguay y su relación con los atributos del paisaje. Partiendo de que la dinámica de los atropellos está influenciada en su mayoría por factores antrópicos, el tránsito es la variable explicativa más significativa. Se utilizaron algoritmos de aprendizaje automático (Random Forest) para modelar los atropellos de la región, caracterizada por la alta heterogeneidad de ecosistemas, la importante biodiversidad y varias áreas protegidas. Se analizaron 976 casos de atropellos, de 17 especies, que se distribuyeron de manera heterogénea. Los modelos para todas las especies presentaron una capacidad predictiva de más del 60% de acierto, y de un 80% para los modelos por especie. La ruta con mayor probabilidad de atropello fue la 9. Si bien las variables más importantes fueron similares en todos los modelos, las tres que los explicaron mejor fueron: el tránsito promedio diario anual, la distancia a caminos y la distancia a centros urbanos. Este trabajo es de los primeros estudios a nivel nacional que cuantifican formalmente el fenómeno, y sugiere que lo conveniente es analizar las especies por separado para evaluar posibles respuestas diferenciales que imposibiliten hallar patrones generales.

PALABRAS CLAVE: ecología de carreteras, impacto sobre fauna, modelización.

ABSTRACT

Roads constitute a threat to biodiversity, causing negative impacts such as fragmentation of habitats and run overs. In 2015, the NGO ECOBIO Uruguay began working on the subject in order to implement mitigation measures. The purpose of this research is to analyze medium and large-sized mammals' run over in Uruguay's Eastern region and its relationship with landscape attributes. Taking off the dynamic of run overs, this is frequently influenced by anthropic cases, traffic is the most prominent variable over this. Machine learning algorithms (Random Forest) and QGIS and R programs were used to model the run overs of the region, that is characterized by having heterogeneous ecosystems, important biodiversity and several protected areas. 976 cases of run overs were analyzed, from 17 species, that were distributed heterogeneously. The models analyzed by species had a predictive ability of 80% success, while when working with all species as a whole 60%. The route with the highest probability run overs was 'Route 9'. Although the most important variables were similar in all the models, the three that better illustrated the prediction models were: annual average daily traffic, the distance to backroads and distance to populated roads, this three illustrates better the predictions models. This work is one of the first studies at a national level which formally quantifies the phenomenon and suggests analyzing the species separately to evaluate possible differential responses that make it impossible to find general patterns.

KEY WORDS: ecology of roads, impact on fauna, modeling.

RESUMO

As rodovias são uma ameaça à biodiversidade, causando impacto negativo como fragmentação de habitats e atropelamentos. No ano 2015, a ONG ECOBIO Uruguai começou a trabalhar no tema a fim de implementar medidas de mitigação. O objetivo deste trabalho era descrever e analisar o atropelamento de mamíferos médios e grandes da região leste do uruguai e sua relação com os atributos da paisagem. Partindo de que a dinâmica dos atropelamentos é influenciada principalmente pelos fatores antrópicos, o tráfego é a variável explicativa mais significativa. Algoritmos de aprendizado automáticos foram utilizados (Random Forest) e os programas QGIS e R para modelar os atropelamentos da região, a qual é caracterizada por tem heterogeneidade de ecossistemas, a importante biodiversidade e várias áreas protegidas. 976 casos de atropelamentos foram analisados, de 17 espécies, que foram distribuídas heterogeneamente. Os modelos tinham uma capacidade preditiva de mais de 60% de previsões certas, e 80% para modelos por espécie. A rodoviária com mais probabilidade de atropelamento foi a 9. Sim bem as variáveis mais importantes foram semelhantes em todos os modelos, as três que os explicaram melhor foram: média tráfego diário anual, distância das estradas e distância dos centros urbanos, são as três que melhor explicaram os modelos. Este trabalho é dos primeiros estudos a nível nacional que quantificam formalmente o fenômeno, que sugere que o conveniente é analisar as espécies separadamente para avaliar possíveis respostas diferenciais que tornassem impossível encontrar padrões gerais

PALAVRAS-CHAVE: ecologia de estradas, impacto na fauna, modelage.

INTRODUCCIÓN

Las actividades humanas han causado una crisis ambiental a escala mundial, la cual tiene entre sus consecuencias más severas la pérdida de la biodiversidad (Ceballos, et al., 2010). La fragmentación o pérdida de hábitat, y la falta de conectividad son los impactos que generan mayor pérdida de biodiversidad (Torres, et al., 2003).

Una de las actividades antrópicas que genera fragmentación de hábitats es la construcción de carreteras y vías ferroviarias. Estas estructuras presentan diversos beneficios para los seres humanos: principalmente generan conexión entre las personas y las ciudades, permitiendo el movimiento de individuos y bienes (D'Amico, 2015). Los impactos generados por las carreteras pueden ser directos: atropellos, fragmentación y/o pérdida de hábitat, modificaciones en la capacidad de dispersión de plantas nativas o establecimiento de especies exóticas invasoras en los bordes de las carreteras. Y también pueden ser indirectos, como los cambios en la hidrología y la geomorfología (Puc-Sánchez, et al., 2013), entre otros. El atropello de fauna es el impacto directo más fácil de reconocer porque en las carreteras se observan los cuerpos de los animales atropellados (Torres, et al., 2003). El aumento de la mortalidad es la principal consecuencia del atropellamiento que afecta a las poblaciones de las especies involucradas, y es más relevante en aquellas que se encuentran amenazadas o son vulnerables. La importancia relativa del impacto depende del tamaño de la población y de la capacidad reproductiva de la especie (Taylor y Goldingay, 2004). Los mamíferos terrestres son los vertebrados más vulnerables al impacto de estas infraestructuras ya que presentan una baja densidad poblacional y/o tienen un área de acción muy amplia, lo cual lleva a que deban desplazarse a grandes distancias, aumentando la probabilidad de ser afectados en las carreteras (Barri, 2010). Estos efectos están subestimados, pues en algunos casos se dificulta reconocer la especie atropellada (Torres, et al., 2003). Los estudios de los impactos de las carreteras sobre la biodiversidad se llevan a cabo desde hace varias décadas en el hemisferio norte (Cupul, 2002; Grilo, et al., 2009; Arroyave, et al., 2006). De estos trabajos surge que el índice de atropellamiento y su frecuencia están relacionados con diversos factores, tales como el flujo vehicular, la velocidad, la anchura de la vía, el comportamiento de las especies y la cobertura vegetal. Esto ha permitido un avance importante en la temática y en la generación de estrategias de mitigación (Seiler, et al., 2006; Ford y Fahrig, 2007; Grilo, et al., 2009; Bowman, et al., 2010; D'Amico, 2015). En las últimas décadas, la cantidad de estudios sobre los impactos de las carreteras ha aumentado considerablemente, lo que lleva al surgimiento de una disciplina llamada Ecología de Rutas (D'Amico, 2015). Se ha demostrado que los patrones paisajísticos deben ser considerados a la hora de evaluar la distribución espacial de los atropellos, puesto que permiten identificar ambientes o zonas con elevadas tasas de siniestralidad. Diversos grupos faunísticos se encuentran ligados con cierta especificidad a determinados ecosistemas o usos de suelo adyacentes (Colino, 2011). La caracterización de patrones paisajísticos espaciales utilizando variables agrupadas es un método eficaz y se utiliza de forma rutinaria en trabajos de distribución de especies (Benito 2007; Mateo, 2011). Este método está poco explorado en cuanto a la modelización de atropellos

de mamíferos. Analizar las variables que determinan la prevalencia de atropellos en ruta se torna crucial para analizar la dinámica de las especies vulnerables, y plantear eficientes medidas de gestión y mitigación (Colino, 2011). Es necesaria la utilización de métodos basados en técnicas de modelización que sean eficaces para el entendimiento del impacto de las infraestructuras (Colino, 2011). Es importante para una correcta mitigación conocer cuáles son las zonas vulnerables en las rutas, que se definen como aquellas que tienen mayor probabilidad de que ocurra un atropello (Carvajal-Alfaro, 2010).

Los métodos estadísticos lineales, como los modelos lineales generalizados (GLM), pueden ser inadecuados para describir estos patrones y relaciones ya que generalmente no cumplen los supuestos entre los patrones y las relaciones que imponen los GLM. Es por esto que en general no se pueden expresar mediante ecuaciones lineales simples. En este sentido, algoritmos que no presentan estos supuestos restrictivos y pueden capturar la fuerte no linealidad de los datos aparecen como una opción útil (De'ath, et al., 2000). En los últimos años, los ecólogos han utilizado ampliamente los árboles de clasificación y los bosques aleatorios (Random Forest) debido a su interpretación simple y su capacidad para caracterizar interacciones complejas (Breiman, et al., 1984; Hastie, et al., 2001; Prasad, et al., 2006). Random Forest ha sido ampliamente utilizado en campos tan diversos como la teledetección (Guhimre, et al., 2010), la genética (Cutler y Stevens, 2006), la ecología (Cutler, et al., 2007), la edafología (Schmidt, et al., 2008) y la hidrogeología (Baudron, et al., 2013). Estos modelos permiten describir y predecir los atropellos en zonas donde no se han realizado relevamientos. En la actualidad existen pocos trabajos de modelización de atropellos, más aún en Uruguay, donde la temática es incipiente (Ascensão, et al., 2019; Malo, et al., 2004).

El objetivo de este trabajo es describir y analizar la dinámica a nivel espacial de atropellos de medianos y grandes mamíferos en la Región Este, y modelar explícitamente su relación con los atributos del paisaje.

MATERIALES Y MÉTODOS

La Región Este de Uruguay comprende los departamentos de Rocha, Canelones, Maldonado, Treinta y Tres, Lavalleja y Cerro Largo, y se caracteriza por presentar una gran heterogeneidad de ecosistemas y una alta biodiversidad de vertebrados (DINAMA, 2018). Además, se encuentran allí varias de las Áreas Protegidas del Sistema Nacional de Áreas Protegidas (SNAP; Figura 1).

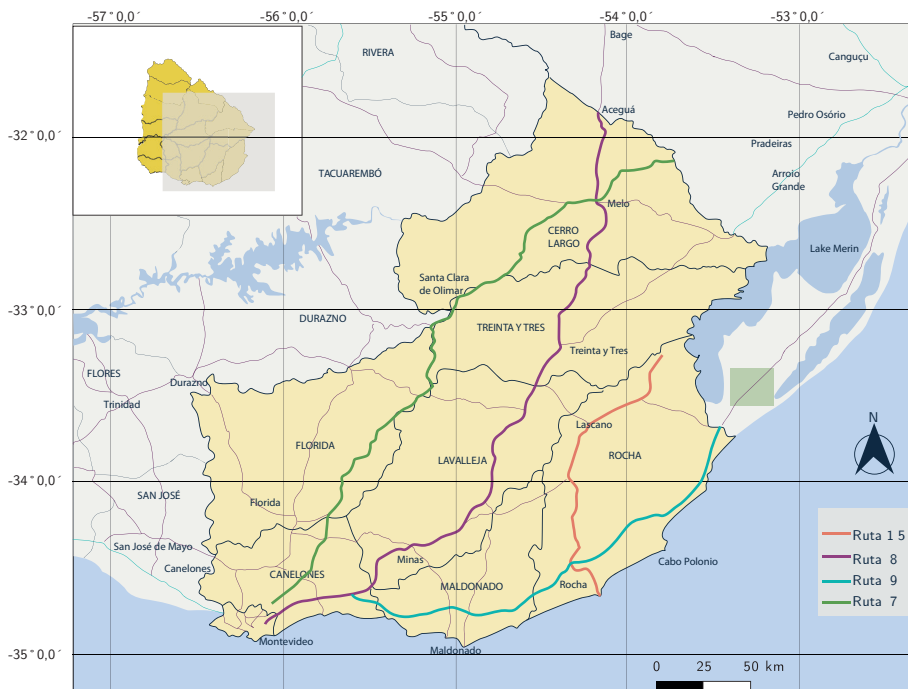


Figura 1. Mapa del área de estudio, se muestran representadas las rutas elegidas.

Los datos utilizados pertenecen a los registros de mamíferos atropellados en las rutas 7, 8, 9 y 15, realizados por la ONG ECOBIO Uruguay en la línea de investigación *Ecología de carreteras y biodiversidad*, ejecutada entre 2015 y 2016 (Coitiño, et al., 2018). Estas rutas presentan características diferentes: las rutas 8 y 9 son corredores internacionales que conectan Brasil con Uruguay, además de atravesar varias localidades turísticas, lo que genera un alto tránsito. Por otro lado, las rutas 7 y 15 conectan localidades internas del país, teniendo menor tránsito. Se utilizó el relevamiento del año 2015, que se compone de 976 registros georreferenciados de 17 especies de mamíferos en 4 rutas de la Región Este, que abarcan 1295 kilómetros. Se utilizó el programa de código abierto y libre R (R-Core Team, 2019) para realizar análisis exploratorios de las variables (histograma de la abundancia de atropellos por cuadrícula, relaciones entre variables, dependencia entre variables) y modelos de predicción con el algoritmo Random Forest (Breiman, 2001), utilizando el paquete Random Forest desarrollado por Liaw y Winer en 2002.

Las matrices con las variables explicativas de temperatura, precipitación, evapotranspiración, radiación, humedad, pendiente, altura, características de suelo, usos de suelo, distancias (distancia a caminos, distancia a rutas, distancia a centros urbanos, distancia a ríos, distancia a costa), y urbanización fueron cedidas por el Laboratorio de Desarrollo Sustentable y Gestión Ambiental del Territorio (LDGT-Facultad de Ciencias, Universidad de la República) con una agregación espacial en mallas cuadradas de 1 km². Además, se agregó una variable con el número de ruta a partir de una capa vectorial de caminería, y se utilizó una variable de tránsito promedio diario anual, con datos obtenidos del Ministerio de Transporte y Obras Públicas (MTOP).

Cada variable fue asignada a una de tres categorías: i) climática, ii) antrópica y iii) geográfica (Tabla 1). La variable a explicar es binaria, de presencia o ausencia de atropello de un grupo o especie por cuadrícula. Se extrajeron los valores de las variables explicativas para cada registro, con el programa QGIS.

Tabla 1. Variables utilizadas para los modelos, agrupadas en los factores: climático, geográfico y antrópico. Elaboradas por el Laboratorio de Desarrollo Sustentable y Gestión Ambiental del Territorio (LDGT-Facultad de Ciencias, Universidad de la República).

Factor	Código	Variable
Climático	B1	Temperatura media anual
	B2	Intervalo diurno promedio (temperatura media mensual -temperatura máx. mín.)
	B3	Isoterma (BIO2 / BIO7) (* 100)
	B4	Temperatura estacional (desviación estándar * 100)
	B5	Temperatura máxima del mes más cálido
	B6	Temperatura mínima del mes más frío
	B7	Temperatura rango anual (BIO5-BIO6)
	B8	Temperatura media del trimestre más húmedo
	B9	Temperatura media del trimestre más seco
	B10	Temperatura media del trimestre más cálido
	B11	Temperatura media del trimestre más frío
	B12	Precipitación anual
	B13	Precipitación del mes más húmedo
	B14	Precipitación del mes más seco
	B15	Precipitación estacional (coeficiente de variación)
	B16	Precipitación del trimestre más húmedo
	B17	Precipitación del trimestre más seco
	B18	Precipitación del trimestre más cálido
	B19	Precipitación del trimestre más frío
	PMAX_MED	Precipitaciones máximas medias
RAD	Radiación solar global media (en base a los 12 puntos de estimativos, basados en climatología de largo plazo del MSU v1.0, se elabora la distribución espacial aproximada sobre todo el territorio uruguayo del promedio mensual de los acumulados diarios de energía solar por metro cuadrado en plano horizontal a nivel de suelo)	
ETP	Evapotranspiración potencial	
ETR	Evapotranspiración real	
HAN	Humedad media anual	
HTC	Humedad del trimestre más cálido (enero, febrero, marzo)	
HTF	Humedad del trimestre más frío (julio, agosto, setiembre)	
HEL	Helada media	
BH_VER	Balance hídrico en verano	
BN_OTO	Balance hídrico en otoño	
BH_INV	Balance hídrico en invierno	
BH_PRIM	Balance hídrico en primavera	
BH_AN	Balance hídrico medio anual	
Geográfico	ESC	Escabrosidad, diferencia de alturas
	PEND	Pendiente en porcentaje

OR	Orientación sur o norte (está en ángulos -0 es el norte- y varía en sentido horario)
DR	Distancia a ríos
DCO	Distancia a la costa
NDVI	Índice de vegetación de diferencia normalizada
PS	Profundidad del suelo
TS	Textura del suelo
RS	Rocosisdad del suelo
IS	Inundabilidad del suelo
BOSQ	Porcentaje de superficie ocupada por bosque
HUMED	Porcentaje de superficie ocupada por humedal
CN	Porcentaje de superficie ocupada por campo natural
FOREST	Porcentaje de superficie ocupada por forestación
AGR	Porcentaje de superficie ocupada para agricultura y campo artificial
URB	Porcentaje de superficie urbanizada
DU	Distancia a zona urbanizada (distancia del píxel a la localidad urbana más próxima medida en km. La planta urbana tiene delimitación real)
Antrópico	
DR	Distancia a rutas (distancia del píxel a la ruta nacional o departamental más próxima medida en km. Cuando la ruta pasa por el píxel el valor es 0. Cobertura de rutas de las cartas topográficas 1.50.000 digitalizadas)
DC	Distancia a caminos (camino departamental o rural más próximo medidos en km. Cuando la ruta pasa por el píxel el valor es 0. Cobertura de rutas de las cartas topográficas 1.50.000 digitalizadas)
DNP	Densidad poblacional
CM	Camino en metros (cantidad de metros lineales de caminos y/o rutas que están dentro del píxel expresados en metros. Cobertura de rutas de las cartas topográficas 1.50.000 digitalizadas)
LAT	Latitud
LONG	Longitud
DP	Distancia entre los registros
TPDA	Tránsito promedio diario anual

El modelo utilizado fue el de bosques aleatorios (Random Forest). Este es un algoritmo predictivo que usa la técnica de *bagging* para combinar diferentes árboles de clasificación individuales. Para generar los árboles se realiza una serie de divisiones binarias de los datos en subconjuntos los más homogéneos posibles, según diversas reglas de decisión, hasta llegar a un árbol maximal donde se reparten todas las observaciones que contiene en cada nodo terminal con una muy poca cantidad de datos (Bourel, 2012). Cada árbol es construido con observaciones remuestreadas con reposición del conjunto de datos original, y en cada rama del árbol las variables seleccionadas para realizar el corte son seleccionadas de forma aleatoria (Breiman, 2001; Cutler, et al., 2007; Segura, et al., 2017). En el caso de un problema de clasificación, la predicción de una observación hecha por Random Forest es la clase más votada entre las predicciones hechas por los diferentes árboles y en regresión se hace un promedio de los valores asignados (Bourel, et al., 2018). La salida generada por el modelo es la probabilidad de que ocurra un atropello o más para cada una de las cuadrículas.

Para analizar el desempeño general del modelo se utilizaron las matrices de confusión que construye el algoritmo Random Forest basadas en los datos, evaluando la capacidad predictiva del modelo en observaciones que no fueron sorteadas

en el remuestreo (en inglés OOB, *out of bag*; Breiman, 2001). Estas representan una estimación honesta de la performance del modelo, pues no son datos utilizados para entrenar el modelo y no corren el riesgo de sobreajuste. Además de la precisión general se evaluó la precisión de cada clase, ya que en casos desbalanceados provee de una evaluación más útil (Segura, et al., 2017).

Tabla 2. Proporciones de los datos, para el modelo global y para cada una de las rutas con más registros (7, 8, 9, 15). Cantidad total de celdas utilizadas en el modelo y proporción de celdas con atropello.

	Global	R7	R8	R9	R15
Cantidad de celdas totales	1546	477	506	336	227
Cantidad con atropello	37%	15%	48%	52%	34%

En los casos en que la proporción de clases estuvo desbalanceada, es decir cuando una clase de la variable respuesta se presentó en proporciones muy inferiores a la otra (Pino, 2017), el error de clasificación conllevó bajas tasas de acierto sobre las clases minoritarias (Chen, et al., 2004). Dentro de las estrategias más utilizadas están las relacionadas a la selección de los datos, como muestreo en la clase mayoritaria (*Down-sampling*), en la cual se hace una selección aleatoria de n casos entre los N de la clase mayoritaria, o remuestreo en la clase minoritaria (*Upsampling*), en donde se toma una muestra aleatoria con reemplazamiento de tamaño N (lo que se conoce como muestra *bootstrap*) extraída del conjunto de los n casos de la clase minoritaria (Pino, 2017). Aun así, en muchos casos, estas estrategias no solucionan el problema ya que dan como resultado datos duplicados, haciendo que las variables presenten una varianza menor a la real. Otra estrategia consiste en utilizar umbrales de decisión alternativos. Las reglas de clasificación binaria como las que proporciona Random Forest se pueden definir mediante una expresión donde se compara la probabilidad estimada de pertenecer a la clase de interés con un punto de corte (pc), que suele ser 0.5. Se pueden utilizar otros puntos de corte que conduzcan a mayores valores para el acierto en la clase minoritaria (en general este acierto es la sensibilidad) (Pino, 2017). En estos casos se probaron técnicas de remuestreo y cambio de umbrales de decisión para evaluar el efecto del desbalance sobre el poder de clasificación.

Por otro lado, el método Random Forest permite una estimación de la importancia relativa de cada variable. La importancia media en pureza que aporta una determinada variable será medida mediante el índice de Ginni. La importancia se construye en base a permutar las variables y evaluar su aporte a la disminución de la impureza de las particiones con respecto a la variable original. Por ejemplo, permutar una variable importante hará que la misma no aporte a disminuir la impureza de los nodos hijos comparado con la variable original; mientras que una variable poco importante no mostrará grandes diferencias en su capacidad relativa para disminuir la impureza cuando es permutada (Hastie, et al., 2001).

Por último, se seleccionaron las especies que contaban con más registros de atropello, como el zorrillo (*Conepatus chinga*), con 354 registros, y el zorro de campo (*Lycalopex*

gymnocercus), con 159 registros. La variable de respuesta utilizada fue categórica con dos clases (1 atropello y 0 no atropello). Las variables explicativas fueron las utilizadas en los modelos generales.

RESULTADOS

La cantidad total de registros de atropellos fue de 976 individuos en el año 2015. En cuanto a la cantidad de individuos de una misma especie atropellados, el zorrillo presentó 354 registros, el zorro de campo, 159; mientras que el zorro de monte (*Cerdocyon thous*), 148 registros. Dentro de la lista de especies protegidas del Sistema de Áreas Protegidas (SNAP) en Uruguay, encontramos el margay (*Leopardus wiedii*), que se mostró como el más afectado, con 17 individuos atropellados; y en el otro extremo, el coati (*Nasua nasua*), con un solo registro.

Tabla 3. Registros de atropello por especie de mamíferos y estado de conservación según la Unión Internacional para la Conservación de la Naturaleza (UICN). Preocupación menor (LC), Datos insuficientes (DD), Casi amenazada (NT), Vulnerable (VU).

Especie	Estado de conservación UICN	Registros de atropello
<i>Conepatus chinga</i> (zorrillo)	Sin riesgo	354
<i>Lycalopex gymnocercus</i> (zorro de campo)	LC	159
<i>Cerdocyon thous</i> (zorro de monte)	LC	148
<i>Didelphis albiventris</i> (comadreja mora)	Sin riesgo	127
<i>Lontra longicaudis</i> (lobito de río)	DD	65
<i>Dasyurus hybridus</i> (mulita)	NT	56
<i>Leopardus geoffroyi</i> (gato montés)	NT	45
<i>Dasyurus novemcinctus</i> (tatú)	LC	39
<i>Lepus europaeus</i> (liebre)	Sin riesgo	30
<i>Galictis cuja</i> (hurón)	Sin riesgo	21
<i>Leopardus wiedii</i> (margay)	VU	17
<i>Mazama gouazoubira</i> (guazubirá)	Sin riesgo	4
<i>Myocastor coypus</i> (nutria)	LC	3
<i>Hydrochoerus hydrochaeris</i> (carpincho)	LC	1
<i>Nasua nasua</i> (coati)	LC	1

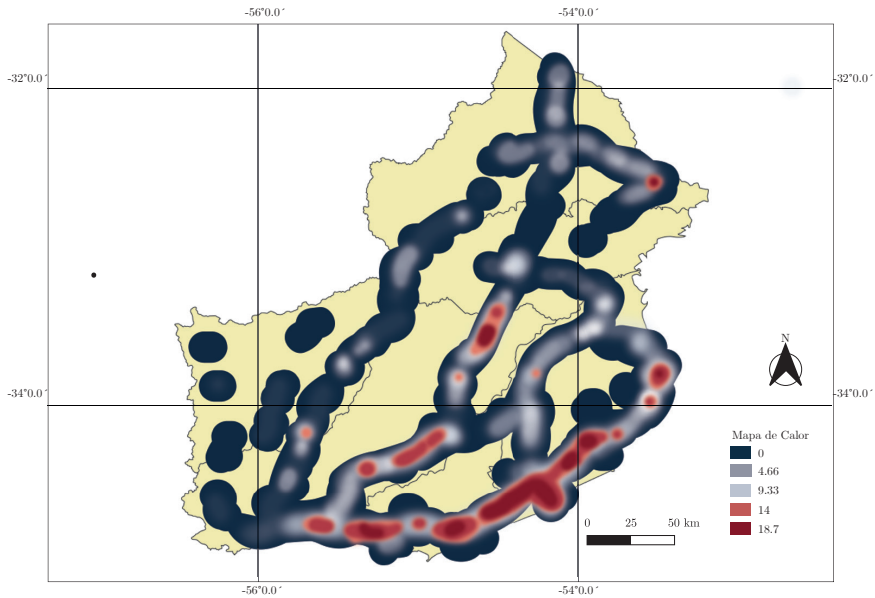


Figura 2. Mapa de calor de los datos de atropello en la Región Este del país. En color rojo se muestran las zonas con mayor densidad de puntos.

En cuanto a la distribución de los atropellos en la zona de estudio, se puede observar que las áreas con mayor densidad de registros corresponden a la ruta 9 (341 registros) y la ruta 8 (299 registros). En tanto, la ruta 7 es la que presenta menor densidad de atropellos (Figura 2).

El porcentaje de aciertos para el modelo fue superior al 60% en los datos OOB. El modelo global que incluye todas las rutas tuvo un 68,89% de acierto, similar al de los modelos creados para cada ruta, a excepción de la ruta 7, la cual tuvo un porcentaje del 82,6%. Las predicciones de la clase mayoritaria presentan un mejor desempeño respecto a la clase minoritaria (atropellos).

Tabla 4. Resultados del Random Forest de clasificación del modelo global, y por rutas (se promediaron 500 árboles). El porcentaje de acierto es calculado como 1 menos el error OOB, los errores de clase fueron tomados de la matriz de confusión de cada modelo. Las variables se encuentran ordenadas de mayor a menor importancia. DU = Distancia a centros urbanos, DC = Distancia a los caminos, NDVI = Índice de vegetación de diferencia normalizada, ALT = Altura en metros sobre el nivel del mar, HAN = Humedad media anual, CN = Porcentaje de superficie ocupada por campo natural. La corrección de los modelos fue modificar el umbral para la clase minoritaria de 0.5 a 0.7 (Corrección Ruta 7 y Ruta 15).

Ruta	Global	Ruta 7	Correción R7	Ruta 8	Ruta 9	Ruta 15	Correción R15	Zorrillo	Zorro de campo
Matriz de Confusión									
Acierto de Clase									
Atropello	53%	3%	33%	62%	26%	22%	56%	18%	7%
No atropello	78%	98%	68%	59%	80%	82%	54%	99,5%	99,8%
Variables									
1	DC	DC	DC	DC	DU	DC	DC	DU	DC
2	DU	ALT	NDVI	CN	DC	CN	CN	DC	NDVI
3	HAN	DU	DU	HAN	NDVI	NDVI	DU	NDVI	ALT

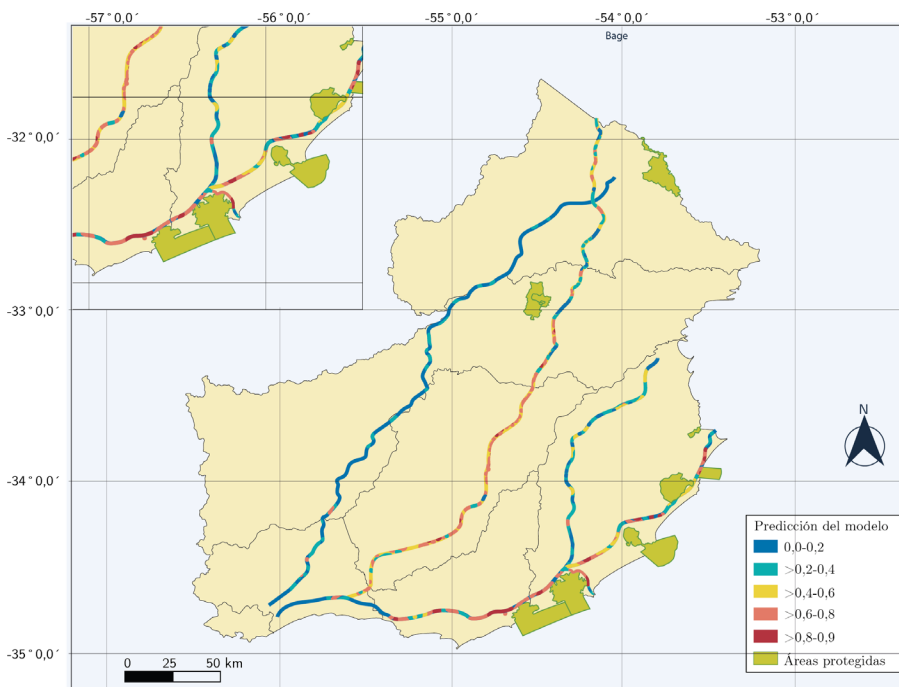


Figura 3. Mapa con el resultado de la predicción del modelo realizado con la variable de respuesta 0 para no atropello y 1 para atropello, para cada celda. Color rojo muestra mayor probabilidad de atropello; color celeste, menor probabilidad de atropello.

Respecto a la importancia de las variables, se observa que para los cinco modelos y para las correcciones del modelo de las rutas 7 y 15 los resultados obtenidos son similares (Tabla 4). Las dos variables más importantes fueron la distancia a caminos (DC) y la distancia a centros urbanos (DU), las cuales corresponden al factor antrópico. Luego le siguen en importancia la altitud (ALT) (geográfica) y el índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI) (climática), variables que se encuentran en todos los modelos (Tabla 3).

Como las variables fueron similares, se generó un gráfico de importancia de variables para el modelo global (Figura 4), en donde se observan las 11 variables más importantes. En las primeras posiciones se muestran DC y DU, mientras que el tránsito promedio diario anual se encuentra en la posición 11 (Figura 4).

La relación del número de atropellos con la distancia a centros urbanos presenta un patrón jorobado, donde la abundancia de organismos atropellados aumenta progresivamente hasta llegar a un máximo de 10 km y luego decrece a distancias mayores.

El porcentaje de acierto de los modelos por especie fue superior al 80%, teniendo una mayor precisión para el zorro de campo. Las predicciones tienen un mayor error para la clase de atropello, al igual que en las otras modelizaciones.

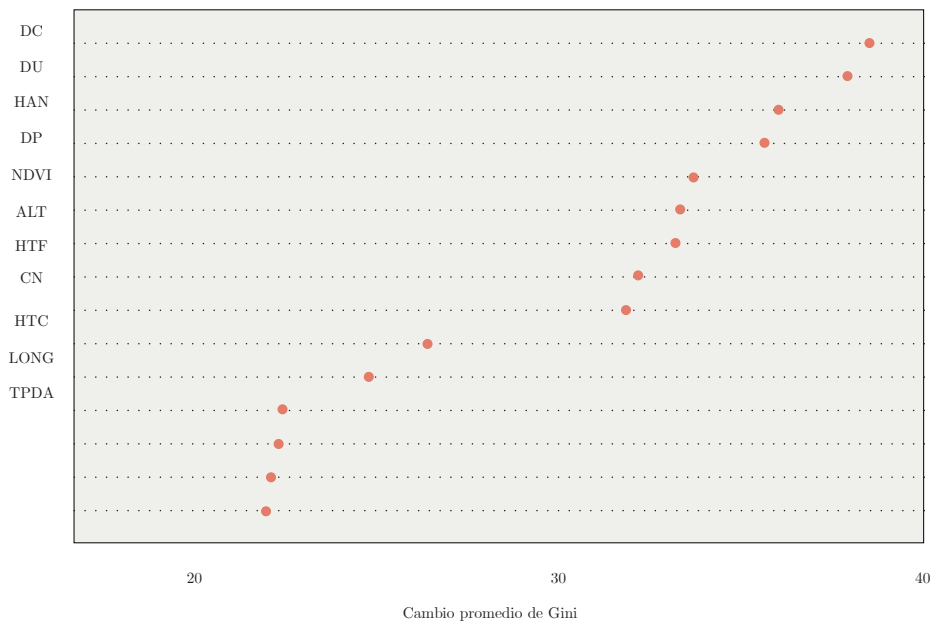


Figura 4. Importancia de las variables para el modelo, en orden de mayor a menor según el Índice de Gini. DC = Distancia a los caminos, HTF = Humedad del trimestre más frío (julio, agosto, setiembre), NDVI = Índice de vegetación de diferencia normalizada, ALT = Altura en metros sobre el nivel del mar, HAN = Humedad media anual, CN = Porcentaje de superficie ocupada por campo natural, HTC = Humedad del trimestre más cálido (enero, febrero, marzo), LONG = Longitud, TPDA = Tránsito promedio diario anual, DU = Distancia a centros urbanos, DP = Distancia entre los registros.

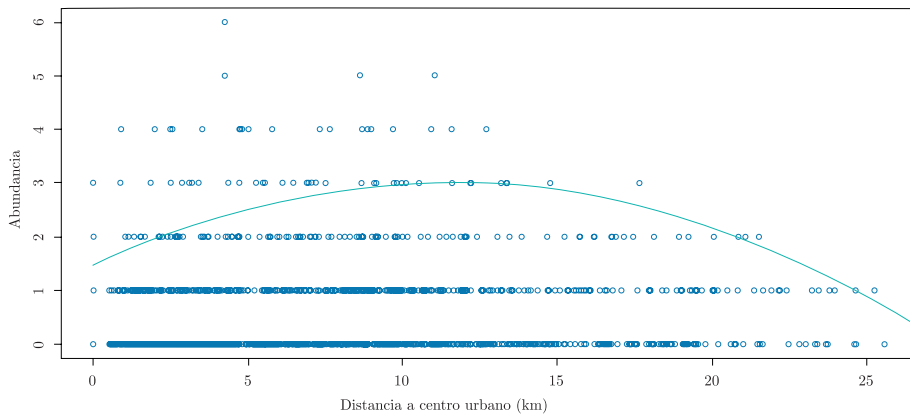


Figura 5. Relación de la abundancia de organismos atropellados con la variable distancia a centros urbanos. Cada punto corresponde a una cuadrícula de 1km².

Se observa que para la variable distancia a centros urbanos, la relación se ajusta a una parábola positiva con un máximo a los 10 km del centro urbano. Cerca de los centros urbanos la abundancia de atropellos es baja; al alejarse de estos, se llega a un punto donde se registra un máximo de atropellos. Luego de ese pico, la abundancia comienza a disminuir nuevamente. Es decir, para una distancia determinada a los centros urbanos es donde se llega a la mayor abundancia de atropellos por cuadrícula, entre 3 y 4. Por otro lado, las mayores densidades de puntos son de celdas con 0,1 y 2 atropellos, y se encuentran cerca de los centros urbanos (Figura 5).

DISCUSIÓN

El presente trabajo resume información sobre los atropellos en rutas del este de Uruguay, y propone un abordaje de modelización mediante aprendizaje automático para predecir la ubicación de los atropellos e identificar variables asociadas. Las rutas tienen un efecto relevante para la biodiversidad de mamíferos medianos y grandes en el país (Cáceres, et al., 2008), generando impactos sobre diversos órdenes taxonómicos, tamaños corporales y especies con diferente estado de conservación. Es necesario mejorar la capacidad predictiva de los modelos para poder utilizarlos en la generación de medidas que minimicen el problema del atropello de fauna silvestre.

Entre las especies atropelladas se hallan algunas prioritarias para la conservación, como el margay, con una población muy pequeña (González, 2013), y el coatí. En especies de mamíferos cuyas poblaciones se encuentran muy reducidas, existe evidencia que señala que reducir los factores de riesgo de mortalidad producidos por causas antrópicas, como el caso de atropellos en rutas, es tan o más importante que la restauración del hábitat a modo de mantener la viabilidad poblacional. (Ferrerías, et al., 2001; Kerley, et al., 2002).

De las 15 especies atropelladas, 9 son carnívoras (gato montés, margay, lobito de río, hurón, zorrillo, coatí, mano pelada, zorro de campo y zorro de monte). Esto es similar a lo que evidencian otros trabajos, donde los ungulados y los carnívoros son

los más afectados por las carreteras (Delgado-Vélez, 2014). Por otro lado, la mayoría de estas especies tienen hábitos nocturnos y necesitan grandes extensiones de territorio para sobrevivir (Artavia, et al., 2015), lo que dificulta su identificación para los conductores y aumenta el riesgo de colisión.

Las especies más afectadas en número de atropellos son el zorrillo y los zorros, lo que puede deberse a la gran abundancia de estas especies en Uruguay (González, 2001). Los resultados de las especies afectadas por el atropello en las carreteras confirman que las colisiones de vehículos con animales silvestres son un problema grave que justifica la aplicación generalizada de medidas de mitigación (Malo, et al., 2004).

Las 10 variables más importantes relacionadas con el número de atropellos fueron antrópicas. En la mayoría de los modelos, la más importante fue la distancia a los caminos, una variable que describe la distancia de la cuadrícula al camino departamental más próximo medido en km. Cuando la ruta pasa por la cuadrícula el valor es 0. Esto podría explicarse porque, generalmente, cerca de las rutas principales existen caminos secundarios que conectan las carreteras con los centros urbanos cercanos, lo que aumenta el flujo vehicular local. La segunda variable más importante es la distancia a centros urbanos, que está relacionada con el flujo vehicular de la zona y que no es capturado por métricas más generales de tráfico registradas en los peajes (e.g. TPDA). Por lo tanto, hay un gran flujo de vehículos que no está siendo tomado en cuenta por la variable TPDA, lo que puede explicar su baja contribución a la predicción de atropellos. Los modelos mostraron que existe una distancia óptima en la cual aumenta la probabilidad de registrar un atropello (10 km). Esto puede deberse a un mayor flujo de vehículos, aunque también es esperable que la fauna de mamíferos se encuentre empobrecida cerca de los grandes centros urbanos (Santos y Tabarelli, 2002). Es por esto que hay una alta probabilidad de atropellos en una zona intermedia, ya que hay más cantidad de mamíferos y aún sigue habiendo gran cantidad de tránsito. Las variables de distancia a caminos y a centros urbanos podrían ser una medida indirecta de tránsito alrededor de los centros urbanos, es decir de cortas distancias y que resulta importante explorar para comprender los mecanismos que favorecen el atropello de mamíferos.

Los resultados encontrados en este trabajo son similares a los de Ascensão y colaboradores (2019), donde a partir de modelos lineales generalizados (GLM) antrópicas. Después de estas, según cada especie, se encuentran la cobertura vegetal, temperatura o el NDVI (Ascensão, et al., 2019).

El porcentaje de acierto de los modelos para el zorrillo y el zorro de campo fue superior al 80%, obteniendo una mejora en las predicciones respecto a los modelos que se realizaron para predecir los atropellos en todas las especies agrupadas. Esto sugiere que los modelos por especies y no por rutas son los más adecuados ya que es esperable que los organismos de una misma especie se presenten en hábitats similares y, por lo tanto, se reduce la variabilidad y aumenta la capacidad de predicción. Las variables más importantes para estas especies también fueron de índole antrópica, por ejemplo, para el zorrillo, la más importante fue la distancia a los centros urbanos, y para el zorro, la distancia a caminos.

Los resultados obtenidos en el presente trabajo aportan una caracterización de los atropellos en las principales carreteras de la Región Este del país, lo que

permitirá avanzar en la implementación de medidas de mitigación para disminuir la mortalidad por atropellos en dicha región. Estas medidas podrían ser la colocación de cartelería, la cual a fines del año 2019 se llevó a cabo ubicando carteles de disminución de velocidad para vehículos en tramos de las rutas 9 y 15. Por otro lado, se pretende colocar vallas que corten el paso de animales hacia la ruta en zonas donde se encuentren puentes de agua, para lograr que los animales crucen por debajo. Estas medidas están dentro de las más económicas, pero a nivel mundial se reconoce que los pasos de fauna, es decir los puentes subterráneos o aéreos, son los más efectivos (Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente, 2006; Aizpurúa, 2010). Conocer dónde se encuentran las zonas con mayores efectos de las rutas sobre la fauna silvestre y cuáles son las especies más afectadas permitirá definir prioridades sobre las especies y las medidas adecuadas para su conservación (Ascensão, et al., 2019). Sin embargo, es importante continuar con estos trabajos mejorando algunos aspectos, como generar variables con una mayor resolución espacial que permitan identificar los sitios de alta probabilidad de atropello con más precisión. También sería importante elaborar variables explicativas que describan mejor las características de las carreteras como, por ejemplo, la vegetación de los bordes, la anchura y el tipo de pavimentación, entre otras. Esto permitirá mejorar los modelos predictivos y comprender cómo las características del paisaje afectan a las poblaciones de mamíferos en Uruguay.

Por último, de este trabajo surgen nuevas hipótesis o preguntas, como evaluar si hay una variación estacional en la cantidad de atropellos en todas las rutas, ya que en primavera-verano están en época reproductiva; mientras que en invierno los animales se desplazan en menores distancias. Además, es necesario evaluar características específicas de cada ruta, como por ejemplo si en la ruta 9 existe una variación temporal ocasionada por el aumento del turismo, generando mayor atropello cerca de las zonas más turísticas. Asociado a esto, el aumento de atropello en época de turismo se puede deber a un mayor desplazamiento de especies de mamíferos debido a una mayor circulación de personas. Se pretende en futuros trabajos analizar estos aspectos para tener un mayor entendimiento de la distribución de los atropellos en esta región, y así poder lograr mejores medidas de mitigación contra este problema.

REFERENCIAS

- Aizpurúa, N., 2010. *Medidas preventivas, correctoras y compensatorias del impacto ecológico de carreteras*. Madrid: Universidad Politécnica de Madrid. (Tesis de Doctorado).
- Arroyave, M.D.P., Gómez, C., Gutiérrez, M.E., Múnera, D.P., Zapata, P.A., Vergara, I.C. y Ramos, K.C., 2006. Impactos de las carreteras sobre la fauna silvestre y sus principales medidas de manejo. En: *Revista EIA*, (5), pp.45-57.
- Artavia, A., Jiménez, M., Martínez-Salinas, A., Pomareda, E., Araya-Gamboa, D. y Arévalo-Huezo, E., 2015. Registro de mamíferos silvestres en la sección de la ampliación de la Ruta 32, Limón, Costa Rica. En: *Brenesia*, 83-84, pp.37-46.

- Ascensão, F., Yogui, D., Alves, M., Medici, E.P. y Desbiez, A., 2019. Predicting spatiotemporal patterns of road mortality for medium-large mammals. En: *Journal of Environmental Management*, 248, 109320. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2019.109320>
- Barri, F., 2010. Evaluación preliminar de la mortandad de mastofauna nativa por colisión con vehículos en tres rutas de Argentina. En: *Ecología Aplicada*, 9(2), pp.161-165.
- Baudron, P., Alonso-Sarría, F., García-Aróstegui, J., Cánovas-García, F., Martínez-Vicente, D. y Moreno Brotóns, J., 2013. Identifying the origin of groundwater samples in a multi-layer aquifer system with Random Forest classification. En: *Journal of Hydrology*, 499, pp.303-315.
- Benito, B. y Peñas, J., 2007. Aplicación de modelos de distribución de especies a la conservación de la biodiversidad en el sureste de la Península Ibérica. En: *GeoFocus. Revista Internacional de Ciencia y Tecnología de la Información Geográfica*, (7), pp.100-119.
- Bowman, J., Ray, J.C., Magoun, A.J., Johnson, D.S. y Dawson, F.N., 2010. Roads, logging, and the large-mammal community of an eastern Canadian boreal forest. En: *Canadian Journal of Zoology*, 88(5), pp.454-467.
- Breiman, L., Friedman, J., Stone, Ch. y Olshen, R.A., 1984. *Classification and regression trees*, wadsworth. Oxford: Taylor & Francis.
- Breiman, L., 2001. Random forests. En: *Machine Learning*, 45(1), pp.5-32.
- Bourel, M., 2012. Métodos de agregación de modelos y aplicaciones. En: *Ingeniería*, 10, pp.19-32.
- Bourel, M. y Segura, A.M., 2018. Multiclass classification methods in ecology. En: *Ecological Indicators*, 85, pp.1012-1021. <https://doi.org/10.1016/j.ecoind.2017.11.031>
- Cáceres, N., Wideberg, J.P. y Benitez, F.G., 2008. Review of traffic data estimations extracted from cellular networks. En: *IET Intelligent Transport Systems*, 2(3), pp.179-192.
- Carvajal-Alfaro, V., Díaz-Quesada, F. y Gallardo-Loría, R., 2010. *Estrategias para la conservación de poblaciones de mamíferos silvestres en rutas turísticas de acceso al cantón de Sarapiquí* [En línea]. San Carlos: Instituto Tecnológico de Costa Rica. [Consulta: 20 de agosto de 2019]. Disponible en: <https://repositoriotec.tec.ac.cr/handle/2238/6281>

- Ceballos, G., García, A., y Ehrlich, P.R., 2010. The sixth extinction crisis loss of animal populations and species. En: *Journal of Cosmology*, 8, pp.1821–1831.
- Chen, C., Liaw, A., y Breiman, L., 2004. *Using random forest to learn imbalanced data* [En línea]. Berkeley: University of California. [Consulta: 12 de octubre de 2019]. Disponible en: <https://statistics.berkeley.edu/sites/default/files/tech-reports/666.pdf>
- Coitiño, H., Montenegro, F. y Guerrero, J.C., 2018. Uruguay y el impacto de las carreteras: contexto y perspectivas a futuro. En: Bager, A. *Infraestructura viaria & biodiversidade: métodos e diagnósticos*. Lavras: UFLA. pp 244-269.
- Colino, V., 2011. *Contribuciones al análisis de mortalidad de vertebrados en carreteras*. Salamanca: Facultad de Ciencias Agrarias y Ambientales. (Tesis Doctoral).
- Cupul, F., 2002. Víctimas de la carretera: fauna apachurrada. En: *Gaceta CUC. Departamento de Ciencias. Centro Universitario de la Costa, México*.
- Cutler, A. y Stevens, J.R., 2006. Random forests for microarrays. En: *Methods in Enzymology*, 411, pp.422-432.
- Cutler, D.R., Edwards, T.C., Beard, K.H., Cutler, A., Hess, K.T., Gibson, J. y Lawler, J.J., 2007. Random forests for classification in ecology. En: *Ecology*, 88(11), pp.2783-2792.
- Delgado-Vélez, C.A., 2014. Adiciones al atropellamiento vehicular de mamíferos en la vía de El Escobero, Envigado (Antioquia), Colombia. En: *Revista EIA*, 11(22), pp.147-153.
- DINAMA, OSE, DINARA, IDR y CURE, 2018. *Estado ambiental de las lagunas costeras de Rocha y Castillos y de sus principales tributarios*. Montevideo: DINAMA, OSE, DINARA, IDR y CURE.
- De'ath, G. y Fabricius, K.E., 2000. Classification and regression trees: a powerful yet simple technique for ecological data analysis. En: *Ecology*, 81, pp.3178–3192.
- D'Amico, M., 2015. *One the road: los distintos impactos del tráfico motorizado sobre poblaciones de animales*. Sevilla: Universidad Pablo de Olavide. (Tesis Doctoral).
- Ferreras, P., Gaona, P., Palomares, F. y Delibes, M., 2001. Restore habitat or reduce mortality? Implications from a population viability analysis of the Iberian lynx. En: *Animal Conservation Forum*, 4(3), pp.265-274. DOI: 10.1017/S1367943001001317

- Ford, A.T. y Fahrig, L., 2007. Diet and body size of North American mammal road mortalities. En: *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 12(7), pp.498-505.
- González, E.M., 2001. *Guía de campo de los mamíferos de Uruguay: introducción al estudio de los mamíferos*. Montevideo: Vida Silvestre.
- González, E.M., Martínez-Lanfranco, J.A., Juri, E., Rodales, A.L., Botto, G. y Soutullo, Á., 2013. Mamíferos. En: Soutullo, A., Clavijo, C. y Martínez-Lanfranco, J.A., eds. *Especies prioritarias para la conservación en Uruguay. Vertebrados, moluscos continentales y plantas vasculares*. Montevideo: SNAP, DINAMA y DICYT. pp.175-207.
- Grilo, C., Bissonette, J.A. y Santos-Reis, M., 2009. Spatial-temporal patterns in Mediterranean carnivore road casualties: consequences for mitigation. En: *Biological Conservation*, 142(2), pp.301-313.
- Guhimre, B., Rogan, J. y Miller, J., 2010. Contextual land-cover classification: incorporating spatial dependence in land-cover classification models using random forests and the Getis statistic. En: *Remote Sensing Letters*, 1(1), pp.45-54.
- Hastie, T.J., Tibshirani, R.J. y Friedman, J.H., 2001. *The elements of statistical learning: data mining, inference, and prediction*. New York: Springer.
- Kerley, L.L., Goodrich, J.M., Miquelle, D.G., Smirnov, E.N., Quigley, H.B. y Hornocker, M.G., 2002. Effects of roads and human disturbance on Amur tigers. En: *Conservation Biology*, 16(1), pp.97-108.
- Malo, J.E., Suárez, F. y Diez, A., 2004. Can we mitigate animal-vehicle accidents using predictive models? En: *Journal of Applied Ecology*, 41(4), pp.701-710.
- Mateo, R.G., Felicísimo, Á.M. y Muñoz, J., 2011. Modelos de distribución de especies: una revisión sintética. En: *Revista Chilena de Historia Natural*, 84(2), pp.217-240.
- Liaw, A. y Wiener, M., 2002. Classification and regression by random Forest. En: *R News*, 2(3), pp.18-22.
- Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente, 2006. *Prescripciones técnicas para el diseño de pasos de fauna y vallados perimetrales*. Madrid: Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente. (Documentos para la reducción de la fragmentación de hábitats causada por infraestructuras de transportes, 1).
- Puc-Sánchez, J.I., Delgado-Trejo, C., Mendoza-Ramírez, E. y Suazo-Ortuño, I., 2013. Las carreteras como una fuente de mortalidad de fauna silvestre en México. En: *CONABIO Biodiversitas*, 11, pp.12-16.

- Prasad, A.M., Iverson, L.R. y Liaw, A., 2006. Newer classification and regression tree techniques: bagging and random forests for ecological prediction. En: *Ecosystems*, 9(2), pp.181- 199.
- Santos, A.M. y Tabarelli, M., 2002. Distance from roads and cities as a predictor of habitat loss and fragmentation in the Caatinga vegetation of Brazil. En: *Brazilian Journal of Biology*, 62(4B), pp.897-905.
- Schmidt, K., Behrens, T. y Scholten, T., 2008. Instance selection and classification tree analysis for large spatial datasets in digital soil mapping. En: *Geoderma*, 146, pp.138-146.
- Segura, A.M., Piccini, C., Nogueira, L., Alcántara, I., Calliari, D. y Kruk, C., 2017. Increased sampled volume improves *Microcystis aeruginosa* complex (MAC) colonies detection and prediction using Random Forests. En: *Ecological Indicators*, 79, pp.347-354.
- Seiler, A. y Helldin, J.O., 2006. Mortality in wildlife due to transportation. En: Davenport, John y Davenport, Julia, L., eds. *The ecology of transportation: managing mobility for the environment*. Amsterdam: Springer. pp.165-189.
- Pino Cubiles, Patricia, 2017. *Evaluación del riesgo crediticio mediante árboles de clasificación y bosques aleatorios* [En línea]. Sevilla: Universidad de Sevilla. [Consulta: 10/2/2020]. Disponible en: <http://bibing.us.es/proyectos/abreproy/91149/fichero/MEMORIATFG.pdf>
- R-Core Team, 2019. R: *A language and environment for statistical computing* [En línea]. Vienna: R Foundation for Statistical Computing. [Consulta: 8/6/2020]. En: <https://www.R-project.org/>.
- Taylor, B.D. y Goldingay, R.L., 2004. Wildlife road-kills on three major roads in north-eastern New South Wales. En: *Wildlife Research*, 31, pp.83-89.
- Torres, A., Velázquez, A. y Lobato, J., 2003. Riqueza, diversidad y patrones de distribución espacial de los mamíferos. En: Velázquez, A., Torres, A. y Bocco, G., comp. *Las enseñanzas de San Juan. Investigación participativa para el manejo integral de recursos naturales*. México: Instituto Nacional de Ecología. pp.277-299.