



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
POSGRADO EN CIENCIAS BIOLÓGICAS
FACULTAD DE CIENCIAS
ECOLOGÍA

(PROYECTO)

**HUELLAS SOBRE EL ASFALTO: EL IMPACTO DE LAS CARRETERAS SOBRE LOS
VERTEBRADOS TERRESTRES EN LA PENÍNSULA DE YUCATÁN (2016-2021)**

TESIS

(POR ARTÍCULO CIENTÍFICO)

**HUELLAS SOBRE EL ASFALTO: EL IMPACTO DE LAS
CARRETERAS SOBRE LOS VERTEBRADOS TERRESTRES EN LA
PENÍNSULA DE YUCATÁN (2016-2021)**

QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:
MAESTRA EN CIENCIAS BIOLÓGICAS

PRESENTA:

YAZMIN ADRIANA CARRASCO SALGADO

TUTOR PRINCIPAL DE TESIS:

Dr. CARLOS ALBERTO YÁÑEZ ARENAS
FACULTAD DE CIENCIAS, UNAM

COMITÉ TUTOR:

Dr. LUIS ALFREDO OSORIO OLVERA
INSTITUTO DE ECOLOGÍA, UNAM
Dr. FRANCISCO XAVIER CHIAPPA CARRARA
UMDI-SISAL, UNAM

Ciudad Universitaria, CD. MX.

enero 2024



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
POSGRADO EN CIENCIAS BIOLÓGICAS
FACULTAD DE CIENCIAS
ECOLOGÍA

(PROYECTO)

**HUELLAS SOBRE EL ASFALTO: EL IMPACTO DE LAS CARRETERAS SOBRE LOS
VERTEBRADOS TERRESTRES EN LA PENÍNSULA DE YUCATÁN (2016-2021)**

TESIS

(POR ARTÍCULO CIENTÍFICO)

**HUELLAS SOBRE EL ASFALTO: EL IMPACTO DE LAS
CARRETERAS SOBRE LOS VERTEBRADOS TERRESTRES EN LA
PENÍNSULA DE YUCATÁN (2016-2021)**

QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:
MAESTRA EN CIENCIAS BIOLÓGICAS

PRESENTA:

YAZMIN ADRIANA CARRASCO SALGADO

TUTOR PRINCIPAL DE TESIS:

Dr. CARLOS ALBERTO YÁÑEZ ARENAS
FACULTAD DE CIENCIAS, UNAM

COMITÉ TUTOR:

Dr. LUIS ALFREDO OSORIO OLVERA
INSTITUTO DE ECOLOGÍA, UNAM
Dr. FRANCISCO XAVIER CHIAPPA CARRARA
UMDI-SISAL, UNAM

Ciudad Universitaria, CD. MX.

enero 2024

COORDINACIÓN GENERAL DE ESTUDIOS DE POSGRADO
COORDINACIÓN DEL POSGRADO EN CIENCIAS BIOLÓGICAS
FACULTAD DE CIENCIAS
OFICIO: CGEP/CPCB/FC/0914/2023
ASUNTO: Oficio de Jurado

M. en C. Ivonne Ramírez Wence
Directora General de Administración Escolar, UNAM
Presente.

Me permito informar a usted que en la reunión del Comité Académico del Posgrado en Ciencias Biológicas, celebrada el día **11 de septiembre de 2023** se aprobó el siguiente jurado para el examen de grado de **MAESTRA EN CIENCIAS BIOLÓGICAS** en el campo de conocimiento de **Ecología** de la alumna **CARRASCO SALGADO YAZMIN ADRIANA** con número de cuenta **309062455** por la modalidad de graduación de **tesis por artículo científico** titulado: **"Huellas sobre el asfalto: el impacto de las carreteras sobre los vertebrados terrestres en la Península de Yucatán (2016-2021)"**, que es producto del proyecto realizado en la maestría que lleva por título **"Huellas sobre el asfalto: el impacto de las carreteras sobre los vertebrados terrestres en la Península de Yucatán (2016-2021)"** ambos realizados bajo la dirección del **DR. CARLOS ALBERTO YÁÑEZ ARENAS**, quedando integrado de la siguiente manera:

Presidente: DR. OCTAVIO RAFAEL ROJAS SOTO
Vocal: DR. OMAR HERNÁNDEZ ORDOÑEZ
Vocal: M. EN C. NOÉ PACHECO CORONEL
Vocal: DR. ALBERTO GONZÁLEZ GALLINA
Secretario: DR. LUIS ALFREDO OSORIO OLVERA

Sin otro particular, me es grato enviarle un cordial saludo.

ATENTAMENTE
"POR MI RAZA HABLARÁ EL ESPÍRITU"
Ciudad Universitaria, Cd. Mx., a 17 de noviembre de 2023

COORDINADOR DEL PROGRAMA



DR. ADOLFO GERARDO NAVARRO SIGÜENZA



c. c. p. Expediente del alumno
AGNS/AAC/GEMF/EARR/mnm

Agradecimientos institucionales

En primer lugar, al Posgrado en Ciencias Biológicas de la UNAM.

Este trabajo fue realizado con el apoyo del Consejo Nacional de Humanidades, Ciencias y Tecnologías (CONAHCYT) mediante una beca de maestría con el número de becario CVU 1147254 durante agosto de 2021 a julio de 2023.

De igual manera, a su proyecto “Ciencia de Frontera 2023” con clave de solicitud CF-2023-I-2589 cuya investigación permite la continuidad de este proyecto.

Agradezco a los miembros de mi Comité Tutor, el Dr. Carlos Alberto Yáñez Arenas (Tutor principal), por su dirección y asesoría durante la realización de este proyecto y en mi formación personal.

Al Dr. Luis Alfredo Osorio Olvera y el Dr. Francisco Xavier Chiappa Carrara, por el interés y apoyo mostrado en estos cuatro semestres sobre todo por sus atentos comentarios durante cada evaluación.

Agradecimientos a título personal

A los integrantes del Laboratorio de Ecología Geográfica (EcolGeo), UNAM en el Parque Científico Tecnológico de Yucatán (PCTY), por la toma de datos para este proyecto y la formación de la base de datos DOR (“*death on the road*” – en español “*muerte en el camino*”) en Naturalista.

A los sinodales para examen de grado que dedicaron su tiempo para revisar detalladamente este trabajo apoyando con sus valiosas aportaciones y sugerencias: el Dr. Octavio Rafael Rojas Soto (INECOL), Dr. Omar Hernández Ordóñez (IB, UNAM), M. en C. Noé Pacheco Coronel (FC, UNAM) y al Dr. Alberto González Gallina (INECOL).

Al Dr. Oliver López Corona, por su asesoría e interés en el proyecto.

A la UMDI-SISAL, Facultad de Ciencias, por el apoyo brindado durante el desarrollo y término de este proyecto de investigación.

Finalmente, al personal del Posgrado en Ciencias Biológicas y en especial a todos aquellos quienes respondieron mis dudas.

A Jehová Dios, por su sabiduría y amor “*Porque las cualidades invisibles de él se ven claramente desde la creación del mundo en adelante, porque se perciben por las cosas hechas, hasta su poder sempiterno y Divinidad, de modo que ellos son inexcusables*” (Romanos 1:20).

A mi amada madre Frank, eres mi fortaleza y modelo. Gracias por resistir, por recordarme el camino, por tus ricas comidas para consentirme. Por ser mi ejemplo en tu lucha constante, este mundo no está preparado para una mujer como tú.

A mi artista favorito, quien me acercó a la ciencia y el arte, mi mejor amigo, mi *api* Juan Carlos. Por siempre tener sabiduría en tus palabras, reconvertirme con una charla y sobre todo por escuchar. Cada paso que doy tiene un poco de ti.

A mi hermano *Gabis*, Carlos Carrasco, mi persona favorita. Por tu hermoso corazón y tu sonrisa eterna, siempre sabes colocarme en el lugar correcto con tus charlas. Eres y serás la persona que más brilla.

Gracias a mis familiares; principalmente a mis tíos que son como mis segundos padres: Paty Salgado, Alejandro Juárez y Alfredo Salgado. A Sahid A. Juárez y Fann Morales (mis primos, que me apoyan en todo y a quienes admiro). A mis abuelitos, Pedro y Carmen González.

A mis amigos, Carolina Ávila *Karitho* (por siempre estar) eres mi otra mitad. A David Culebro (mi corazón), Marianne Tapia (por tu hermosa persona) y Abril (por llegar en el momento correcto para salvarme), por todas nuestras charlas, paseos, lagrimas, aventuras, tazas de café y vino, nunca te vayas. A todos, los quiero mucho.

A Diego Gutiérrez, Hugo R. (mi *Sugus*), Roberto Cárdenas (por mostrarme la verdadera fortaleza y amistad), Xóchitl Guzmán (te extraño), Paulina Corona, Hugo Rocha (gracias por ser arte), Amador de la Rosa (por escuchar en la madrugada y en todo momento) a mi bailarina favorita Candi (gracias por regresar), a mi Catica, Uli e Ivanchi (por más aventuras en la selva), Angelito (por siempre hacerme reír), a Mar Jorge (por confiar en mí y en mi arte) y a Damián (por ser mi amigo de trámites y estrés).

A las personas que confían en mí, con cariño a la Sra. Araceli Moctezuma y mi amiga la Lic. Leticia Díaz. A Juan José Moctezuma (cada meta que cumplo es por los dos) y a Guillermo Ramos a quienes extraño muchísimo. A mis alumnos que cada día me motivan a ser una mejor profesional. A mis amigos, asesores académicos y hasta de vida, el M. en C. Noé Pacheco Coronel y el Dr. Oliver López Corona.

Dedico este proyecto con mucho amor a mi abuelita Dominga Martínez. Nos volveremos a ver cuándo seamos *polvo de estrellas*, anhelo volver a escuchar tus historias.

ÍNDICE

| | |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| RESUMEN | 1 |
| ABSTRACT | 2 |
| INTRODUCCIÓN GENERAL | 3 |
| ARTÍCULO CIENTÍFICO DE MAESTRÍA: | |
| Huellas sobre el asfalto: el impacto de las carreteras sobre los vertebrados terrestres en la Península de Yucatán (2016-2021)..... | 6 |
| DISCUSIÓN GENERAL Y CONCLUSIONES | 43 |
| RECOMENDACIONES | 50 |
| REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS | 51 |

RESUMEN

Las carreteras y caminos son una de las obras de infraestructura que más impacto causan sobre la vida silvestre. En este trabajo, se evaluó el impacto de las carreteras sobre la mortalidad de vertebrados a escala regional y de paisaje en la Península de Yucatán (PY), México durante un periodo de seis años (2016-2021). A escala regional (PY) se registraron 572 individuos atropellados, siendo los reptiles (72.02%) el grupo más impactado. En cuanto a la riqueza taxonómica, se documentaron 100 especies impactadas, de las cuales 25 se encuentran en alguna categoría de riesgo. Además, se encontraron 15 especies endémicas de la PY; entre ellas, la serpiente de cascabel yucateca (*Crotalus tzabcan*) fue la más afectada con 28 individuos. En cuanto a la variación estacional, se observó que el mayor número de muertes por atropellamiento ocurrieron en la temporada de lluvias (65.98%, $N=535$). A escala paisaje (*Carretera Sierra Papacal-Chuburná puerto*), se registraron 215 individuos atropellados y las especies con mayor número de individuos muertos en lluvias, fueron dos reptiles y un anfibio *Ctenosaura similis*, *Mastigodryas melanolomus* y *Rhinella horribilis*. Los resultados muestran que las serpientes son especialmente susceptibles a ser atropelladas independientemente de la escala. Este estudio aporta información clave para la construcción de pasos de fauna y para la implementación de estrategias de mitigación del impacto de las carreteras sobre los vertebrados de la PY.

Palabras clave: Ecología de carreteras, urbanismo, fragmentación, impacto antropogénico, reptiles, atropellamientos.

ABSTRACT

Roads and highways are some of the infrastructure projects that have the most significant impact on wildlife. In this study, we evaluated the impact of roads on vertebrate mortality at both regional and landscape scales in the Yucatan Peninsula (YP), Mexico, over six years (2016-2021). At the regional scale (YP), we recorded 572 roadkill individuals, with reptiles (72.02%) being the most affected group. Regarding taxonomic richness, we documented 100 impacted species, out of which 25 are in some risk category. Additionally, we found 15 endemic species that fell victim to roadkill, with the Yucatan rattlesnake (*Crotalus tzabcan*) being the most affected with 28 individuals. Concerning seasonal variation, we observed that the highest number of roadkill deaths occurred during the rainy season (65.98%, N=535). At the landscape scale (*Sierra Papacal-Chuburná Puerto Highway*), we registered 215 roadkill individuals and the species with the highest number of individuals killed in rain were two reptiles and an amphibian *Ctenosaura similis*, *Mastigodryas melanolomus* and *Rhinella horribilis*. Our results demonstrate that snakes are particularly susceptible to roadkill, regardless of the scale. This study provides crucial information constructing wildlife crossings and implementing strategies to mitigate the impact of roads on vertebrates in the Yucatan Peninsula.

Key words: highway ecology, urban ecology, habitat fragmentation, anthropogenic impact, reptiles, roadkill.

INTRODUCCIÓN GENERAL

La construcción de vías de comunicación ha sido una necesidad básica de las sociedades humanas (Arroyave *et al.*, 2006). Actualmente la pavimentación de estas vías es la forma más común de conectar comunidades y de esta manera generar desarrollo socioeconómico (Morlans, 2005). No obstante, estas grandes obras de infraestructura afectan profundamente los ambientes naturales que atraviesan causando distintos tipos de impacto sobre los ecosistemas y las especies que los habitan (Delgado *et al.*, 2004; Rojas-Chacón, 2011). Estas obras para transporte traen consigo modificaciones desde el momento de la construcción (Benítez *et al.*, 2021), por ejemplo, la extracción de recursos, alteración o eliminación total de ecosistemas, cambios en la elevación de las aguas subterráneas, deslaves, erosión y sedimentación de ríos y lagos, degradación del paisaje y efecto borde (Gottdenker *et al.*, 2001; Delgado *et al.*, 2004). Iniciando por la destrucción del hábitat pues las carreteras implican la cementación de un área, dejando inservible el suelo (Morlans, 2005). También existen consecuencias socioculturales como: alteraciones de zonas arqueológicas, despojo de comunidades humanas con pagos injustos por sus tierras, uso de pesticidas, derrame de combustibles, aceites y desechos que afectan a las personas que habitan cerca de las carreteras (Morlans, 2005; Puc-Sánchez *et al.*, 2013). Además, las alteraciones sobre el ambiente continúan después del proceso de construcción, ya que durante su vida útil las carreteras representan un obstáculo para la movilización de especies (Morlans, 2005), lo que incrementa el aislamiento y la subdivisión de sus poblaciones silvestres (Ceia-Hasse *et al.*, 2018); además, son una de las principales causas de fragmentación de hábitats (Delgado *et al.*, 2004) representado también una fuente de contaminación por ruido que afectan a especies que vocalizan como aves y anfibios (Arroyave *et al.*, 2006; Benítez *et al.*, 2021). La riqueza taxonómica se ve afectada negativamente porque la barrera que supone la carretera impide el tránsito de individuos para satisfacer sus necesidades básicas como el acceso a cuerpos de agua (en regiones donde este recurso escasea) y la alimentación, provocando un declive en las poblaciones de algunas especies y extinciones locales (Morlans, 2005; Puc-Sánchez *et al.*, 2013). Asimismo, la introducción de fauna y flora exótica o invasora asociada al efecto borde de las carreteras produce alteración en las cadenas tróficas (Delgado *et al.*, 2004; Morlans, 2005).

Uno de los impactos directos más evidentes de las carreteras es el atropellamiento de vertebrados por parte de los vehículos de motor (Gottdenker *et al.*, 2001; Contreras-Moreno *et al.*, 2013). Este puede ser relativamente fácil de cuantificar y por lo general nos permite conocer diversos atributos de la afectación (Rojas-Chacón, 2011; Delgado-Vélez, 2014). Es por esto que algunos países han promovido el registro sistematizado, análisis del impacto carretero (Puc-Sánchez *et al.*, 2013), estudios de las problemáticas ambientales o de conservación, así como la generación de estudios científicos regionales de lo que hoy en día se conoce como *ecología de carreteras* (Rojas-Chacón, 2011), término acuñado en los 90 por Forman y Alexander (1998). Sin embargo, la mayoría de estas iniciativas e investigaciones se han generado en países templados (González-Gallina y Benítez-Badillo, 2013), mientras que en países tropicales en el mejor de los casos sólo

existen registros fortuitos y estudios locales (Arroyave *et al.*, 2006). En una revisión global sobre impacto carretero, los autores encontraron que las regiones con más estudios son los Estados Unidos de América, algunos países europeos y Australia (González-Gallina y Benítez-Badillo, 2013). En Latinoamérica el número de investigaciones aumentó después del 2011 y los países más productivos en artículos científicos actualmente son Costa Rica, Colombia y Brasil (Monge-Nájera, 2018). Aunque México no se menciona entre estos trabajos, González-Gallina y Benítez-Badillo (2013) identificaron que desde el año 1991 se comenzaron a realizar estudios sobre el tema. Hasta este momento, existen al menos catorce estudios del impacto carretero en nuestro país (González-Gallina y Benítez-Badillo, 2013), no obstante, considerando a la Península de Yucatán (PY) existe una recopilación de estudios sobre impacto de las vías de comunicación en áreas protegidas en el sureste de México en donde sólo ocho estudios evalúan específicamente el impacto carretero sobre vertebrados terrestres (Benítez y Escalona-Segura, 2021). Estos ocho estudios son: tres a lo largo de un tramo de carretera en la Región de Calakmul, Campeche (Brichieri-Colombi y Alexander, 2021; (1 y 2) Sánchez-Acuña y Benítez, 2021), uno en el libramiento Atasta, Campeche (Pozo-Montuy *et al.*, 2021), otro en una carretera de Knchil-Celestún, Yucatán (Nahuat-Cervera *et al.*, 2021). Dos en reservas importantes como en la cueva el Volcán de los murciélagos, Campeche (Vargas-Contreras *et al.*, 2021) y en el Santuario del manatí, Quintana Roo (Cedeño-Vázquez *et al.*, 2021). Finalmente, una evaluación ambiental del impacto asociado al Tren maya en las reservas de Calakmul y Balam-Kú, Campeche (Benítez *et al.*, 2021). Los estudios sobre el atropellamiento en carreteras son fundamentales para poder realizar planes y tomar mejores decisiones en cuanto a la construcción de infraestructura vial y de comunicación (Arroyave *et al.*, 2006). La falta de información resalta la importancia de realizar estudios específicos en zonas de importancia biológica como lo es la PY.

Este estudio evaluó el impacto carretero sobre la mortalidad de vertebrados terrestres a dos escalas espaciales (*paisaje* – una carretera de 13.8 km de largo ubicada al noroeste del estado de Yucatán, y *regional* – toda la Península de Yucatán) durante el periodo 2016-2021. Asimismo, se determinó lo siguiente: 1) ¿Qué organismos y cuántos son lo más impactados?, 2) ¿Qué especies impactadas se encuentran bajo alguna categoría de riesgo en los listados de La Norma Oficial Mexicana (NOM-059-SEMARNAT-2010), La Convención sobre el Comercio Internacional de Especies Amenazadas de Fauna y Flora Silvestres (CITES) y La Unión Internacional para la Conservación de la Naturaleza (IUCN)?, 3) ¿Qué especies endémicas a la PY fueron impactadas durante el periodo de monitoreo?, 4) ¿Qué grupo taxonómico fue más vulnerable al impacto carretero?; y finalmente, 5) ¿Cómo varió la cantidad de atropellamientos respecto a la temporalidad intra- e inter-anual?

[RMB] Acuse de recibo de artículo > Recibidos x



Fernando Álvarez Noguera <revmexbio@ib.unam.mx>
para mí ▾

18:12 (hace 0 minutos) ☆ ↶

Yazmin Adriana Carrasco Salgado:

Gracias por enviar el manuscrito "Huellas sobre el asfalto: el impacto de las carreteras sobre los vertebrados terrestres en la Península de Yucatán (2016-2021)" a Revista Mexicana de Biodiversidad.

Con nuestro sistema de gestión de revistas en línea, podrá iniciar sesión en el sitio web de la revista y hacer un seguimiento de su progreso a través del proceso editorial.

URL del manuscrito: <https://revista.ib.unam.mx/index.php/bio/authorDashboard/submission/5333>

Nombre de usuario/a: adrycarrasco1803

ES IMPORTANTE QUE USE UN ÚNICO REGISTRO PERSONAL PARA MÚLTIPLES CONTRIBUCIONES (TRATAMIENTO EDITORIAL, CONSULTAS, ETC).

En caso de dudas sobre el registro, contacte con la Editora técnica Ma. Antonieta Arizmendi (aarizmen@ib.unam.mx). Gracias por elegir esta revista para publicar su trabajo.

Fernando Álvarez Noguera

Revista Mexicana de Biodiversidad <http://www.revista.ib.unam.mx>

Carrasco-Salgado et al., Huellas sobre el asfalto: el impacto de las carreteras.

Huellas sobre el asfalto: el impacto de las carreteras sobre los vertebrados terrestres en la Península de Yucatán (2016-2021)

Footprints on the asphalt: the impact of roads on terrestrial vertebrates in the Yucatan Peninsula (2016-2021)

Yazmin Adriana Carrasco-Salgado*, Carlos Alberto Yáñez Arenas^{2*}, Luis Alfredo Osorio-Olvera³ y Francisco Xavier Chiappa-Carrara⁴.

*Posgrado en Ciencias Biológicas, Laboratorio de Ecología Geográfica ECOLGEO, UMDI-Sisal, Facultad de Ciencias, Universidad Nacional Autónoma de México, Mérida, Yucatán, México, C.P. 97000 adri180333@gmail.com**

Laboratorio de Ecología Geográfica ECOLGEO, UMDI-Sisal, Facultad de Ciencias, Universidad Nacional Autónoma de México, Mérida, Yucatán, México, C.P. 97000 carlos_yanez@ciencias.unam.mx^{2}*

Laboratorio de Genética y Ecología, Departamento de Ecología de la Biodiversidad, Universidad Nacional Autónoma de México, Ciudad de México, México, C.P. 04510 luismurao@gmail.com³

Laboratorio de Biología de la Conservación, UMDI-Sisal, Facultad de Ciencias, Escuela Nacional de Estudios Superiores (ENES) Mérida, Yucatán, México, C.P. 97000 xcc@ciencias.unam.mx⁴

Resumen. Las carreteras y caminos son una de las obras de infraestructura que más impacto causan sobre la vida silvestre. En este trabajo, se evaluó el impacto de las carreteras sobre la mortalidad de vertebrados a escala regional y de paisaje en la Península

de Yucatán (PY), México durante un periodo de seis años (2016-2021). A escala regional (PY) se registraron 572 individuos atropellados, siendo los reptiles (72.02%) el grupo más impactado. En cuanto a la riqueza taxonómica, se documentaron 100 especies impactadas, de las cuales 25 se encuentran en alguna categoría de riesgo. Además, se encontraron 15 especies endémicas de la PY; entre ellas, la serpiente de cascabel yucateca (*Crotalus tzabcan*) fue la más afectada con 28 individuos. En cuanto a la variación estacional, se observó que el mayor número de muertes por atropellamiento ocurrieron en la temporada de lluvias (65.98%, $N=535$). A escala paisaje (*Carretera Sierra Papacal-Chuburná puerto*), se registraron 215 individuos atropellados y las especies con mayor número de individuos muertos en lluvias, fueron dos reptiles y un anfibio *Ctenosaura similis*, *Mastigodryas melanolomus* y *Rhinella horribilis*. Los resultados muestran que las serpientes son especialmente susceptibles a ser atropelladas independientemente de la escala. Este estudio aporta información clave para la construcción de pasos de fauna y para la implementación de estrategias de mitigación del impacto de las carreteras sobre los vertebrados de la PY.

Palabras clave: Ecología de carreteras, urbanismo, fragmentación, impacto antropogénico, reptiles, atropellamientos.

Abstract. Roads and highways are some of the infrastructure projects that have the most significant impact on wildlife. In this study, we evaluated the impact of roads on vertebrate mortality at both regional and landscape scales in the Yucatan Peninsula (YP), Mexico, over six years (2016-2021). At the regional scale (YP), we recorded 572 roadkill individuals, with reptiles (72.02%) being the most affected group. Regarding taxonomic richness, we documented 100 impacted species, out of which 25 are in some risk category. Additionally, we found 15 endemic species that fell victim to roadkill, with the Yucatan

rattlesnake (*Crotalus tzabcan*) being the most affected with 28 individuals. Concerning seasonal variation, we observed that the highest number of roadkill deaths occurred during the rainy season (65.98%, N=535). At the landscape scale (*Sierra Papacal-Chuburná Puerto Highway*), we registered 215 roadkill individuals and the species with the highest number of individuals killed in rain were two reptiles and an amphibian *Ctenosaura similis*, *Mastigodryas melanolomus* and *Rhinella horribilis*. Our results demonstrate that snakes are particularly susceptible to roadkill, regardless of the scale. This study provides crucial information constructing wildlife crossings and implementing strategies to mitigate the impact of roads on vertebrates in the Yucatan Peninsula.

Key words: highway ecology, urban ecology, habitat fragmentation, anthropogenic impact, reptiles, roadkill.

Introducción

La construcción de vías de comunicación ha sido una necesidad básica de las sociedades humanas (Arroyave *et al.*, 2006). Actualmente la pavimentación de estas vías es la forma más común de conectar comunidades y de esta manera generar desarrollo socioeconómico (Morlans, 2005). No obstante, estas grandes obras de infraestructura afectan profundamente los ambientes naturales que atraviesan causando distintos tipos de impacto sobre los ecosistemas y las especies que los habitan (Delgado *et al.*, 2004; Rojas-Chacón, 2011). Estas obras para transporte traen consigo modificaciones desde el momento de la construcción, por ejemplo, la extracción de recursos, alteración o eliminación total de ecosistemas, cambios en la elevación de las aguas subterráneas, deslaves, erosión y sedimentación de ríos y lagos, degradación del paisaje y efecto borde (Gottdenker *et al.*, 2001; Delgado *et al.*, 2004). Iniciando porque las carreteras implican la cementación de un área, dejando inservible el suelo (Morlans, 2005). También existen

consecuencias socioculturales como: alteraciones de zonas arqueológicas, despojo de comunidades humanas con pagos injustos por sus tierras, uso de pesticidas, derrame de combustibles, aceites y desechos que afectan a las personas que habitan cerca de las carreteras (Morláns, 2005; Puc-Sánchez *et al.*, 2013). Además, las alteraciones sobre el ambiente continúan después del proceso de construcción, ya que durante su vida útil las carreteras representan un obstáculo para la movilización de especies (Morláns, 2005), lo que incrementa el aislamiento y la subdivisión de sus poblaciones silvestres (Ceia-Hasse *et al.*, 2018); además, son una de las principales causas de fragmentación de hábitats (Delgado *et al.*, 2004) representado también una fuente de contaminación por ruido que afectan a especies que vocalizan como aves y anfibios (Arroyave *et al.*, 2006; Benítez *et al.*, 2021). La riqueza taxonómica se ve afectada negativamente porque la barrera que supone la carretera impide el tránsito de individuos para satisfacer sus necesidades básicas como el acceso a cuerpos de agua (en regiones donde este recurso escasea) y la alimentación, provocando un declive en las poblaciones de algunas especies y extinciones locales (Morláns, 2005; Puc-Sánchez *et al.*, 2013). Asimismo, la introducción de fauna y flora exótica o invasora asociada al efecto borde de las carreteras produce alteración en las cadenas tróficas (Delgado *et al.*, 2004; Morláns, 2005).

Uno de los impactos directos más evidentes de las carreteras es el atropellamiento de vertebrados por parte de los vehículos de motor (Gottdenker *et al.*, 2001; Contreras-Moreno *et al.*, 2013). Este puede ser relativamente fácil de cuantificar y por lo general nos permite conocer diversos atributos de la afectación (Rojas-Chacón, 2011 y Delgado-Vélez, 2014). Es por esto que algunos países han promovido el registro sistematizado, análisis del impacto carretero (Puc-Sánchez *et al.*, 2013), estudios de las problemáticas ambientales o de conservación, así como la generación de estudios científicos regionales de lo que hoy en día se conoce como *ecología de carreteras* (Rojas-Chacón, 2011),

término acuñado en los 90 por Forman y Alexander (1998). Sin embargo, la mayoría de estas iniciativas e investigaciones se han generado en países templados (González-Gallina y Benítez-Badillo, 2013), mientras que en países tropicales en el mejor de los casos sólo existen registros fortuitos y estudios locales (Arroyave *et al.*, 2006).

En una revisión global sobre impacto carretero, los autores encontraron que las regiones con más estudios son los Estados Unidos de América, algunos países europeos y Australia (González-Gallina y Benítez-Badillo, 2013). En Latinoamérica el número de investigaciones aumentó después del 2011 y los países más productivos en artículos científicos actualmente son Costa Rica, Colombia y Brasil (Monge-Nájera, 2018). Aunque México no se menciona entre estos trabajos, González-Gallina y Benítez-Badillo (2013) identificaron que desde el año 1991 se comenzaron a realizar estudios sobre el tema. Hasta este momento, existen al menos catorce estudios del impacto carretero en nuestro país (González-Gallina y Benítez-Badillo, 2013), no obstante, considerando la Península de Yucatán (PY), existe una recopilación de estudios sobre impacto de las vías de comunicación en áreas protegidas en el sureste de México en donde sólo ocho estudios evalúan específicamente el impacto carretero sobre vertebrados terrestres (Benítez y Escalona-Segura, 2021). Estos ocho estudios son: tres a lo largo de un tramo de carretera en la Región de Calakmul, Campeche (Brichieri-Colombi y Alexander, 2021; (1 y 2) Sánchez-Acuña y Benítez, 2021), uno en el libramiento Atasta, Campeche (Pozo-Montuy *et al.*, 2021), otro en una carretera de Knchil-Celestún, Yucatán (Nahuat-Cervera *et al.*, 2021). Dos en reservas importantes como en la cueva el Volcán de los murciélagos, Campeche (Vargas-Contreras *et al.*, 2021) y en el Santuario del manatí, Quintana Roo (Cedeño-Vázquez *et al.*, 2021). Finalmente, una evaluación ambiental del impacto asociado al Tren maya en las reservas de Calakmul y Balam-Kú, Campeche (Benítez *et al.*, 2021). Los estudios sobre el atropellamiento en carreteras son fundamentales para

poder realizar planes y tomar mejores decisiones en cuanto a la construcción de infraestructura vial y de comunicación (Arroyave *et al.*, 2006). La falta de información resalta la importancia de realizar estudios específicos en zonas de importancia biológica como lo es la PY.

Este estudio evaluó el impacto carretero sobre la mortalidad de vertebrados terrestres a dos escalas espaciales (*paisaje* – una carretera de 13.8 km de largo ubicada al noroeste del estado de Yucatán, y *regional* – toda la Península de Yucatán) durante el periodo 2016-2021. Asimismo, se determinó lo siguiente: 1) ¿Qué organismos y cuántos son lo más impactados?, 2) ¿Qué especies impactadas se encuentran bajo alguna categoría de riesgo en los listados de La Norma Oficial Mexicana (NOM-059-SEMARNAT-2010), La Convención sobre el Comercio Internacional de Especies Amenazadas de Fauna y Flora Silvestres (CITES) y La Unión Internacional para la Conservación de la Naturaleza (IUCN)?, 3) ¿Qué especies endémicas a la PY fueron impactadas durante el periodo de monitoreo?, 4) ¿Qué grupo taxonómico fue más vulnerable al impacto carretero?, y finalmente, 5) ¿Cómo varió la cantidad de atropellamientos respecto a la temporalidad intra- e inter-anual?

Materiales y métodos

Sitios de estudio

Escala regional (origen de los datos: exclusivamente portal Naturalista). Se eligió la Península de Yucatán (PY) debido a que: 1) en esta región se ha incrementado enormemente el desarrollo de infraestructura vial en los últimos años, afectando severamente los sistemas naturales (Escobar, 1998; Ceballos *et al.*, 2005), y 2) sus selvas

y hábitats albergan una gran biodiversidad que se podría estar perdiendo por el desarrollo carretero (Ceballos *et al.*, 2005) (Fig. 1).

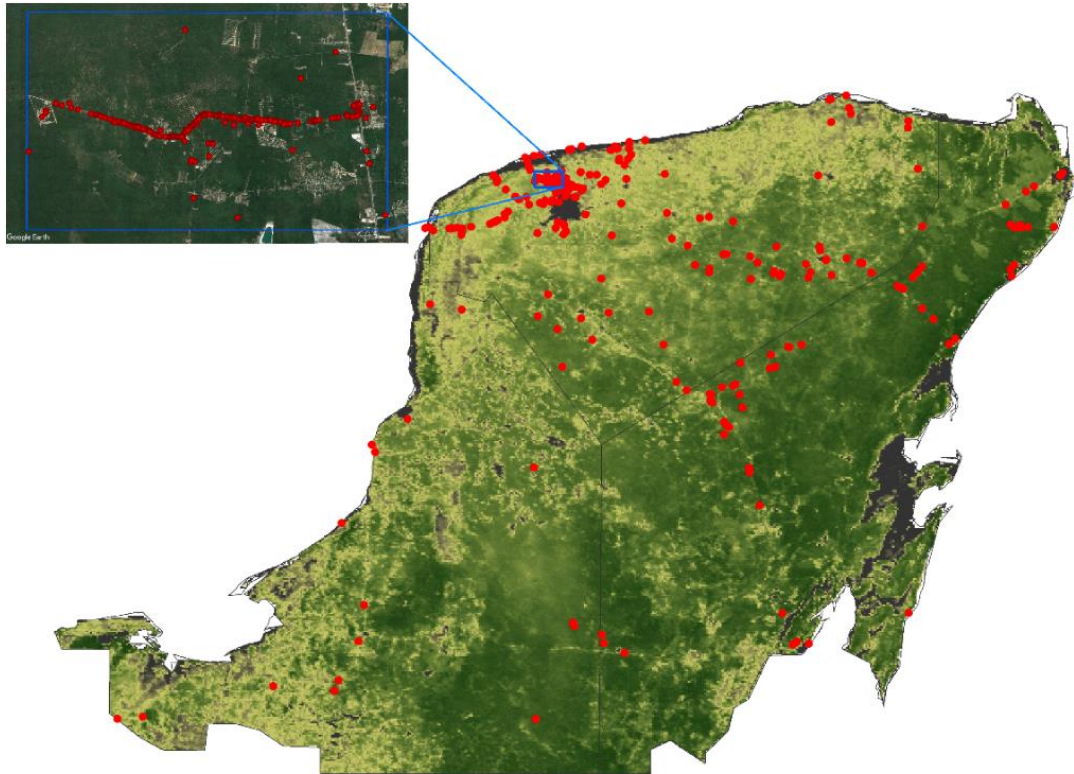


Figura 1. Mapa de las dos escalas de análisis: regional (PY) y paisaje (Carretera Sierra Papacal – Chuburná Puerto). Los puntos rojos representan los registros de atropellamiento de vertebrados terrestres de 2016-2021.

La PY tiene un clima cálido subhúmedo con temperatura promedio anual de entre 25.8-26.3°C y una estacionalidad determinada por el paso de huracanes durante la segunda mitad del año (Orellana-Lanza *et al.*, 2009). De acuerdo con Orellana-Lanza y colaboradores (2009), se distinguen dos temporadas: lluvias (de junio a noviembre) y secas (de diciembre a mayo). La temporada de lluvias tiene un periodo llamado intra-estival o canícula (julio y agosto) y la temporada de sequía cuenta con una subtemporada pre-estival o primavera (enero a abril) (Orellana-Lanza *et al.*, 2009; Márdero *et al.*, 2012).

Según el Centro de Investigación Científica de Yucatán (CICY), La mayor parte de la superficie del estado de Yucatán y en menor proporción en Campeche y Quintana Roo, está cubierta por selvas bajas caducifolias, al norte con cactáceas columnares, y variando con vegetación del *calichal yucateco* (tipo de vegetación forestal) exclusivamente en una estrecha franja en dirección oeste a este cerca de la costa de PY. Otro tipo de vegetación bastante frecuente son las selvas bajas inundables y finalmente, las selvas altas subperennifolias y altas perennifolias que ocupan las áreas más húmedas en los estados de Campeche y Quintana Roo (García y Contreras, 2011). La red carretera de la PY, entre los años 2001 y 2017 creció de 22 mil a 23.7 mil km de superficie, formando hasta 2016 una red vial de 17.8 mil km de superficie de rodamiento, lo que incluye autopistas, carreteras, caminos y la red urbana principal (Flores *et al.*, 2019).

Escala paisaje (origen de los datos: registros tomados mediante muestreo en un tramo de carretera). La red carretera de Yucatán es de 6.120 km, las autopistas de cuota alcanzan 154 km y la carretera Mérida-Progreso es el tramo más importante. Se eligió la carretera Sierra Papacal - Chuburná Puerto (Ctra SP-ChPto) ubicada al noroeste del estado de Yucatán para realizar un monitoreo prolongado del impacto carretero. Esta carretera tiene una extensión de 13.8 kilómetros totalmente pavimentada, con una superficie de 84,405 metros cuadrados, dividido en dos carriles que miden un ancho total de 8.1 metros, la velocidad máxima permitida de 80 km/h y posee un flujo vehicular aproximado de dos mil 575 unidades al año. Fue seleccionada dado que se encuentra rumbo al Parque Científico Tecnológico de Yucatán (PCTY) en donde trabajan alumnos y profesores del Laboratorio de Ecología Geográfica (EcolGeo, <https://www.ecolgeo.com/>) responsables de este estudio (Fig. 1). Según un estudio realizado por la SEMARNAT de manifestación ambiental, el tipo de vegetación asociada a esta carretera es principalmente secundaria derivada de selva baja caducifolia espinosa, los suelos son tsek'eles o *litosoles* que han

sido utilizados años atrás para cultivo de henequén; maíz y ganadería. A lo largo se observa la transición entre la selva baja caducifolia espinosa y las sabanas, finalmente se pueden observar manchones de tulares compuestos por diferentes especies de pastos (Resumen Ejecutivo de impacto ambiental SEMARNAT, 2011). Es importante mencionar que a lo largo de este tramo se encuentran numerosos tiraderos clandestinos de basura.

Trabajo de campo. En la Ctra SP-ChPto se realizó un monitoreo de los atropellamientos desde 2016 hasta 2021, de dos a tres veces por semana (exceptuando periodos vacacionales (diciembre-enero y mayo-junio), sin horarios establecidos y en automóvil a una velocidad constante. Cada individuo observado se identificó a nivel de especie por un experto y se anotaron las coordenadas geográficas, la fecha y la hora a la que fue encontrado. Todos los organismos se dejaron sobre la carretera y se redujo la posibilidad de doble conteo a razón de que todos los ejemplares cuentan con fotografía para ser identificados.

Trabajo de gabinete. Para impulsar la participación ciudadana en el registro de atropellamientos, se creó un proyecto en Naturalista (<https://www.naturalista.mx/projects/dor-yucatan-peninsula>) en el año 2017 bajo el nombre DOR (“*death on the road*” – en español “*muerte en el camino*”). Esta plataforma cuenta con registros de atropellamiento carretero en la PY desde el 2005. Estos reportes incrementaron sustancialmente en el año de su creación ya que integrantes de EcolGeo iniciaron una red de monitoreo de atropellamientos para toda la región que cuenta actualmente con 56 observadores comunitarios. A DOR se incorporaron los reportes del monitoreo de la Ctra SP-ChPto.

Los registros de DOR en Naturalista y los datos recopilados desde 2016 hasta 2021 en la Ctra SP-ChPto fueron clasificados por grupo taxonómico, temporada (estación: lluvias/seca) y año (2016-2021). Para cada escala de análisis (paisaje y regional) se calculó el número total de individuos atropellados y se generó una lista de especies impactadas. Esta lista se organizó para conocer qué especies impactadas se encuentran en alguna categoría de la NOM-059-SEMARNAT-2010 (SEMARNAT, 2010), La Convención sobre el Comercio Internacional de Especies Amenazadas de Fauna y Flora Silvestres (CITES - <https://cites.org/esp/disc/what.php>) y La Unión Internacional para la Conservación de la Naturaleza (IUCN - <https://www.iucn.org/es>); y cuales son endémicas a la PY. Especies que no tenían datos de fecha fueron eliminadas de la lista para el análisis de la temporalidad, debido a que no pudieron ser clasificadas. Respecto a la variación por año, sólo se tomaron en cuenta los datos de 2016 a 2021 debido a que el número de registros fue más constante, con un total de 536 individuos a escala regional y 207 individuos a escala paisaje.

Resultados

Especies y número de individuos atropellados

Escala regional (PY). En total se registraron 572 individuos atropellados que corresponden a 100 especies de vertebrados terrestres. Del total de individuos atropellados, 412 son reptiles (72.02%), 83 mamíferos (14.51%), 48 aves (8.39%) y 29 anfibios (5.06%) (Fig. 2. A, C). En cuanto a número de especies, se encontró que 44 son reptiles (43.6%), 27 son aves (26.7%), 23 mamíferos (22.8%) y 7 anfibios (6.9%) (Fig. 2. A, C). Las serpientes fueron el grupo más afectado tanto en individuos (334) como en número de especies (36) (Anexo Cuadro 1).

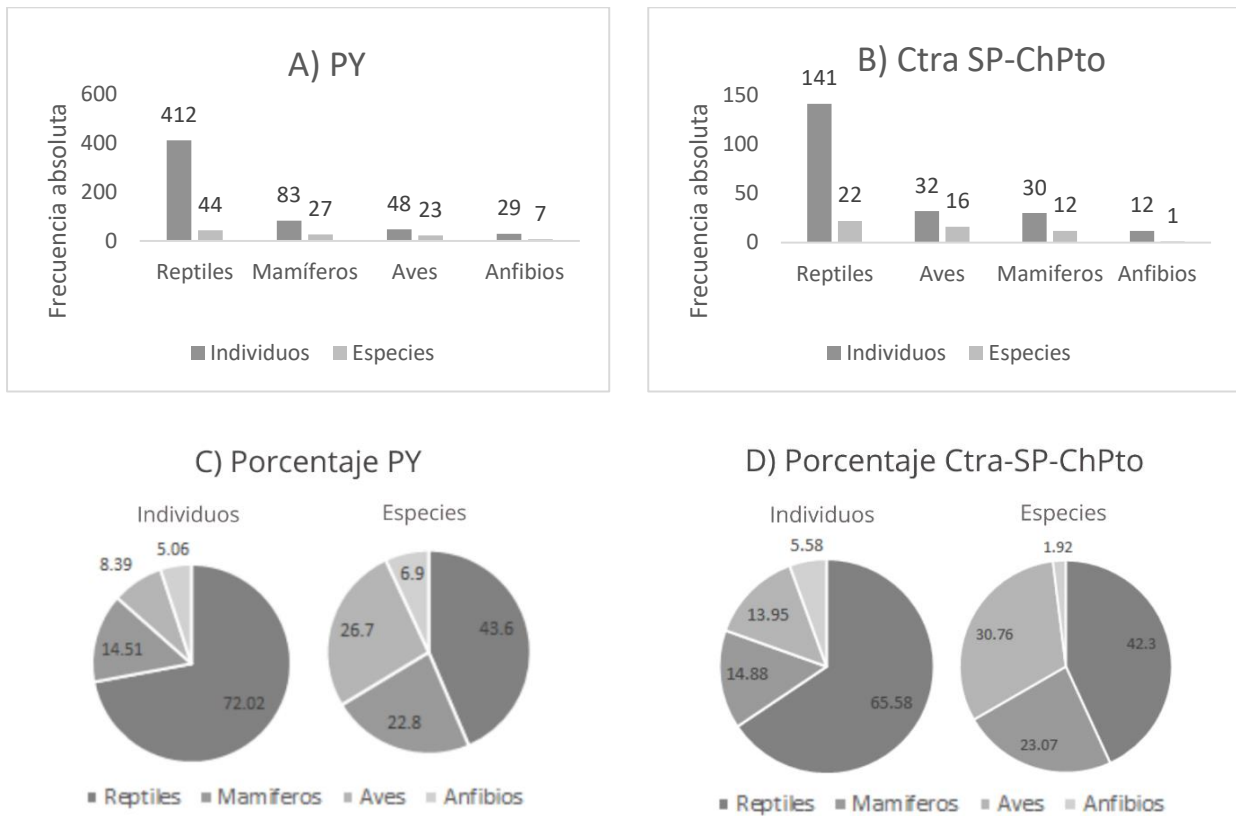


Figura 2. Atropellamiento de vertebrados terrestres en la carretera Sierra Papacal-Chuburná Puerto (Ctra SP-ChPto) en el estado de Yucatán, y en toda la península de Yucatán (PY) de 2016-2021. Total de individuos y especies impactadas (paneles A y B). Porcentaje de individuos y especies impactadas (paneles C y D).

Escala paisaje (Ctra SP-ChPto). Se registraron 215 individuos que corresponden a 51 especies de vertebrados terrestres. Del total de individuos atropellados a esta escala, 141 son reptiles (65.58%), 32 mamíferos (14.88%), 30 aves (13.95%) y 12 anfibios (5.58%) (Fig. 2. B, D). En cuanto a número de especies, se encontró que 22 son reptiles (42.3%), 16 son aves (30.76%), 12 mamíferos (23.07%) y 1 anfibio (1.92%) (Fig. 2. B, D). En esta escala también las serpientes fueron el suborden más afectado tanto en individuos (79) como en número de especies (20) (Anexo Cuadro 1).

Estado de conservación y endemismo

Escala regional (PY). Del total de especies que se registraron atropelladas en esta investigación, 25 se encuentran en alguna categoría de riesgo. Dentro de la NOM-059-SEMARNAT-2010, ocho especies se encuentran amenazadas (A) y 12 en Preocupación menor (Pr); en el CITES, tres dentro del apéndice I y cuatro dentro del apéndice II; mientras que, en la UICN, de las 25 especies que están en alguna categoría de riesgo en las otras listas, siete aparecen como especies no evaluadas y 18 en preocupación menor (LC) (ver Anexo Cuadro 1). Además 15 especies son endémicas a la PY siendo la mayoría reptiles (13). Entre las especies bajo alguna categoría de riesgo (en listas nacionales o internacionales) y que son endémicas a la PY destaca la serpiente de cascabel yucateca (*Crotalus tzabcan*) por el elevado número de individuos que se observaron atropellados en este estudio (28 individuos).

Escala paisaje (Ctra SP-ChPto). Del total de especies que se registraron atropelladas en esta carretera, 11 se encuentran en alguna categoría de riesgo. Dentro de la NOM-059-SEMARNAT-2010, cinco especies se encuentran amenazadas (A), cinco en preocupación menor (Pr) y una en peligro de extinción (P) (*Tamandua mexicana*); en el CITES, dos especies están dentro del apéndice II; mientras que, en la UICN, de las 11 especies que están en alguna categoría de riesgo en las otras listas, tres aparecen como especies no evaluadas y 8 en Preocupación menor (LC) (ver Anexo Cuadro 1). Seis especies son endémicas a la PY, perteneciendo todas al grupo de los reptiles. Asimismo, todas las especies bajo alguna categoría de riesgo y que son endémicas a la PY son serpientes.

Temporalidad y variación por año

Escala regional (PY). El porcentaje de especies atropelladas en la PY no varió respecto a la temporalidad, ya que en lluvias el porcentaje fue de 53.79% (78 especies) y en la temporada seca de 46.2% (67 especies) (Fig. 3. A). También, se observó un mayor número de individuos atropellados durante la temporada de lluvias (junio-noviembre), registrándose 353 (65.98%), y en secas (diciembre-mayo) 182 individuos (34.01%), con un total de $N=535$ atropellamientos (Fig. 3. A, C). El año que presentó mayor número de registros fue el 2021 (134 individuos), seguido del 2018 (127 individuos) (Fig. 3. C). En todos los años el número de individuos fue mayor en temporada de lluvias, excepto el 2021 en el que el número de muertes fue mayor en secas (81 individuos) respecto a lluvias (53 individuos) (Fig. 3. C). Las especies con mayor número de individuos atropellados en lluvias fueron *Ctenosaura similis* (38 individuos), *Boa imperator* (34 individuos), *Mastigodryas melanolomus* (22 individuos), *Crotalus tzabcan* (21 individuos), *Rhinella horribilis* (20 individuos) y *Micrurus apiatus* (16 individuos). En la temporada seca las especies más impactadas fueron *Ctenosaura similis* (26 individuos), *Boa imperator* (16 individuos) (ver Anexo *Biología e importancia de las especies*).

Escala paisaje (Ctra SP-ChPto). Respecto al porcentaje de especies atropelladas en la Ctra-SP-ChPto, este varió 10%, ya que en lluvias el porcentaje fue de 54.92% (39 especies) y en secas de 45.07% (32 especies) (Fig. 3. B). El número de individuos atropellados en la temporada de lluvias (junio-noviembre) fue de 138 individuos (66.66%), mientras que en secas (diciembre-mayo) fue de 69 individuos (33.33%), con un total de $N=207$ atropellamientos (Fig. 3. B, D). El año que presentó mayor número de registros fue el 2017 (76 individuos), seguido del 2016 (66 individuos) (Fig. 3. D). En todos los años el número de individuos fue mayor en temporada de lluvias (Fig. 3. D).

Las especies con mayor incidencia de individuos atropellados en lluvias fueron *C. similis* (33 individuos), *M. melanolomus* (11 individuos) y *R. horribilis* (11 individuos). En secas la especie más impactada fue *C. similis* (22 individuos) (ver Anexo *Biología e importancia de las especies*).

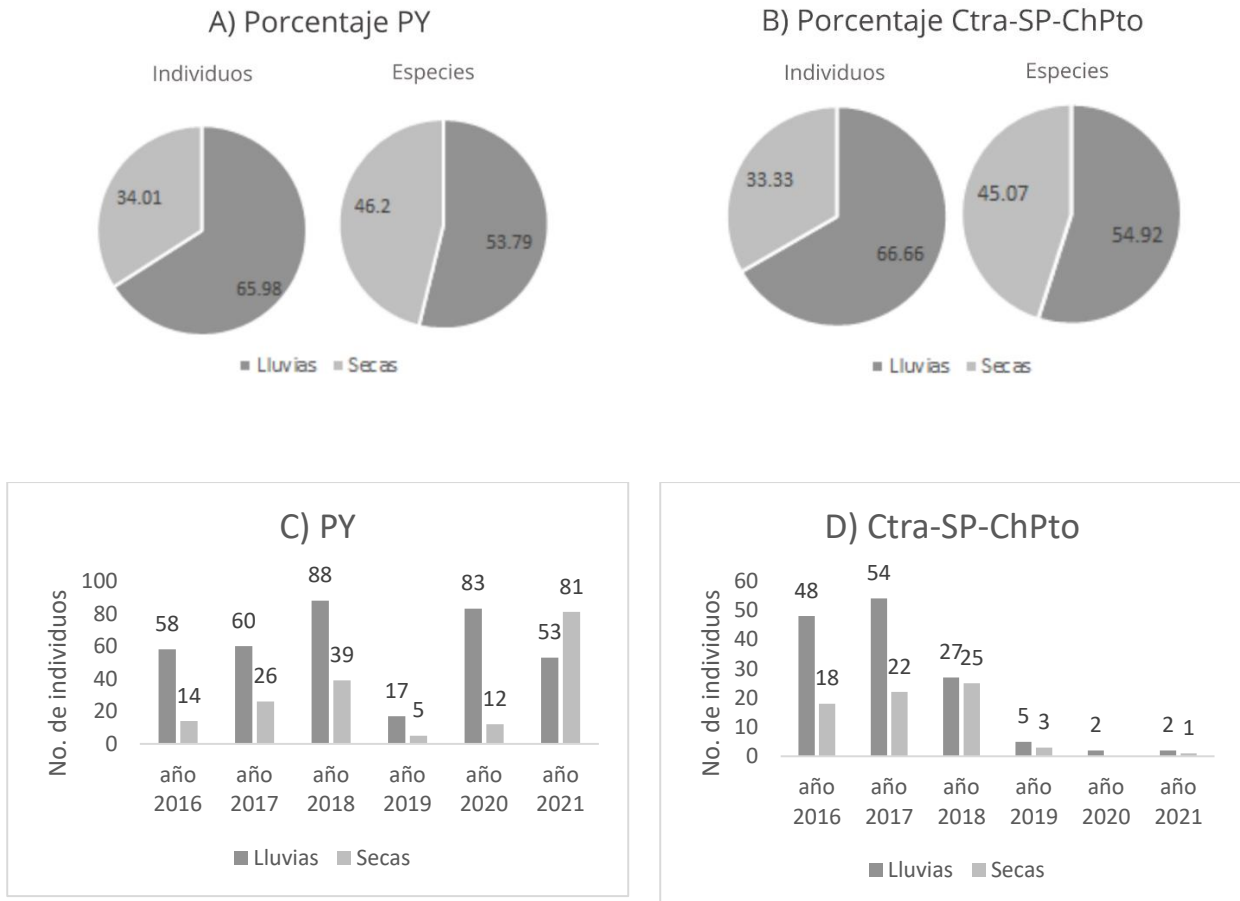


Figura 3. Variación en la temporalidad y año de los atropellamientos en la península de Yucatán (PY) y en la carretera Sierra Papacal-Chuburná puerto (Ctra-SP-ChPto). Frecuencia absoluta del número de individuos por año en lluvias y secas (paneles A y B). Porcentaje total de individuos y especies en lluvias y secas (paneles C y D).

Variación por año, temporada y grupo taxonómico.

Escala regional (PY). En la temporada de lluvias los reptiles fueron el grupo más afectado independientemente del año (Fig. 4. A). No obstante, en la temporada de secas la cantidad

de individuos atropellados fue similar entre reptiles y mamíferos (5 individuos); estando las aves levemente por debajo (4 individuos) (Fig. 4. B).

Escala paisaje (Ctra SP-ChPto). A esta escala, en temporada de lluvias los reptiles fueron el grupo más impactado en todos los años, a excepción del 2019, año en el que los mamíferos fueron los que tuvieron la mayor cantidad de individuos atropellados (Fig. 4. C). En temporada de secas, el grupo más impactado durante los años 2017, 2018 y 2021, fueron los reptiles (Fig. 4. D).

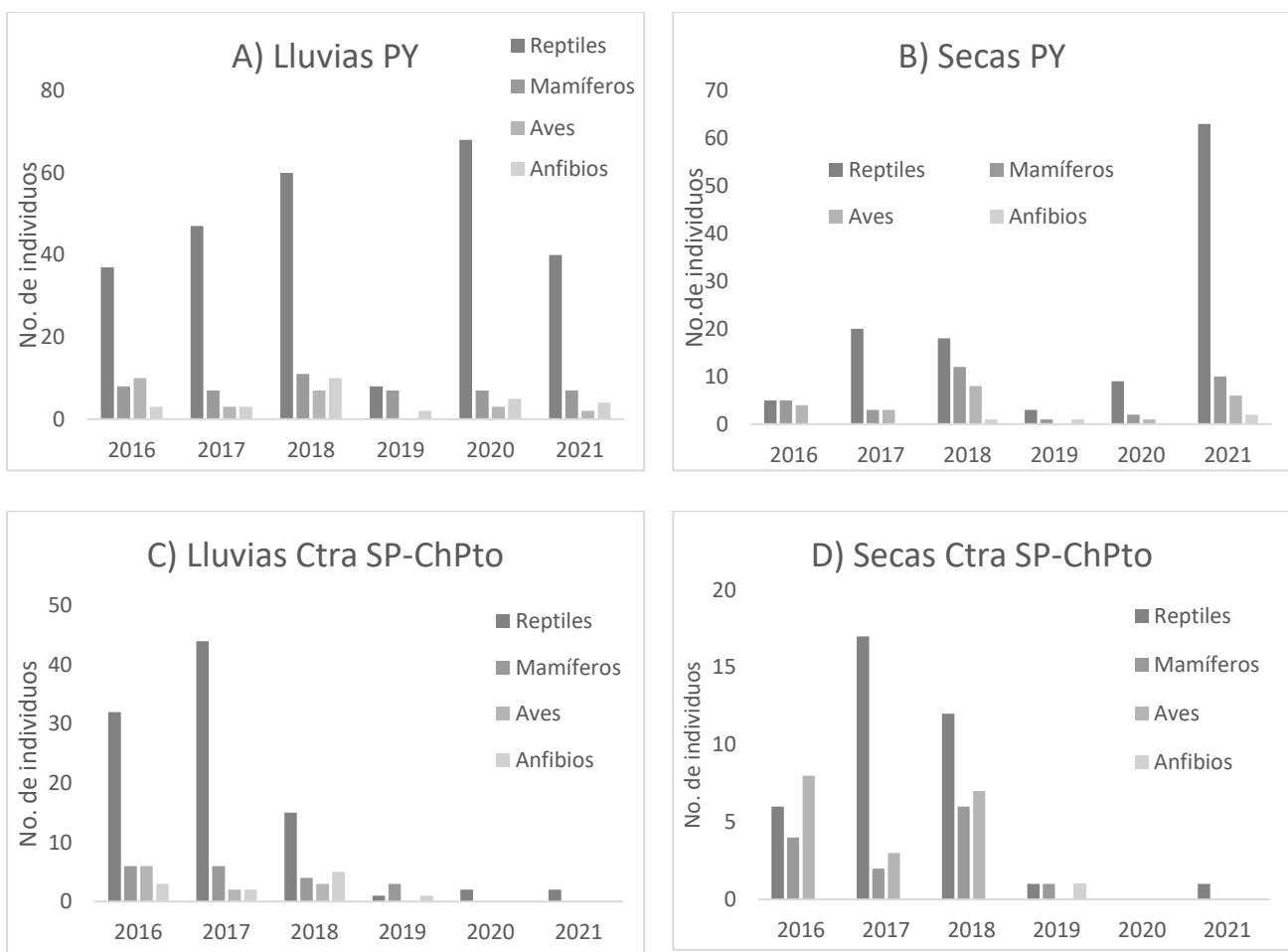


Figura. 4. Frecuencia absoluta de atropellamientos por temporada y por grupo taxonómico en la península de Yucatán (PY) de 2016 a 2021 (paneles A y B). Frecuencia absoluta de atropellamientos por temporada y por grupo taxonómico en la carretera Sierra Papacal-Chuburná Puerto (Ctra-SP-ChPto) de 2016 a 2021 (paneles C y D).

Discusión

Nuestros resultados respaldan algunas investigaciones previas que han destacado el efecto negativo de las carreteras en la biodiversidad y los esfuerzos de conservación (Hartmann *et al.*, 2011; González-Gallina y Benítez-Badillo, 2013). Asimismo, coinciden con estudios realizados en otras regiones tropicales (Arroyave *et al.*, 2006), como en el istmo de Tehuantepec (México), donde los reptiles también fue el grupo más afectado por atropellos (Grosselet *et al.*, 2009) y con un estudio en la reserva de la biósfera de Celestún, vía Kinchil-Celestún (Nahuat-Cervera *et al.*, 2021), pero en este último, a diferencia de nuestro estudio, el segundo grupo más impactado fue el de los anfibios. Nuestra explicación es que posiblemente encontraron más anfibios debido a que realizaron muestreos intensivos (diurnos y nocturnos) sobre el tramo de carretera durante un año, lo que les permitió ver a este tipo de animales antes de descomponerse o ser depredados por carroñeros, la segunda razón es que este estudio se realizó cerca de cuerpos de agua en donde los animales que dependen completamente de ella son propensos a cruzar las carreteras aledañas.

Por el contrario, nuestros datos difieren con lo encontrado por (1) Sánchez-Acuña y Benítez (2021) en un tramo de carretera de Calakmul y en Balam-kú, Campeche; en donde se observó que el mayor porcentaje de animales atropellados fueron los mamíferos con la mitad del total, seguido de las aves, anfibios y finalmente los reptiles. Estas diferencias pueden deberse a la afluencia vehicular, aunado a que la herpetofauna (como culebras o anfibios) es propensa a degradarse con mayor rapidez (sumado a las altas temperaturas de la PY). Otros estudios como el de Brichieri-Colombi y Alexander (2021), hacen un conteo exclusivamente de mamíferos expuestos a atropellamiento con un método de muestreo distinto utilizando cámaras trampa y huellas, los datos sobre el total

de especies de mamíferos encontrados es similar al nuestro, pero la riqueza taxonómica es diferente, compartiendo once especies.

Es importante considerar que los reptiles enfrentan una situación particular debido a la estigmatización y mitos que rodean a este grupo de vertebrados (Casas, 2000). Su “toxicidad” percibida y apariencia poco convencional han llevado a un prejuicio generalizado (Hartmann *et al.*, 2011), lo que podría explicar el elevado número de reptiles atropellados en nuestro estudio. Esta situación es preocupante en términos de conservación de la biodiversidad (Casas, 2000) en un país con alta diversidad de herpetofauna como México (Ochoa-Ochoa y Flores-Villela, 2006), inclusive el atropellamiento intencional que sugerimos como respuesta al número de serpientes encontradas coincide con otros estudios en donde prueban con experimentos en campo en los que colocan modelos (cadáveres y modelos de goma simulando diferentes organismos) versus botes de plástico a un lado de la carretera, que los conductores se desvían ante ciertos modelos y otros no (atropellando modelos de serpientes y anfibios intencionalmente), sobre todo en carreteras de subida y por parte de conductores de tráiler (de Resende Assis *et al.*, 2020). Aunado a esto, para probar la hipótesis de atropello intencional por estigmatización, se requieren también análisis sociales sobre el conocimiento y apreciación de la herpetofauna en las comunidades cercanas a la carretera 'Ctra SP-ChPto' y en la Península de Yucatán (Tanner y Perry, 2007).

A pesar de esto también hay estudios como el de (1) Sánchez-Acuña y Benítez (2021), que encontraron como grupo menos impactado a los reptiles (dividiéndolos entre Squamata, Crocodylia y Testudines) y dentro de este grupo los Squamata (serpientes y lacertilios) son los que presentaron mayor índice de atropellamiento, esto último sí coincide con nuestros resultados, debido a, como ya se mencionó, aspectos de

estigmatización social, termorregulación, pero sobre todo como lo mencionan los autores, relacionado con sus hábitos terrestres que influyen en ser atropellados al cruzar, a diferencia de las tortugas y los cocodrilos que son dependientes de cuerpos acuíferos (Hartmann *et al.*, 2011).

Respecto a los estudios en la PY, encontramos el de Cedeño-Vázquez y colaboradores (2021) en la reserva estatal Santuario del manatí, Quintana Roo, en donde observaron seis especies de importancia que representaban más de la mitad de sus registros totales, estas especies también fueron reportadas en nuestro estudio: *Dipsas brevifacies*, *Sibon sanniolus*, *Boa imperator*, *Bothrops asper*, *Ninia sebae* y *Leptodeira frenata*. Los autores hicieron un muestreo no intensivo (fines de semana), aunque si prolongado (9 años), en el que encontraron un considerable número de serpientes atropelladas, sugiriendo al igual que nosotros que se realicen más estudios enfocados en muerte por colisión de serpientes (Hartmann *et al.*, 2011).

Existen ventajas al trabajar en diferentes escalas, a escala de paisaje (como es el caso de la *Ctra SP-ChPto*) obtenemos datos de las carreteras más transitadas y a partir de esto se pueden desarrollar estrategias específicas en puntos de mayor atropellamiento. Por otro lado, entre las ventajas de trabajar a escala regional (PY) es que se puede conocer de manera general una parte importante del impacto sobre los vertebrados que nos ayudaría a implementar la construcción de carreteras enfocadas en producir el menor impacto posible sobre la biodiversidad (durante la construcción de la carretera, pero sobre todo después de ella) con pasos de fauna y letreros de velocidad.

Los datos obtenidos en este estudio no muestran una tendencia clara sobre si hay diferencias en el número de atropellamientos por año, debido a que este estudio fue realizado con un muestreo no aleatorio más bien circunstancial. Por lo tanto, la razón por

la que los años 2019 y 2022 tuvieron pocos registros (año 2020-2022 pandemia por COVID-19), no nos habla de que en estos años haya disminuido el número de atropellamientos, simplemente no se registraron esos datos. Otras posibilidades son que hay años más secos que otros debido a sucesos climáticos como el fenómeno del Niño y la Niña. Años como 2021 o 2018, nos dan evidencia de que el número de atropellamientos por año es elevado aun con un muestreo no intensivo y sistematizado, dejando claro que un muestreo de este tipo podría arrojar cifras de mortandad por colisión muchos más elevadas. Respecto a las temporalidades, no se encontró diferencias entre secas y lluvias respecto al número de especies, pero sí en cuanto al número de individuos (encontrando más atropellamiento en lluvias), esto difiere con lo encontrado por Brichieri-Colombi y Alexander (2021), quienes para el caso de los mamíferos no encontraron diferencias significativas en la estacionalidad. Pero estudios como el de (1) Sánchez-Acuña y Benítez (2021), sí encontraron diferencias entre temporalidad, en donde registraron mayor número de decesos de mamíferos en época de invierno (temporada seca en nuestro estudio). Los autores no explican el motivo de sus resultados, pero mencionan que, en otros estudios consultados, los mamíferos resultan ser más atropellados en meses de primavera (abril-junio), esto nos hace pensar que el número de individuos respecto a la temporalidad depende de diferentes variables como la zona (hasta entre carretera y carretera), métodos de muestreo, grupo taxonómico analizado (Hartmann *et al.*, 2011), etcétera.

Un gran número de especies encontradas están en alguna categoría de riesgo y son endémicas de la PY como lo son la iguana rayada (*Ctenosaura similis*), la boa imperial y la culebra ratonera yucateca. Claramente esto hace que el problema de atropellamiento de fauna silvestre cobre una mayor relevancia.

Conclusiones y recomendaciones

Para abordar los desafíos que plantean las carreteras para la fauna silvestre, es fundamental considerar medidas de mitigación adecuadas y específicas para cada grupo de animales afectados, incluyendo los reptiles y en especial a las serpientes que son susceptibles a ser atropelladas. Por tanto, se recomienda a las autoridades; 1) exigir a las empresas constructoras la identificación y evaluación de los efectos negativos que producen los proyectos viales en la fauna por atropellamiento en la PY, 2) estudiar el efecto de las carreteras en los ecosistemas circundantes sobre todo en zonas de importancia (de alta biodiversidad); 3) implementación de señalamientos sobre la fauna y disminución de velocidad que también ayudara a evitar accidentes de humanos, y se requieren 4) muestreos sistematizados para comparar zonas que podrían permitir construir pasos de fauna u otras estrategias para el beneficio de vertebrados terrestres; 5) se deben considerar estrategias de prevención y mitigación de impacto especialmente a grupos vulnerables como los son los reptiles; y relacionado con esto 6) estudios de percepción social (estudios etnozoológicos), que incluyan encuestas diseñadas específicamente a personas que utilicen las carreteras con frecuencia como trailers, autobuses turísticos, ganaderos, entre otros, para también poderlos abordar con proyectos de educación ambiental acerca animales “no carismáticos” como las serpientes.

Agradecimientos

Este artículo forma parte de los requisitos necesarios para la obtención de grado de Maestra en Ciencias en el Posgrado en Ciencias Biológicas de la UNAM, quien además contó con una beca otorgada por el Consejo Nacional de Humanidades, Ciencia y Tecnología (CONAHCYT) (Núm. 590792). De igual manera, a su proyecto “Ciencia de Frontera 2023” con clave de solicitud CF-2023-I-2589 cuya investigación permite la

continuidad de este proyecto. Finalmente, queremos agradecer a alumnos y profesores del Laboratorio de Ecología Geográfica (EcolGeo, <https://www.ecolgeo.com/>) responsables de la toma de datos de atropellamiento y la creación de la base en *Naturalista* DOR.

Literatura citada

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. *Revista Eia*, 5: 45-57.

Benítez, J., Alexander, S., Pozo-Montuy, G. y Sánchez-Acuña M. (2021). Cap. I. 1 Vías de comunicación terrestre vs. fauna: la experiencia global. En Benítez, J., y Escalona, G. *Impacto de las vías de comunicación sobre la fauna silvestre en áreas protegidas: Estudios de caso para el sureste de México* (pp. 732 pp.). Campeche, México: El Colegio de la Frontera Sur.

Benítez, J., Pozo-Montuy, G., Alexander, S., Vargas-Contreras, J., Escalona-Segura, G., Sánchez-Acuña, M., González-Gallina, A. y Prieto, S. (2021). Cap. III. 6 Impacto de la vía férrea y del crecimiento turístico asociado al Tren Maya: medidas de mitigación y cambios al diseño para las reservas de Calakmul y Balam-Kú. En Benítez, J., y Escalona, G. *Impacto de las vías de comunicación sobre la fauna silvestre en áreas protegidas: Estudios de caso para el sureste de México* (pp. 732 pp.). Campeche, México: El Colegio de la Frontera Sur.

Benítez, J., y Escalona-Segura, G. (2021) *Impacto de las vías de comunicación sobre la fauna silvestre en áreas protegidas: Estudios de caso para el sureste de México* (pp. 732 pp.). Campeche, México: El Colegio de la Frontera Sur.

- Brichieri-Colombi, T. y Alexander, S. (2021). Cap. II. 4 distribución de especies en la zona de efecto de la carretera 186, en la región de Calakmul. En Benítez, J., y Escalona, G. *Impacto de las vías de comunicación sobre la fauna silvestre en áreas protegidas: Estudios de caso para el sureste de México* (pp. 732 pp.). Campeche, México: El Colegio de la Frontera Sur.
- Calderón-Mandujano, R. R., Galindo-Leal, C., y Cedeño-Vázquez, J. R. (2008). Utilización de hábitat por reptiles en estados sucesionales de selvas tropicales de Campeche, México. *Acta zoológica mexicana*, 24(1): 95-114.
- Casas, A. G. (2000). Mitos, leyendas y realidades de los reptiles en México. *CIENCIA ergo-sum. Revista Científica Multidisciplinaria de Prospectiva*, vol. 7(3).
- Ceballos, G., C. Chávez, H. Zarza, y C. Manterola. (2005). Ecología y conservación del jaguar en la región de Calakmul. CONABIO. *Biodiversitas*, 62: 1-7.
- Cedeño-Vázquez, R., Köhler, G. y Beutelspacher-García, P. (2021). Cap. II. 9 Mortalidad de serpientes por atropellamiento en un área aledaña a la reserva estatal de Santuario del manatí, Quintana Roo, México. En Benítez, J., y Escalona, G. *Impacto de las vías de comunicación sobre la fauna silvestre en áreas protegidas: Estudios de caso para el sureste de México* (pp. 732 pp.). Campeche, México: El Colegio de la Frontera Sur.
- Ceia-Hasse, A., Navarro, L. M., Borda-de-Água, L., y Pereira, H. M. (2018). Population persistence in landscapes fragmented by roads: Disentangling isolation, mortality, and the effect of dispersal. *Ecological modelling*, 375: 45-53.
- Contreras-Moreno, F. M., Hidalgo-Mihart, M. G., Pérez-Solano, L. A., y Vázquez-Maldonado, Y. A. (2013). Nuevo registro de Tapir centroamericano (*Tapirus*

- bairdii*) atropellado en el Noroeste del estado de Campeche, México. *Tapir Conservation*, 22(30): 22-25.
- de Resende Assis, J., Carvalho-Roel, C. F., Iannini-Custódio, A. E., Pereira, W. G., y Veloso, A. C. (2022). Snakes roadkill on highways in the Cerrado biome: an intentional conduct?. *Studies on Neotropical Fauna and Environment*, 57(3): 198-205.
- Delgado, J. D., Arévalo, J. R., y Fernández-Palacios, J. M. (2004). Consecuencias de la fragmentación viaria: efectos de borde de las carreteras en la laurisilva y el pinar de Tenerife. *Ecología Insular/Island Ecology. Asociación Española de Ecología Terrestre (AEET)-Cabildo Insular de la Palma*, 181-225.
- Delgado-Vélez, C. A. (2014). Adiciones al atropellamiento vehicular de mamíferos en la vía de El Escobero, Envigado (Antioquia), Colombia. *Revista EIA*, 11(22): 147-153.
- Díaz, L., May, D., Gallardo, A., y Cedeño, R. (2020). *Catálogo de reptiles de la Península de Yucatán*. Universidad Nacional Autónoma de México. Ediciones LUR, Cartago. 315p.
- Escobar, A. (1998). *Biodiversidad, naturaleza y cultura: localidad y globalidad en las estrategias de conservación*. Universidad Nacional Autónoma de México, Centro de Investigaciones Interdisciplinarias en Ciencias y Humanidades, UNAM. México. 69 p
- Espinoza, M. (2015). *Persistencia de cadáveres de aves y murciélagos situados en pastizales y bosques del campus Zamorano, Honduras*. Tesis Doctoral, Escuela Agrícola Panamericana, Zamorano, Honduras. 26 p.
- Fernández-Badillo, L., Zuria, I., Sigala-Rodríguez, J., Sánchez-Rojas, G., y Castañeda-Gaytán, G. (2021). Revisión del conflicto entre los seres humanos y las serpientes

- en México: origen, mitigación y perspectivas. *Biodiversity and Conservation*, 44 (2): 153-174.
- Flores, A., Deniau, Y., y Prieto, S. (2019). El Tren Maya. Un nuevo proyecto de articulación territorial en la Península de Yucatán. *México: GeoComunes/Consejo Civil Mexicano para la Silvicultura Sostenible*. pp. 19.
- Forman, R. T. T. y Alexander, L. E. (1998). Roads and their major ecological effects. *Annual Review of Ecology and Systematics*, 29, pp. 207-231.
- García, D., y Contreras, G. (2011). Distribución espacial de la vegetación. *Biodiversidad y desarrollo humano en Yucatán*. Pp. 131-135.
- García-Rosales, A., Arriaga-Noguez, A., y Ramírez-Bautista, A. (2020). Natural history of the black iguana *Ctenosaura similis* (Squamata: Iguanidae) in isla Contoy, Quintana Roo, México. *Acta Biológica Colombiana*, 25(3), 394-402.
- González-Gallina, A., y Benítez-Badillo, G. B. (2013). Road ecology studies for Mexico: A review. *Oecologia Australis*, 17(1): 175-190.
- Gottdenker, N., Wallace, R. B., y Gómez, H. (2001). La importancia de los atropellos para la ecología y conservación: *Dinomys branickii* un ejemplo de Bolivia. *Ecología en Bolivia*, 35: 61-67.
- Grosselet, M., Villa-Bonilla, B., y Ruiz-Michael, G. (2009). Afectaciones a vertebrados por vehículos automotores en 1.2 km de carretera en el istmo de Tehuantepec. In *Proceedings of the Fourth International Partners in Flight Conference: Tundra to Tropic*, 1-5pp.
- Guzmán-García, J. P. (2020). Correlación entre variables físicas de la carretera y los atropellos de vertebrados silvestres en la Carretera Interamericana Norte, Costa Rica. *Ecología y Desarrollo Sostenible*, 1(1): 13.

- Hartmann, P. A., Hartmann, M. T., y Martins, M. (2011). Snake road mortality in a protected area in the Atlantic Forest of southeastern Brazil. *South American Journal of Herpetology*, 6(1): 35-42.
- Herrera-Flores, J. A., y Rojas-Cortes, M. F. (2022). Notas sobre un sapo momificado y el impacto de la urbanización en una población de sapos de caña (*Rhinella horribilis*). En Ignacio Romero Vargas, municipio de Puebla, México. *Revista Latinoamericana De Herpetología*, 5(1): 197–201. <https://doi.org/10.22201/fc.25942158e.2022.1.416>
- Márdero, S., Nickl, E., Schmook, B., Schneider, L., Rogan, J., Christman, Z., y Lawrence, D. (2012). Sequías en el sur de la península de Yucatán: análisis de la variabilidad anual y estacional de la precipitación. *Investigaciones geográficas*, 78: 19-33.
- Molina-García, Á. A., Maldonado Hernández, C. R., Oliveras de Ita, A., y Rojas-Soto, O. R. (2008). Primer reporte de nidos depredados por la chachalaca vetula (*Ortalis vetula*). *Huitzil*, 9(2): 32-34.
- Monge-Nájera, J. (2018). Mortalidad en carreteras de ecosistemas tropicales: revisión con recomendaciones para su mitigación e investigación futura. *Revista de Biología Tropical*, 66(2): 722-739.
- Monge-Velázquez, M. (2018). *Herpetofauna atropellada en la Carretera Interamericana Norte, Guanacaste, Costa Rica.: influencia de los atributos del paisaje en las muertes y medidas para su mitigación*. Tesis para obtener el título de Magister Scientiae, Universidad Nacional, Instituto Internacional en Conservación y Manejo de Vida Silvestre, Costa Rica. 100 p.

- Morlans, M. C. (2005). *Introducción a la Ecología del Paisaje*. Área ecológica. Catamarca: Editorial Científica Universitaria, Universidad Nacional de Catamarca. 33 p.
- Nahuat-Cervera, P., González-Gallina, A., Avilés-Novelo, J. y Cedeño-Vázquez, J. (2021). Cap. II. 10 Atropellamiento de vertebrados en la carretera Kinchil-Celestún, Yucatán. En Benítez, J., y Escalona, G. *Impacto de las vías de comunicación sobre la fauna silvestre en áreas protegidas: Estudios de caso para el sureste de México* (pp. 732 pp.). Campeche, México: El Colegio de la Frontera Sur.
- Naturalista (2021). Ocelote *Leopardus pardalis* Consultado el 26 de noviembre de 2021. Comisión Nacional para el Conocimiento y uso de la Biodiversidad. <https://www.naturalista.mx/observations/52490924>
- Ochoa-Ochoa, L. M. y O. Flores-Villela (2006). *Áreas de diversidad y endemismo de la herpetofauna mexicana*. UNAM-CONABIO, México, D.F.: 211 pp.
- Orellana-Lanza, R., Espadas, C., Conde, C. y Gay, C. (2009). *Atlas. Escenarios de cambio climático en la Península de Yucatán*. Centro de Investigaciones Científicas de Yucatán, AC, Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología, Centro de Ciencias de la Atmósfera (UNAM), FOMIX Yucatán, SEDUMA Yucatán, Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo, 111 p.
- Pozo-Montuy, G., Téllez, G., Guzmán, C. y Gómez, M. (2021). Cap. III. 3 Monitoreo preobra como información base para la mitigación de los impactos ambientales sobre la fauna silvestre en áreas naturales protegidas: el caso del libramiento Atasta, en Campeche, México. En Benítez, J., y Escalona, G. *Impacto de las vías de comunicación sobre la fauna silvestre en áreas protegidas: Estudios de caso*

para el sureste de México (pp. 732 pp.). Campeche, México: El Colegio de la Frontera Sur.

Puc-Sánchez, J. I., C. Delgado-Trejo, E. Mendoza-Ramírez y I. Sauzo-Ortuño. (2013). Las carreteras como una fuente de mortalidad de fauna silvestre de México. CONABIO. *Biodiversitas*, 111:12-16

Resumen Ejecutivo de impacto ambiental (De Particular Consultores en Ecosistemas S.C.). (2011). SEMARNAT.gob. Recuperado 25 de octubre de 2023, de:<http://sinat.semarnat.gob.mx/dgiraDocs/documentos/yuc/estudios/2011/31YU2011VD111.pdf>

Rojas-Chacón, E. (2011). Atropello de vertebrados en una carretera secundaria en Costa Rica. *UNED Research Journal*, 3(1): 81-84.

Rojas-Sánchez, J. V., Sánchez-Cordero, V., y Flores-Martínez, J. J. (2022). El brazo fuerte, *Tamandua mexicana*. *Therya ixmana*, 1(3): 105-106.

Rural, D. (2014). *Distribución y abundancia de crácidos en paisajes de la Reserva de la Biósfera Calakmul, Campeche*. Tesis Doctoral, El Colegio de la Frontera Sur, México. 63 p.

(1) Sánchez-Acuña, M. y Benítez, J. (2021). Cap. II. 5 Mortalidad de fauna por atropellamiento sobre la carretera 186, en las reservas de Calakmul y Balam-kú, Campeche, México. En Benítez, J., y Escalona, G. *Impacto de las vías de comunicación sobre la fauna silvestre en áreas protegidas: Estudios de caso para el sureste de México* (pp. 732 pp.). Campeche, México: El Colegio de la Frontera Sur.

(2) Sánchez-Acuña, M. y Benítez, J. (2021). Cap. III. 2 Actividad relativa de mamíferos silvestres en pasos no específicos de fauna de la carretera 186, en la reserva de la

biosfera de Calakmul y la zona sujeta a conservación Balam-kú, Campeche, México. En Benítez, J., y Escalona, G. *Impacto de las vías de comunicación sobre la fauna silvestre en áreas protegidas: Estudios de caso para el sureste de México* (pp. 732 pp.). Campeche, México: El Colegio de la Frontera Sur.

SEMARNAT, Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. (2010). Norma Oficial Mexicana NOM-059-ECOL-SEMARNAT-2010 Protección ambiental-Especies nativas de México de flora y fauna silvestres-Categorías de riesgo y especificaciones para su inclusión, exclusión o cambio-Lista de especies en riesgo. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. Diario Oficial de la Federación, (30-dic-2010): 1-75.
[http://dof.gob.mx/nota_detalle_popup.php?codigo=5173091]

Tanner, D., Lehman, C., y Perry, J. (2007). On the Road to Nowhere: Galápagos Lava Lizard Populations. *Chicago Herpetological Society*, 42(8): 125-132.

Vargas-Contreras, J., Cú-Vizcarra, J., Escalona-Segura, G., López-Damián, J., Arroyo-Cabrales, J. y Medellín, R. (2021). Cap. II. 7 Impacto por atropellamiento cerca de la cueva el Volcán de los murciélagos, en Calakmul, Campeche, México. En Benítez, J., y Escalona, G. *Impacto de las vías de comunicación sobre la fauna silvestre en áreas protegidas: Estudios de caso para el sureste de México* (pp. 732 pp.). Campeche, México: El Colegio de la Frontera Sur. Vargas-Salinas, F., y López-Aranda, F. (2012). ¿Las carreteras pueden restringir el movimiento de pequeños mamíferos en bosques andinos de Colombia? Estudio de caso en el bosque de Yotoco, Valle del Cauca. *Caldasia*, 34(2): 409-420.

Villanueva, H. Z., Flores, R. Á., y Reyes, J. O. (2006). Bibliografía reciente comentada sobre Mamíferos. *Revista Mexicana de Mastozoología (Nueva Época)*, 10(1): 100-107.

Anexo

Cuadro 1. Lista completa de especies impactadas en la PY ($N= 572$ individuos, repartidas en 100 especies) registradas en seis años (2016-2021) ordenados de mayor a menor número de atropellos. La lista muestra el número de individuos por especie y la categoría en la que se encuentra en la Norma Oficial Mexicana (NOM-059-SEMARNAT-2010), en el acuerdo internacional de Convención sobre el Comercio Internacional de Especies Amenazadas de Fauna y Flora Silvestres (CITES) y en la *International Union for Conservation of Nature* (UICN). Se consultaron las bases: reptiles (The reptile database, www.reptile-database.org); mamíferos (ASM Mammal Diversity Database; mammaldiversity.org); aves (American Ornithological Society; americanornithology.org) y anfibios (Amphibia Web; amphibiaweb.or).

| Grupo taxonómico | Especie | NOM-059-SEMARNAT-2010 | CITES | UICN | Endemismo | No. de ind. |
|------------------|---------------------------------|-----------------------|---------------|-------------|-----------------------------|-------------|
| Reptilia | <i>Ctenosaura similis</i> | A | App. II | LC | Endémica de América central | 64 |
| Reptilia | <i>Boa imperator</i> | A | App. II | LC | Sin información | 59 |
| Reptilia | <i>Crotalus tzabcan</i> | Sin estatus | Sin categoría | LC | Endémica de la PY | 28 |
| Reptilia | <i>Mastigodryas melanolomus</i> | Sin estatus | Sin categoría | LC | Sin información | 24 |
| Reptilia | <i>Micrurus apiatus</i> | Pr | Sin categoría | LC | Centroamérica | 20 |
| Reptilia | <i>Stenorrhina freminvillei</i> | Sin estatus | Sin categoría | LC | Sin información | 20 |
| Reptilia | <i>Drymarchon melanurus</i> | Sin estatus | Sin categoría | LC | Sin información | 17 |
| Reptilia | <i>Coniophanes imperialis</i> | Sin estatus | Sin categoría | LC | América | 16 |
| Reptilia | <i>Leptophis mexicanus</i> | A | Sin categoría | LC | Centroamérica | 16 |
| Reptilia | <i>Oxybelis fulgidus</i> | Sin estatus | Sin categoría | No evaluada | Centroamérica | 14 |
| Reptilia | <i>Tropidodipsas sartorii</i> | Pr | Sin categoría | LC | Centroamérica | 13 |
| Reptilia | <i>Spilotes pullatus</i> | Sin estatus | Sin categoría | No evaluada | Centroamérica | 10 |
| Reptilia | <i>Lampropeltis abnorma</i> | A | Sin categoría | LC | Centroamérica | 9 |
| Reptilia | <i>Pseudelaphe phaescens</i> | Pr | Sin categoría | No evaluada | Endémica de la PY | 9 |

| | | | | | | |
|-----------------|-----------------------------------|-------------|------------------|-------------|---------------------|----|
| Reptilia | <i>Masticophis mentovarius</i> | Sin estatus | Sin categoría | LC | Centroamérica | 8 |
| Reptilia | <i>Conophis lineatus</i> | Sin estatus | Sin categoría | LC | Endémica de la PY | 7 |
| Reptilia | <i>Imantodes tenuissimus</i> | Pr | Sin categoría | LC | Endémica de Yucatán | 7 |
| Reptilia | <i>Laemactus serratus</i> | Pr | Sin categoría | LC | México | 7 |
| Reptilia | <i>Senticolis triaspis</i> | Sin estatus | Sin categoría | LC | América | 7 |
| Reptilia | <i>Coniophanes schmidti</i> | Sin estatus | Sin categoría | LC | Endémica de la PY | 6 |
| Reptilia | <i>Bothrops asper</i> | Sin estatus | Sin categoría | No evaluada | Centroamérica | 6 |
| Reptilia | <i>Ninia sebae</i> | Sin estatus | Sin categoría | LC | Centroamérica | 5 |
| Reptilia | <i>Leptodeira frenata</i> | Sin estatus | Sin categoría | LC | No endémica | 4 |
| Reptilia | <i>Porthidium yucatanicum</i> | Pr | Sin categoría | LC | Endémica de la PY | 4 |
| Reptilia | <i>Sibon sanniolus</i> | Sin estatus | Sin categoría | LC | Endémica de la PY | 4 |
| Reptilia | <i>Agkistrodon russeolus</i> | Sin estatus | Sin categoría | No evaluada | Endémica de la PY | 3 |
| Reptilia | <i>Drymobius margaritiferus</i> | Sin estatus | Sin categoría | LC | No endémica | 3 |
| Reptilia | <i>Holcosus undulatus</i> | Sin estatus | Sin categoría | LC | No endémica | 3 |
| Reptilia | <i>Dipsas brevifacies</i> | Pr | Sin categoría | LC | Endémica de la PY | 2 |
| Reptilia | <i>Ficimia publia</i> | Sin estatus | Sin categoría | LC | No endémica | 2 |
| Reptilia | <i>Symphimus mayae</i> | Pr | Sin categoría | LC | Endémica de la PY | 2 |
| Reptilia | <i>Thamnophis proximus</i> | A | Sin categoría | LC | No endémica | 2 |
| Reptilia | <i>Aspidoscelis angusticeps</i> | Sin estatus | Sin categoría | LC | Endémica de la PY | 1 |
| Reptilia | <i>Coniophanes bipunctatus</i> | Sin estatus | Sin categoría | LC | No endémica | 1 |
| Reptilia | <i>Crocodylus moreletii</i> | Pr | App. I y App. II | LC | No endémica | 1 |
| Reptilia | <i>Iguana iguana</i> | Pr | App. II | LC | No endémica | 1 |
| Reptilia | <i>Leptophis ahaetulla</i> | A | Sin categoría | No evaluada | No endémica | 1 |
| Reptilia | <i>Oxybelis aeneus</i> | Sin estatus | Sin categoría | No evaluada | No endémica | 1 |
| Reptilia | <i>Rhinoclemmys areolata</i> | A | Sin categoría | NT | No endémica | 1 |
| Reptilia | <i>Scaphiodontophis annulatus</i> | Sin estatus | Sin categoría | LC | No endémica | 1 |
| Reptilia | <i>Tantilla cuniculator</i> | Pr | Sin categoría | LC | Endémica de la PY | 1 |
| Reptilia | <i>Tantilla moesta</i> | Sin estatus | Sin categoría | LC | Endémica de la PY | 1 |
| Reptilia | <i>Masticophis mentovarius</i> | Sin estatus | Sin categoría | LC | No endémica | 1 |
| Mammalia | <i>Didelphis virginiana</i> | Sin estatus | Sin categoría | LC | No endémica | 10 |
| Mammalia | <i>Nasua narica</i> | A | Sin categoría | No evaluada | Endémica | 10 |
| Mammalia | <i>Tamandua mexicana</i> | P | Sin categoría | No evaluada | No endémica | 9 |

| | | | | | | |
|-----------------|---------------------------------|-------------|---------------|-------------|-----------------------------|---|
| Mammalia | <i>Urocyon cinereoargenteus</i> | Sin estatus | Sin categoría | No evaluada | No endémica | 8 |
| Mammalia | <i>Sciurus yucatanensis</i> | Sin estatus | Sin categoría | No evaluada | Endémica de Mesoamérica | 6 |
| Mammalia | <i>Spilogale angustifrons</i> | Sin estatus | Sin categoría | No evaluada | No endémica | 6 |
| Mammalia | <i>Conepatus semistriatus</i> | Sin estatus | Sin categoría | No evaluada | No endémica | 4 |
| Mammalia | <i>Didelphis marsupialis</i> | Sin estatus | Sin categoría | No evaluada | No endémica | 4 |
| Mammalia | <i>Procyon lotor</i> | Sin estatus | Sin categoría | No evaluada | No endémica | 6 |
| Mammalia | <i>Dasypus novemcinctus</i> | Sin estatus | Sin categoría | No evaluada | No endémica | 3 |
| Mammalia | <i>Sylvilagus floridanus</i> | Sin estatus | Sin categoría | No evaluada | No endémica | 3 |
| Mammalia | <i>Sphiggurus mexicanus</i> | Sin estatus | Sin categoría | LC | No endémica | 2 |
| Mammalia | <i>Leopardus wiedii</i> | P | App. I | LC | No endémica | 2 |
| Mammalia | <i>Potos flavus</i> | Pr | Sin categoría | No evaluada | No endémica | 2 |
| Mammalia | <i>Eira barbara</i> | P | Sin categoría | No evaluada | No endémica | 1 |
| Mammalia | <i>Felis silvestris</i> | Sin estatus | Sin categoría | No evaluada | Fauna doméstica | 1 |
| Mammalia | <i>Orthogeomys hispidus</i> | Sin estatus | Sin categoría | No evaluada | Endémica de Mesoamérica | 1 |
| Mammalia | <i>Leopardus pardalis</i> | P | App. I | LC | No endémica | 1 |
| Mammalia | <i>Myomorpha</i> | Sin estatus | Sin categoría | No evaluada | No endémica | 1 |
| Mammalia | <i>Mustela frenata</i> | Sin estatus | Sin categoría | No evaluada | No endémica | 1 |
| Mammalia | <i>Rattus rattus</i> | Sin estatus | Sin categoría | No evaluada | Especie nociva | 1 |
| Mammalia | <i>Spilogale putorius</i> | Sin estatus | Sin categoría | VU | No endémica | 1 |
| Aves | <i>Ortalis vetula</i> | Sin estatus | Sin categoría | LC | No endémica | 7 |
| Aves | <i>Icterus gularis</i> | Sin estatus | Sin categoría | LC | No endémica | 5 |
| Aves | <i>Zenaida asiatica</i> | Sin estatus | Sin categoría | LC | No endémica | 5 |
| Aves | <i>Chordeiles acutipennis</i> | Sin estatus | Sin categoría | LC | No endémica | 4 |
| Aves | <i>Glaucidium brasilianum</i> | Sin estatus | Sin categoría | LC | No endémica | 3 |
| Aves | <i>Quiscalus mexicanus</i> | Sin estatus | Sin categoría | LC | No endémica | 2 |
| Aves | <i>Rupornis magnirostris</i> | Sin estatus | Sin categoría | LC | No endémica | 2 |
| Aves | <i>Aramides albiventris</i> | Sin estatus | Sin categoría | LC | Endémica de América central | 1 |
| Aves | <i>Arremonops rufivirgatus</i> | Sin estatus | Sin categoría | LC | No endémica | 1 |
| Aves | <i>Buteo plagiatus</i> | Sin estatus | Sin categoría | LC | No endémica | 1 |
| Aves | <i>Ciccaba virgata</i> | Sin estatus | Sin categoría | LC | No endémica | 1 |
| Aves | <i>Crotophaga sulcirostris</i> | Sin estatus | Sin categoría | LC | No endémica | 1 |

| | | | | | | |
|-----------------|---------------------------------|-------------|---------------|----|--------------------------------------|----|
| Aves | <i>Cyanocorax yucatanicus</i> | Sin estatus | Sin categoría | LC | Endémica de la PY | 1 |
| Aves | <i>Egretta thula</i> | Sin estatus | Sin categoría | LC | No endémica | 1 |
| Aves | <i>Egretta tricolor</i> | Sin estatus | Sin categoría | LC | No endémica | 1 |
| Aves | <i>Eumomota superciliosa</i> | Sin estatus | Sin categoría | LC | No endémica | 1 |
| Aves | <i>Geococcyx velox</i> | Sin estatus | Sin categoría | LC | No endémica | 1 |
| Aves | <i>Herpetotheres cachinnans</i> | Sin estatus | Sin categoría | LC | No endémica | 1 |
| Aves | <i>Hirundo rustica</i> | Sin estatus | Sin categoría | LC | No endémica | 1 |
| Aves | <i>Melanerpes pygmaeus</i> | Sin estatus | Sin categoría | LC | Endémica de la PY | 1 |
| Aves | <i>Myiarchus</i> | Sin estatus | Sin categoría | LC | No endémica | 1 |
| Aves | <i>Nyctidromus albicollis</i> | Sin estatus | Sin categoría | LC | No endémica | 1 |
| Aves | <i>Pachyramphus aglaiae</i> | Sin estatus | Sin categoría | LC | No endémica | 1 |
| Aves | <i>Parulidae</i> | Sin estatus | Sin categoría | LC | No endémica | 1 |
| Aves | <i>Tachycineta</i> | Sin estatus | Sin categoría | LC | No endémica | 1 |
| Aves | <i>Turdus grayi</i> | Sin estatus | Sin categoría | LC | No endémica | 1 |
| Aves | <i>Vireo pallens</i> | Sin estatus | Sin categoría | LC | Endémico de México y América Central | 1 |
| Amphibia | <i>Rhinella horribilis</i> | Sin estatus | Sin categoría | LC | No endémica | 20 |
| Amphibia | <i>Incilius valliceps</i> | Sin estatus | Sin categoría | LC | No endémica | 4 |
| Amphibia | <i>Lithobates brownorum</i> | Sin estatus | Sin categoría | LC | No endémica | 2 |
| Amphibia | <i>Agalychnis taylori</i> | Sin estatus | Sin categoría | LC | No endémica | 1 |
| Amphibia | <i>Hylidae</i> | Sin estatus | Sin categoría | LC | No endémica | 1 |
| Amphibia | <i>Smilisca baudinii</i> | Sin estatus | Sin categoría | LC | No endémica | 1 |

NOM-059-SEMARNAT-2010 (E: Probablemente extinta en el medio silvestre; P: En peligro de extinción; A: Amenazada; Pr: Sujetas a protección especial).
CITES (Apéndice I: Especie en mayor peligro; Apéndice II: Especie no en peligro, pero podría estarlo; Apéndice III: Especie reglamentada para su comercio).
UICN (E: Extinto; LC: Preocupación menor; Amenazado).

Biología e importancia de las especies

A continuación, se describe la biología de las especies más relevantes en cuanto a número de individuos impactados o categoría en alguna de las listas de conservación consultadas (Norma Oficial Mexicana (NOM-059-SEMARNAT-2010), en el acuerdo internacional de Convención sobre el Comercio Internacional de Especies Amenazadas de Fauna y Flora Silvestres (CITES) y en la *International Union for Conservation of Nature* (UICN)).

Reptiles

Ctenosaura similis (amenazada según la NOM-059-SEMARNAT-2010). Especie cuyas crías nacen en mayo, mes que coincide con el final de la temporada de secas y comienzan las lluvias. Su número de crías es alto (15-80 huevos) y es tanto diurna como nocturna, esta característica la hace una especie susceptible a muerte todo el tiempo debido a que se encuentran en continuo movimiento a diferencia de especies que ocupan parte de su día para dormir u ocultarse (Díaz *et al.*, 2020). Común en ambientes parcialmente impactados, en áreas de vegetación primaria o secundaria característica de los bordes de carreteras y de la periferia de zonas urbanas y rurales (García-Rosales *et al.*, 2020). Entre los factores que afectan sus poblaciones, se encuentran la caza ilegal para utilizar su piel y la captura para la posterior venta como mascota exótica (Díaz *et al.*, 2020), pero en ninguno de los estudios consultados se menciona la muerte por colisiones en carreteras.

Boa imperator (amenazada según la NOM-059-SEMARNAT-2010). Las crías de la boa imperial son numerosas y nacen en época de lluvias (12 a 26) (Díaz *et al.*, 2020), este gran número de individuos podría estar reflejándose en muertes en carreteras (Hartmann *et al.*, 2011; de Resende Assis *et al.*, 2020). Al igual que la iguana rayada, es una especie común en vegetación primaria o secundaria teniendo hábitos diurnos y nocturnos (Díaz *et al.*, 2020)

Pseudelaphe phaescens (endémica de la PY, sujeta a protección especial según la NOM-059-SEMARNAT-2010). La culebra ratonera yucateca es la segunda especie endémica más impactada, los estudios demográficos de esta especie son complejos (Díaz *et al.*, 2020), por lo que no se sabe el estado actual de sus poblaciones, estudios como este nos muestran que la especie además de estar siendo impactada por atropellamiento también podría tener ciertos hábitos que le permiten cruzar más que otras serpientes las carreteras.

Laemanctus serratus (sujeta a protección especial según la NOM-059-SEMARNAT-2010). Especie de lagarto arborícola que acostumbra posarse y esconderse entre árboles, troncos y arbustos para camuflarse (Calderón-Mandujano, *et al.*, 2008) y que por estos hábitos probablemente solo utilice las carreteras para cruzar.

Leptophis mexicanus (amenazada según la NOM-059-SEMARNAT-2010). Se encuentra principalmente en lugares de vegetación densa, acostumbra refugiarse en la base de las hojas de las palmas y con frecuencia en bromelias (Calderón-Mandujano, *et al.*, 2008), esta especie es considerada una especie importante en las cadenas tróficas y diversos estudios comprueban que sus poblaciones han sufrido una reducción por asentamientos humanos y los cambios de uso del suelo (Monge-Velázquez, 2018). El color tan llamativo de esta especie provoca cierto temor o fascinación por lo que en muchas comunidades se les extermina o captura con la finalidad de comerciar con ella, no se conoce a detalle cual es la magnitud de estas actividades (Monge-Velázquez, 2018), pero se estima que sus efectos pueden ser lamentables en caso de no controlarse (Fernández-Badillo *et al.*, 2021), hallarla en este estudio muestra las implicaciones de una carretera sobre una especie de tal importancia y vulnerabilidad.

Crotalus tzabcan (endémica de la PY, sin estatus). Díaz y colaboradores (2020), han descrito a la especie como organismos de hábitos terrestres, crepusculares o nocturnos dependiendo de la estación, su camada es relativamente grande (21 crías) aunado a que sus crías nacen exactamente en el pico de la temporada de lluvias (julio y agosto). Es una especie venenosa, lo que la hace un organismo estigmatizado, de importancia médica y susceptible a ser matada por temor a su mordedura (Díaz *et al.*, 2020).

Conophis lineatus (endémica de la PY, sin estatus). Las poblaciones de la culebra guardacaminos son moderadamente comunes (Hartmann *et al.*, 2011), pero al ser

venenosa la hace un organismo susceptible a estigmatización y además tiene preferencia por sitios abiertos (Díaz *et al.*, 2020).

Imantodes tenuissimus (endémica de Yucatán, sujeta a protección especial según la NOM-059-SEMARNAT-2010). La culebra cordelilla yucateca, cuenta con muy pocos registros para hacer estudios poblacionales, ya que es difícil de encontrar en campo, lo poco que se sabe acerca de su biología es por algunos individuos y no a estudios poblacionales (Calderón-Mandujano, 2002). Al ser una especie escasa que se encuentra en lugares abiertos o entre arbustos pocas veces se encuentra en caminos.

Coniophanes schmidtii (endémica de la PY, sujeta a protección especial según la NOM-059-SEMARNAT-2010). Según lo descrito por Díaz y colaboradores (2020), es de hábitos terrestres, nocturnos y crepusculares. La culebra rayada de Schmidt, podrían estar siendo impactada ya que sus poblaciones son moderadamente comunes (Hartmann *et al.*, 2011; Díaz *et al.*, 2020).

Mastigodryas melanolomus (sujeta a protección especial según la NOM-059-SEMARNAT-2010). Especie que puede reproducirse en cualquier momento del año (Díaz *et al.*, 2020), en este estudio solo se observó en temporada de lluvias el alto número mientras que en temporada de secas solo un individuo, lo que nos puede hablar de que al ser una especie diurna es menos susceptible a morir en cualquier momento del día y año, o que hace falta un mayor tiempo de muestreo.

Micrurus apiatus (endémica de Centroamérica, sujeta a protección especial según la NOM-059-SEMARNAT-2010). Especie que tiene preferencia por selvas lluviosas, zonas perturbadas y es activa en noches lluviosas, se sabe poco acerca de su época de reproducción, pero se estima que es en secas. En este estudio fue encontrada arroyada en

mayor número en temporada de lluvias que en secas, lo cual coincide con sus hábitos y biología (Díaz *et al.*, 2020).

Mamíferos

Didelphis virginiana (sin estatus). Especie de mamífero carroñero y con preferencia a áreas urbanas que facilitan que sea atropellado (Espinoza, 2015). Rojas-Chacón (2011) ya había registrado a un marsupial *Didelphis* sp. al lado de una boa; el estado de descomposición de la boa era diferente al del mamífero, teniendo más tiempo de muerto el primero que el segundo, por lo que se presume que, al estar alimentándose de la boa, *Didelphis* sp. también tuvo el mismo destino.

Nasua narica (amenazada según la NOM-059-SEMARNAT-2010). Es una especie que busca alimento en los árboles y en el suelo (Rojas-Sánchez *et al.*, 2022). Es omnívora y tiene cierta preferencia por pequeños vertebrados, frutos, carroña, insectos y huevos, además se adaptan fácilmente a asentamientos humanos (Rojas-Sánchez *et al.*, 2022).

Tamandua mexicana (endémica, en peligro de extinción según la NOM-059-SEMARNAT-2010). Es un animal escansorial que se mueve, alimenta y descansa al nivel del suelo (Villanueva *et al.*, 2006), por lo que caminar y desplazarse por las carreteras es una opción viable. Su alimentación consiste en ingerir hormigas y termitas, se adapta a zonas urbanas (Rojas-Sánchez *et al.*, 2022).

Leopardus wiedi (en peligro de extinción según la NOM-059-SEMARNAT-2010) y *Leopardus pardalis* (en peligro de extinción). Las carreteras son un peligro para estas especies, sobre todo para individuos juveniles que buscan nuevos territorios lejos de sus madres (Vargas-Salinas y López-Aranda, 2012), aunado a que podrían ser atraídos por la carroña (animales previamente atropellados) tal es el caso de un registro en la plataforma

Naturalista en Nayarit de *Leopardus pardalis*, alimentándose de una iguana atropellada (registro del usuario *Jesusloc*) (Naturalista, 2021).

Aves

Las aves no representaron en cuanto a total de individuos atropellados un número importante, pero sí en cuanto a riqueza taxonómica.

Ortalis vetula (sin estatus). Especie impactada en la PY por su tamaño poblacional estable (Rural, 2014), sumado a que le gusta vivir entre los matorrales y enredaderas que resultan de los desmontes del bosque tropical, en este caso de los bordes de las carreteras (Molina-García *et al.*, 2008).

Anfibios

Rhinella horribilis (sin estatus). Especie de anfibio con mayor índice de muerte, similar a lo encontrado por Grosselet y colaboradores (2009). Herrera-Flores y Rojas-Cortes (2022), mencionan que la familia Bufonidae es conocida como organismos que pierden rápidamente agua y pueden morir, estos han sido especialmente susceptibles a la urbanización ya que ocupan cruzar las carreteras lentamente o se quedan inmóviles (estado de estivación en el que disminuyen su actividad metabólica y su rango de movilidad), y en momentos de temperaturas altas como lo pueden llegar a tener las carreteras por el día en la PY la pérdida de agua los podría hacer mucho más lentos y susceptibles a atropellamiento (Guzmán-García, 2020). Especie de hábitos generalistas (utilizan cualquier tipo de sustrato para realizar sus actividades del día a día), por lo que es altamente impactada tal como menciona en su estudio Guzmán-García (2020) en una carretera de Costa Rica.

DISCUSIÓN GENERAL Y CONCLUSIONES

Patrones generales. Tanto a escala regional como de paisaje los datos muestran que los reptiles son el grupo más impactado. Esto puede deberse principalmente a tres factores:

1) Ectotermalidad. Los bordes y la zona pavimentada correspondiente a la carretera funcionan como una franja dinámica donde se producen intensos y cortos gradientes de temperatura, luz incidente y humedad (Trombulak y Frisell, 2000). Esto resulta en que reptiles, como culebras, lagartos e iguanas, se acerquen a las carreteras para aprovechar el calor del pavimento, tanto en el día como en la noche (Arroyave *et al.*, 2006, Lara-Reséndiz *et al.*, 2013). Aunado a esto, durante la termorregulación los individuos pueden entrar en estado de letargo o semiletargo (Hartmann *et al.*, 2009; Avanzi y Millefanti, 2019), lo que puede aumentar el riesgo de que los atropellen cuando están sobre la carretera.

2) Estigmatización. Los reptiles son el grupo de vertebrados con mayor cantidad de prejuicios y mitos por parte de las personas debido a su “toxicidad” y apariencia (Casas, 2000). Estos factores sociales han llevado a que muchas personas los maten sin aparente justificación (de Resende Assis *et al.*, 2020); de hecho, el porcentaje de mortalidad de reptiles en este estudio no parece ser accidental, ya que los reptiles fueron por mucho, los individuos más atropellados. Otros estudios en el istmo de Tehuantepec (México) (Grosselet *et al.*, 2009), registraron un patrón similar, representando el 62.5 % de la fauna total atropellada. El elevado número de reptiles muertos en la PY nos hace considerar que al cruzar por las carreteras o posarse a termorregular, posiblemente se convierten intencionalmente en objetivos (Tanner y Perry, 2007). Comprobar esta hipótesis resulta complicado, ya que se requeriría un estudio social sobre el conocimiento y la percepción de la herpetofauna en las localidades cercanas a la carretera 'Ctra SP-ChPto' y en la PY (Tanner y Perry, 2007).

3) Relación con áreas antropizadas. Varias especies de reptiles tienen hábitos asociados a los asentamientos humanos (Arroyave *et al.*, 2006). Especies como la iguana rayada (*Ctenosaura similis*) o la boa imperial (*Boa imperator*) son comunes en ambientes parcialmente impactados, en áreas de vegetación primaria o secundaria característica de los bordes de carreteras y de la periferia de zonas urbanas y rurales (Díaz *et al.*, 2020).

En el caso de los mamíferos, este fue el segundo grupo con mayor mortalidad a escala regional, pero el tercero a escala de paisaje. La susceptibilidad de este grupo al atropellamiento se puede deber a que la mayor parte de ellos son carnívoros y/o carroñeros (Aquino, 2005), como es el caso de *Didelphis virginiana* y *Nasua narica*, que fueron las especies más impactadas en este estudio, seguidas del oso hormiguero *Tamandua mexicana* y del zorro gris *Urocyon cinereoargenteus*. Rojas-Chacón (2011) ya había registrado a un marsupial *Didelphis* sp. al lado de una boa; el estado de descomposición de la boa era diferente al del mamífero, teniendo más tiempo de muerto

el primero que el segundo, por lo que se presume que, al estar alimentándose de la boa, *Didelphis* sp. también tuvo el mismo destino. La alimentación y la preferencia del tlacuache *D. virginiana* por áreas urbanas facilitan que sea atropellado (Rojas-Chacón 2011).

Por otro lado, la biología del oso hormiguero *Tamandua mexicana* y de *Nasua narica* nos proporciona una posible explicación del porqué estas especies están muriendo atropelladas en las carreteras de la PY. El oso hormiguero *T. mexicana* es un animal escansorial que se mueve, alimenta (termitas y hormigas) y descansa al nivel del suelo (Villanueva *et al.*, 2006), por lo que caminar y desplazarse por las carreteras es una opción viable aunado a su gran tamaño, lentitud al andar y su postura de defensa que lo hace levantarse para atacar y al mismo tiempo lo vulnera.

Por su parte, *N. narica* es una especie que busca alimento en los árboles, pero al igual que la *T. mexicana*, lo hacen en el suelo (Rojas-Sánchez *et al.*, 2022). *N. narica* es omnívora y tiene cierta preferencia por pequeños vertebrados, frutos, carroña, insectos y huevos, además de que es una especie que se adaptan fácilmente a asentamientos humanos (Rojas-Sánchez *et al.*, 2022).

Después de los mamíferos el siguiente grupo impactado es el de las aves en el caso de la PY y a escala paisaje es el segundo. Solo una especie tiene un número considerable de individuos atropellados, la chachalaca oriental (*Ortalis vetula*), esta especie no es endémica ni se encuentra en alguna categoría de riesgo en las listas consultadas, posiblemente sea una especie impactada en la PY por su tamaño poblacional estable (Rural, 2014), sumado a que le gusta vivir entre los matorrales y enredaderas que resultan de los desmontes del bosque tropical, en este caso de los bordes de las carreteras (Molina-García *et al.*, 2008).

En ese estudio los anfibios ocuparon el último lugar respecto al grupo menos afectado independientemente de la escala espacial contrario a lo encontrado por Nahuat-Cervera y colaboradores (2021), quienes observaron un mayor número de anfibios impactados posicionándose como segundo grupo de mayor mortandad. La posible razón es que este estudio se realizó cerca de cuerpos de agua en donde los anfibios realizan la mayor parte de sus actividades. El sapo *Rhinella horribilis* es la especie de anfibio con mayor índice de muerte, esto es similar a lo encontrado por Grosselet y colaboradores (2009). Herrera-Flores y Rojas-Cortes (2022), mencionan que por ejemplo, *R. marina* y en general la familia Bufonidae es conocida como organismos que pierden rápidamente agua y pueden morir, estos han sido especialmente susceptibles a la urbanización ya que ocupan cruzar las carreteras lentamente o se quedan inmóviles (estado de estivación en el que disminuyen su actividad metabólica y su rango de movilidad), y en momentos de temperaturas altas como lo pueden llegar a tener las carreteras por el día en la PY la pérdida de agua los podría hacer mucho más lentos y susceptibles a atropellamiento (Guzmán-García, 2020). La segunda razón es que esta especie tiene hábitos generalistas

(utilizan cualquier tipo de sustrato para realizar sus actividades del día a día), por lo que es altamente impactada tal como menciona en su estudio Guzmán-García (2020) en una carretera de Costa Rica.

Las especies encontradas en la escala de paisaje son las mismas que a escala regional, al igual que las endémicas, por lo que el número de especies a escala paisaje es alarmante en comparación con una escala más gruesa (regional) pues equivale casi a la mitad de las especies de importancia ecológica encontradas en la PY. La iguana *C. similis* es una especie no endémica pero sus poblaciones se encuentran amenazadas según la NOM-059-SEMARNAT-2010 (SEMARNAT, 2010), por lo que el número de individuos impactados en este estudio en la PY es relevante en términos poblacionales y de conservación. García-Rosales y colaboradores (2020), menciona que esta especie es común en espacios abiertos con matorral espinoso a orillas de la península, como lo son las carreteras. Por otro lado, la bibliografía señala que entre los factores que afectan sus poblaciones, se encuentran la caza ilegal para utilizar su piel y la captura para la posterior venta como mascota exótica (Díaz *et al.*, 2020), pero en ninguno de los estudios consultados se menciona la muerte por colisiones en carreteras. En el caso de *Laemanctus serratus* (especie no endémica, sujeta a protección especial) y *Leptophis mexicanus* (especie no endémica, amenazada), se encontraron con baja incidencia, *L. serratus* es una especie de lagarto arborícola que acostumbra posarse y esconderse entre árboles, troncos y arbustos para camuflarse (Calderón-Mandujano, *et al.*, 2008) y *L. mexicanus* se encuentra principalmente en lugares de vegetación densa, acostumbra refugiarse en la base de las hojas de las palmas y con frecuencia en bromelias (Calderón-Mandujano, *et al.*, 2008), esta especie es considerada una especie importante en las cadenas tróficas y diversos estudios comprueban que sus poblaciones han sufrido una reducción por asentamientos humanos y los cambios de uso del suelo (Monge-Velázquez, 2018). El color tan llamativo de esta especie provoca cierto temor o fascinación por lo que en muchas comunidades se les extermina o captura con la finalidad de comerciar con ella, no se conoce a detalle cual es la magnitud de estas actividades (Monge-Velázquez, 2018), pero se estima que sus efectos pueden ser lamentables en caso de no controlarse (Fernández-Badillo *et al.*, 2021), por lo que hallarla en este estudio muestra las implicaciones de una carretera sobre una especie de tal importancia y vulnerabilidad. Una última razón por la que podrían estar ambas especies impactadas en este estudio es que simplemente utilizaba la carretera para cruzar de un lado a otro en busca de alimento, pareja o territorios (Calderón-Mandujano, *et al.*, 2008).

Respecto a los mamíferos, la *Tamandua mexicana* (en peligro de extinción según la NOM-059-SEMARNAT-2010) al ser endémica cobra relevancia conocer el número de individuos que han muerto en este estudio (Villanueva *et al.*, 2006). Las razones por las que es atropellada ya fueron antes mencionadas (Navarrete y Ortega, 2011; Rojas-Sánchez *et al.*, 2022). Finalmente, en la lista de especies en alguna categoría de conservación se encontraron dos especies de felinos que representan especies carismáticas (Racero-Casarrubia y Reyes-Cogollo, 2022), *Leopardus wiedi* y *Leopardus pardalis*, para estos dos casos se sabe que las carreteras son un peligro sobre todo para

individuos juveniles que buscan nuevos territorios lejos de sus madres (Vargas-Salinas y López-Aranda, 2012) y una razón más es que podrían ser también susceptibles al ser atraídos por la carroña (animales previamente atropellados) tal es el caso de un registro en la plataforma *Naturalista* en Nayarit de *Leopardus pardalis*, alimentándose de una iguana atropellada (registro del usuario *Jesusloc*) (Naturalista, 2021).

Las especies endémicas encontradas atropelladas en este estudio en la PY, están divididas entre reptiles y aves. La serpiente de cascabel yucateca *Crotalus tzabcan* (endémica de la PY), es una especie ectoterma (Díaz *et al.*, 2020), por lo que está siendo impactada debido a los factores ya discutidos en este estudio. Esta es una serpiente venenosa, lo que la hace un organismo estigmatizado, de importancia médica y susceptible a ser matada por temor a su mordedura (Díaz *et al.*, 2020). *Pseudelaphe phaescens* o culebra ratonera yucateca es la segunda especie endémica más impactada (endémica de la PY), los estudios demográficos de esta especie son complejos (Díaz *et al.*, 2020), por lo que no se sabe el estado actual de sus poblaciones (Naturalista, 2022), estudios como este nos muestran que la especie además de estar siendo impactada por atropellamiento también podría tener ciertos hábitos que le permiten cruzar más que otras serpientes las carreteras.

Conophis lineatus o culebra guardacaminos lineada (endémica de la PY) y la culebra cordelilla yucateca *Imantodes tenuissimus* (endémica de Yucatán), son las siguientes especies con mayor impacto en este estudio, las poblaciones de la culebra guardacaminos son moderadamente comunes, pero al ser venenosa la hace un organismo susceptible a estigmatización y además tiene preferencia por sitios abiertos (Díaz *et al.*, 2020), la culebra yucateca cuenta con muy pocos registros para hacer estudios poblacionales, ya que es difícil de encontrar en campo, lo poco que se sabe acerca de su biología es por algunos individuos y no a estudios poblacionales (Calderón-Mandujano, 2002). Al ser una especie escasa que se encuentra en lugares abiertos o entre arbustos pocas veces se encuentra en caminos. En el caso de la culebra rayada de Schmidt *Coniophanes schmidti* (endémica de la PY), podrían estar siendo impactada ya que sus poblaciones son moderadamente comunes (Díaz *et al.*, 2020). Finalmente, en el grupo de las aves las dos especies endémicas que se encontraron esta la chara yucateca *Cyanocorax yucatanicus* (endémica de la PY) y *Melanerpes pygmaeus* (endémica de la PY), que, aunque tuvieron un solo registro, al ser endémicas de la PY, cobra importancia saber si están muriendo por colisión.

Los datos obtenidos en este estudio no muestran una tendencia clara sobre si hay diferencias en el número de atropellamientos por año, debido a que este estudio fue realizado con un muestreo no aleatorio más bien circunstancial. Por lo tanto, la razón por la que los años 2019 y 2022 tuvieron pocos registros no nos habla de que en estos años haya disminuido el número de atropellamientos, simplemente no se registraron esos datos. Años como 2021 o 2018, nos dan evidencia de que el número de atropellamientos por año es elevado aun con un muestreo no intensivo y sistematizado, dejando claro que un muestreo de este tipo podría arrojar cifras de mortandad por colisión muchos más elevadas.

A escala paisaje, las especies con mayor número de individuos muertos en lluvias, fueron dos reptiles y un anfibio *Ctenosaura similis*, *Mastigodryas melanolomus* y *Rhinella horribilis*. Todos ectotermos y dependientes de la lluvia para reproducción (Arroyave *et al.*, 2006). En secas la especie más impactada fue *C. similis* al igual que en la escala paisaje, pues como ya se mencionó es una especie con características biológicas y fisiológicas que la hacen abundante y vulnerable (Arroyave *et al.*, 2006).

Respecto a las especies encontradas en temporadas de lluvias, todas ellas son reptiles y un anfibio, se sabe que estos se reproducen en estas temporadas para aprovechar adecuadamente la disponibilidad de agua (Herrera-Flores y Rojas-Cortes, 2022). En temporada de secas las dos especies más impactadas también son reptiles, esto puede deberse a su fisiología ectoterma. Tal es el caso de *Ctenosaura similis* y la *Boa imperator* que Díaz y colaboradores (2020), reportan como una especie cuyas crías nacen en mayo y en época de lluvias respectivamente, mayo es el mes en el que termina secas y comienzan las lluvias, es por ello que la iguana rayada se encuentra en alto número de individuos atropellados en las dos temporadas. Ambas especies tienen un número alto de crías (15-80 huevos en el caso de *C. similis* y de 12 a 26 en *B. imperator*) y son especies tanto diurnas como nocturnas. Lo que las hace susceptibles a muerte todo el tiempo debido a que se encuentran en continuo movimiento a diferencia de especies que ocupan parte de su día para dormir u ocultarse. A diferencia de estas dos especies, la serpiente *Mastigodryas melanolomus*, es una especie que puede reproducirse en cualquier momento del año y solo se observó en temporada de lluvias el alto número mientras que en temporada de secas solo un individuo, lo que nos puede hablar de que al ser una especie diurna es menos susceptible a morir en cualquier momento del día y año, o que hace falta un mayor tiempo de muestreo (Díaz *et al.*, 2020). El caso de la serpiente yucateca *Crotalus tzabcan* es especial, debido a que es una especie de importancia para la región (endémica de la provincia biogeográfica PY), esta especie tiene hábitos terrestres, crepusculares o nocturnos dependiendo de la estación, su camada es relativamente grande (21 crías) aunado a que sus crías nacen exactamente en el pico de la temporada de lluvias (julio y agosto) (Díaz *et al.*, 2020). El conjunto de estas características la hacen susceptible a morir por atropellamiento al buscar espacio para termorregular, cruzar, preferir temporada de lluvias en la reproducción y en general estar activas durante cualquier momento día. *Micrurus apiatus*, por otro lado, es una especie que tiene preferencia por selvas lluviosas, zonas perturbadas y es activa en noches lluviosas, se sabe poco acerca de su época de reproducción. En este estudio fue encontrada arroyada en mayor número en temporada de lluvias que en secas, lo cual coincide con sus hábitos y biología (Díaz *et al.*, 2020).

Escalas espaciales. El número de individuos registrado en una sola carretera es alto comparado con los datos obtenidos a una escala espacial más grande (PY), estos fueron casi la mitad de los datos registrados. Estas cifras son preocupantes debido a que si el esfuerzo de muestreo es mayor a escala regional o similar al realizado en la *Ctra SP-ChPto* seguramente el número de atropellamientos incrementaría a cifras alarmantes

resaltando la importancia de más estudios en la zona, sobre grupos específicos y de estudios sociales de educación ambiental (Hartmann *et al.*, 2011).

No hay diferencia en las especies encontradas en la escala de paisaje y la escala regional pues comparten la lista, al igual que las endémicas. Respecto a la temporalidad en cada escala, las distintas formas de vida vegetal (árboles, arbustos, vegetación herbácea) se ven modificadas en sitios con temporalidades marcadas (heterogeneidad ambiental) (Morlans, 2005), estas características limitan o beneficia a los organismos que habitan en ellas por lo que los datos encontrados respecto al año y temporalidad (lluvias y secas) sí presentaron variabilidad, al no tener las mismas características ambientales y vegetales, los atropellamientos fueron mayores en lluvias en todos los años (2016-2020) a excepción del año 2021 en el que el número de individuos atropellados fue mayor en secas, esto puede deberse a que el esfuerzo de muestreo se centró en época solo de secas. Es importante mencionar que en las carreteras el efecto de la temporalidad (secas vs lluvias) que se mide a una escala regional o escalas más grandes, no es la única escala importante a considerar en el efecto que podrían estar teniendo sobre los atropellamientos, pues el efecto borde que supone una carretera y cualquier ecosistema fragmentado, cambian las condiciones bióticas y abióticas de los fragmentos y de la matriz circundante a escala micro climática (Kattan, 2002). Este efecto se presentará en las inmediaciones o borde de la vía, donde se crearán condiciones con mayor temperatura, menor humedad, mayor radiación y mayor susceptibilidad al viento (Arroyave *et al.*, 2006). Este tipo de variación a escala de micro paisaje podrían estar incidiendo en el número de atropellamientos para ciertos grupos dependientes de calor como los encontrados en este estudio (reptiles).

La PY es una zona sujeta a sequías y a huracanes constantes (Orellana-Lanza *et al.*, 2009; Márdero *et al.*, 2012), por lo que observamos en los datos una tendencia a atropellamientos en época de lluvias, esto es interesante debido a que el mayor número de individuos atropellados son del grupo de los reptiles, la mayor parte de estos vertebrados se reproducen en esta época en la que la vegetación se beneficiara de las intensas lluvias proveyendo de recursos para las cadenas tróficas primarias y secundarias que a su vez son alimento de los reptiles que se suelen posicionar en los eslabones más altos, al ser muchos de ellos principalmente carnívoros en su edad adulta (cuando más se reproducen) (Cuadrado, 2002). Nuestro estudio coincide con el de De la Ossa y colaboradores (2015), se sugiere que uno de los factores más importantes por el que los organismos son atropellados en ciertas épocas del año es la estrategia térmica sin olvidar que los anfibios y muchas especies de herpetofauna dependen de la temporalidad.

En ambas escalas el número de atropellamientos sigue siendo más alto en lluvias que en secas independientemente del grupo taxonómico o año, casi el doble de muertes registradas. Respecto al número de especies encontradas permanece sin cambios en relación a la escala (Hartmann *et al.*, 2011), por lo que la muerte de especies es igual independientemente de otras variables, llámese temporalidad, año o escala espacial, y es que, en cuanto a las especies, siempre requerirán recursos y espacio de movilidad lo que los hace susceptibles de igual manera para ser atropellados (Morlans, 2005).

Los datos a escala paisaje (*Ctra SP-ChPto*) son más específicos, pero nos dan un vistazo del panorama de las carreteras de toda la PY en cuanto al elevado número de colisiones que están sucediendo, siempre considerando que cada carretera se comportará diferente dependiendo de factores como la forma, tamaño, cantidad de tránsito vehicular, entre otros aspectos. Respecto a los datos encontrados en este estudio a escala regional (PY), no se puede generalizar el estado actual de esta escala pues el muestreo cuenta con pocos registros resultado del tipo de datos utilizados como los son los datos de ciencia ciudadana del portal *Naturalista*, de esta forma estaríamos subestimado la gravedad del impacto de las carreteras de la PY.

Una de las ventajas de trabajar con una escala de paisaje (como es el caso de la *Ctra SP-ChPto*) es que podríamos obtener datos de las carreteras más transitadas y desarrollar estrategias específicas en puntos de mayor colisión, por otro lado entre las ventajas de trabajar a escala regional (PY) como lo realizamos en este estudio, es que conocemos una parte importante del panorama del impacto sobre la fauna, que nos ayudaría a frenar la construcción de carreteras en zonas de importancia ecológica o en su defecto implementar la construcción de carreteras enfocadas en generar el menor impacto posible sobre la biodiversidad (durante la construcción de la carretera pero sobre todo después de ella). Es importante saber que para conocer el panorama completo de los efectos de las carreteras sobre los vertebrados terrestres, no podemos solo trabajar con datos de ciencia ciudadana, debido a que algunos de estos datos omiten el registro de individuos al no ser el objetivo principal ir muestreando cuando transitan por carretera, la velocidad podría influir en no ver muchos de estos, sobre todos los de pequeño tamaño.

Concluimos que los organismos más impactados son el grupo de los reptiles, esto nos lleva a cuestionarnos; ¿La estigmatización hacia los reptiles por gran parte de la población humana es en realidad una de las razones por las que los reptiles están siendo más impactados? Nuestros datos no responden a esta cuestión, pero la tendencia es clara, sobre todo en zonas tropicales y en sitios de muestreo cercano a cuerpos de agua. Por otro lado, un gran número de especies encontradas están en alguna categoría de riesgo y/o son endémicas de la PY como lo son la iguana rayada, la boa imperial y la culebra ratonera yucateca. Sobre la variación estacional, se observó un mayor número de muertes por colisión en la temporada de lluvias y en relación a la variación anual, esta no fue determinante para ningún año por el tipo de muestreo realizado.

RECOMENDACIONES

Se recomienda a las autoridades ambientales 1) exigir a las empresas constructoras la identificación y evaluación de los efectos negativos que producen los proyectos viales en la fauna por atropellamiento en la PY, 2) estudiar el efecto de las carreteras en los ecosistemas circundantes sobre todo en zonas de importancia (de alta biodiversidad); 3) implementación de señalamientos sobre la fauna y disminución de velocidad que también ayudara a evitar accidentes de humanos, y se requieren 4) muestreos sistematizados para comparar zonas que podrían permitir construir pasos de fauna u otras estrategias para el beneficio de vertebrados terrestres; 5) se deben considerar estrategias de prevención y mitigación de impacto especialmente a grupos vulnerables como los son los reptiles; y relacionado con esto 6) estudios de percepción social (estudios etnozoológicos), que incluyan encuestas diseñadas específicamente a personas que utilicen las carreteras con frecuencia como trailers, autobuses turísticos, ganaderos, entre otros, para también poderlos abordar con proyectos de educación ambiental acerca animales “no carismáticos” como las serpientes.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Aquino, R. (2005). Alimentación de mamíferos de caza en los «aguajales» de la Reserva Nacional de Pacaya-Samiria (Iquitos, Perú). *Revista peruana de biología*, 12(3): 417-425.
- Avanzi, M., y Millefanti, M. (2019). *El gran libro de las tortugas*. Parkstone International. De Vecchi Ediciones, USA. 395 p.
- Cuadrado, M. (2002). Sistemas de apareamiento en reptiles: una revisión. *Revista Española de Herpetología*, 61: 69.
- De la Ossa, V. J., De la Ossa-Nadjar, O., y Medina-Bohórquez, E. (2015). Atropellamiento de fauna silvestre. *Revista Colombiana de Ciencia Animal-RECIA*, 7(1): 109-116.
- Hartmann, P. A., Hartmann, M. T., y Martins, M. (2009). Ecology of a snake assemblage in the Atlantic Forest of southeastern Brazil. *Papéis Avulsos de Zoologia*, (49): 343-360.
- Kattan, G. (2002). Fragmentación: patrones y mecanismos de extinción de especies. En: Guariguata M. y G. Kattan (eds). *Ecología y conservación de bosques neotropicales*, 1: 561-582.
- Lara-Reséndiz, R. A., Arenas-Moreno, D. M., y Méndez De la Cruz, F. R. (2013). Termorregulación diurna y nocturna de la lagartija *Phyllodactylus bordai* (Gekkota: Phyllodactylidae) en una región semiárida del centro de México. *Revista chilena de historia natural*, 86(2): 127-135.
- McGuire, J. y Koo, M. (eds) (2023) *AmphibiaWeb*, <https://amphibiaweb.org>> University of California, Berkeley, CA, USA. Accessed 31 Oct 2023.
- Naturalista (2022) Culebra Ratonera Yucateca *Pseudelaphe phaescens*. Consultado el 26 de noviembre de 2022. Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad. <https://www.naturalista.mx/taxa/558937-Pseudelaphe-phaescens>
- Navarrete, D., y Ortega, J. (2011). *Tamandua mexicana* (Pilosa: myrmecophagidae). *Mammalian Species*, 43(874): 56-63.
- Požgayová, M., Piálková, R., Honza, M., y Procházka, P. (eds) (2023) *Ornithological Advances American Ornithology*. <https://americanornithology.org/contact/>
- Racero-Casarrubia, J., y Reyes-Cogollo, K. I. (2022). Mamíferos carismáticos emblemas de la conservación de Colombia. *Therya ixmana*, 1(3): 111-113.
- Trombulak, S. C., y Frissell, C. A. (2000). Review of ecological effects of roads on terrestrial and aquatic communities. *Conservation biology*, 14(1): 18-30.
- Uetz, P., Freed, P, Aguilar, R., Reyes, F., Kudera, J. y Hošek, J. (eds.) (2023) *The Reptile Database*, <http://www.reptile-database.org>, accessed 31 october. This page has been created on 10 Nov 1995 / Last changed or updated: 30 Oct 2023.
- Upham, N., Burgin, C., Widness, J., Liphardt, S., Parker, C., Becker, M., y Huckaby, D. (2022). *Mammal diversity database*. <https://www.mammaldiversity.org/>