IMPACTO DE LA CARRETERA “CALAKMUL” SOBRE LA FAUNA SILVESTRE.
CALAKMUL, CAMPECHE, MÉXICO.

Dra. Kathy Slater, Operation Wallacea

INTRODUCCIÓN

La pérdida y fragmentación del hábitat se citan como el mayor impacto en la conservación de las especies silvestre y las especies que habitan los bosques (p. ej. aves; Laurance *et al.*, 2004) y herpetofauna (Fahrig & Rytwinski, 2009) y los animales de talla grande que se extienden sobre grandes áreas (p.ej. primates; Chaves *et al.*, 2012) son reportadas a ser especialmente susceptibles a los cambios en su entorno espacial. La creación de carreteras a través de zonas forestales puede dividir los rangos de hogar de los animales, la mayoría de las especies terrestres son reticentes a cruzar carreteras concurridas (Goosem, 2001; Jaeger *et al.*, 2015); y especies arbóreas como los primates e inclusive animales alados como las aves, generalmente, no cruzan las carreteras a menos que sea lo suficientemente estrecha para que el dosel del bosque se extienda a través de la carretera creando un puente natural (Laurance *et al.*, 2004). Por el contrario, algunas especies silvestres son reportadas usando las carreteras. Los felinos, como el jaguar, han sido reportados usando carreteras de una sola vía a través del bosque para viajar por sus territorios (Harmsen *et al.*, 2010) o cruzan autopistas principales que dividen sus territorios (Colchero *et al.*, 2011), y como las carreteras crean una ruptura en el dosel permitiendo que la luz del sol atraviese el suelo del bosque, los reptiles, particularmente las serpientes, has sido reportados posándose sobre las carreteras para calentarse (Fahrig & Rytwinski, 2009). Aquellas especies que tratan de cruzar las carreteras o que las usan activamente son particularmente vulnerables a chocar con los vehículos (Arroyave *et al.,* 2006; Colchero *et al.,* 2011; Puc Sanches *et al.*, 2013), con carreteras más anchas (y por asociación vehículos a mayor velocidad) se incrementa la probabilidad de atropellos (van Langervelde & Jaarsma, C. F., 2004). La mayoría de estudios de impacto de carretera han sido realizados en Australia y Europa, por lo tanto, los datos del bosque Neotropical son insuficientes (Taylor & Goldingay, 2010); pero un estudio reciente en el trópico de México concluyó que las carreteras fueron el principal contribuyente para la mortalidad de vida silvestre en las áreas rurales (Puc Sanches *et al.*, 2013).

La Reserva de la Biosfera de Calakmul ha sobresalido por ser la mayor reserva mexicana de selva tropical en donde se albergan 70 especies de réptiles y 20 de anfibios (Colston et al., 2015), 361 de aves (CONABIO, 2015) y 94 de mamíferos (CONANP, 1999), además de que en ella se encuentra una de las zonas arqueológicas más importantes de la cultura Maya. Estas características han logrado que la afluencia turística haya aumentado en los últimos años, dejando grandes beneficios económicos en toda la región. Sin embargo, esto también ha implicado la construcción de un camino-carretera por el cual se pueda acceder en automóvil a la zona arqueológica, lo que ha traído al mismo tiempo otro tipo de implicaciones.

El tramo de 60Km de carretera de una sola vía en la RBC, que es la propuesta para la ampliación, comienza en la entrada de la reserva y pasa a través de 20km de la zona de amortiguamiento seguido por 40km de bosque de la zona núcleo que conduce al sitio de las ruinas de Calakmul (la principal atracción para los turistas en la reserva). La carretera es actualmente muy estrecha con un correspondiente bajo límite de velocidad de 40 km por hora, lo que significa que se necesita 1.5 horas para llegar al sitio de las ruinas desde la entrada de la reserva. Para el beneficio de incrementar el turismo en la zona de las ruinas, ha sido sugerido que la carretera podría ser ampliada permitiendo un límite de velocidad más alto. Sin embargo, existen grandes preocupaciones del impacto de una carretera más amplia y con velocidades límites más altas sobre la vida silvestre en la reserva.

Los turistas ya sobrepasan el límite de velocidad de 30km y por eso hay un riesgo de que una carretera más amplia con velocidades límites más altas solo promueva el aumento del riesgo de atropellos de animales que la cruzan, particularmente de serpientes que a menudo se posan sobre la carretera para calentarse y son muy difíciles de detectar a la distancia haciendo muy complicado para los rápidos vehículos visitantes de desacelerar a tiempo para evitar la muerte del animal. Además, con las condiciones actuales de la carretera ha habido múltiples casos confirmados de vehículos golpeando mamíferos grandes que la cruzaban, particularmente en áreas con fuentes de agua cercanas a la carretera a las que los animales necesitan tener acceso. Para algunos animales, particularmente los primates arbóreos que deben saltar de árbol en árbol para poder cruzar la carretera, la ampliación de esta podría resultar en una distancia entre árboles muy larga para que ellos puedan cruzar. Si esto ocurriera los primates tendrán que, o bien bajar al suelo para cruzar la carretera incrementado el riesgo de atropellamiento, o simplemente perderán el acceso a su territorio al otro lado de la carretera; lo que en un bosque con muy limitado acceso al agua y a árboles frutales grandes podría resultar en la extinción localizada de las poblaciones de primates.

El objetivo del presente estudio es, por lo tanto, evaluar el impacto potencial de la ampliación de la carretera sobre el rango y uso de hábitat de grandes mamíferos terrestres, primates arbóreos y herpetofauna en la Reserva de la Biosfera de Calakmul (RBC), México. El estudio también tiene como objetivo investigar el aumento de la velocidad de los vehículos asociado con la ampliación de la carretera y la probabilidad del aumento del riego de atropellos.

Objetivos de Investigación

- Colectar datos de abundancia de primates (*Ateles geoffroyi y Alouatta pigra*), mamíferos grandes terrestres (*Panthera onca, Puma concolor, Leopardus pardalis, Tayassu pecari, Pecari tajacu, Odocoileus virginianus, Mazama sp.* y *Tapirus bairdii*) y herpetofauna (todas las especies de reptiles y anfibios) a lo largo de los transectos del bosque que se extienden desde varios tramos de los 60km de la carretera, para tener un estimado del número de mamíferos grandes en el área general que probablemente la cruzarán.

- Colectar datos de una serie de variables de hábitat incluyendo, diversidad de especies de árboles, cobertura vegetal, profundidad de la hojarasca y abundancia vegetal, desde la primera parcela de hábitat a lo largo de los transectos del bosque que se extienden desde la carretera, para determinar predictores de la abundancia (y, por consiguiente; del cruce en la carretera) de primates, mamíferos grandes y herpetofauna, en el bosque adyacente a varios tramos de la carretera.
- Registrar la frecuencia del cruce de mamíferos en varios tramos de la carretera usando cámaras-trampa.
- Registrar la frecuencia del cruce de primates en determinados tramos de la carretera, y medir la distancia máxima entre árboles usados como puentes a través de la carretera; como un medio para identificar otros sitios potenciales de cruce de primates.
- Determinar la distancia máxima de salto de cada especie de primate desde observaciones de comportamiento de tropas habituadas, como medio para recomendar la amplitud máxima de la carretera que aún permitiría que los primates crucen sin necesidad de bajar al suelo.
- Registrar la abundancia de la herpetofauna a lo largo de diferentes tramos de carretera para establecer el riesgo de atropellos.
- Registrar todos los casos de atropellos a lo largo de la carretera en el sitio de estudio.
- Mapear la ubicación de las aguadas permanentes en ambos lados de la carretera y distinguir si existe una relación entre sus ubicaciones y la frecuencia del cruce de animales en la carretera.
- Comparar las velocidades de los vehículos visitantes a lo largo del tramo ya ampliado de la carretera en la zona de amortiguamiento, con la velocidad de los vehículos del tramo de la carretera en la zona núcleo; para proporcionar un estimado de qué tan rápido viajarán los vehículos a través de la zona núcleo si la carretera es ampliada.
- Diferenciar cuales áreas del camino son más peligrosas, en términos de límites de velocidad de los vehículos, con el fin de aportar justificaciones para la adición de reductores de velocidad (topes).
- Identificar cuales áreas de la carretera son cruzadas con mayor frecuencia por los animales y por qué.
- Determinar si los tramos de la carretera con probabilidades más altas de que crucen animales corresponde a las áreas más peligrosas en términos de límites de velocidad, con el fin de adicionar reductores de velocidad a estas áreas específicas para que los vehículos disminuyan la velocidad y así se reduzca la probabilidad de atropellos.

MÉTODOS

Sujetos y Área de Estudio

El estudio fue realizado en la Reserva de la Biosfera de Calakmul en el Sureste de Campeche, México;

desde junio hasta agosto de 2015. La reserva cuenta con una carretera de 60km con una vía única que empieza en la entrada de la reserva hasta las ruinas de Calakmul, el cual es el área propuesta para la ampliación de la carretera. La lluvia en Calakmul varía mucho anualmente con un promedio de 1076.2mm, pero puede variar de 552 a 1634mm (Escamilla *et al*., 2000). El ecosistema dominante en la reserva es de bosque tropical semideciduo en donde más del 40% de los árboles pierden sus hojas durante la época seca (Belesky, 1999, Aryal *et al*., 2014). La reserva fue declara área protegida en 1989 y posteriormente, fue declarada como Patrimonio mixto de la humanidad por la UNESCO. No hay ríos en la reserva, por lo tanto, el único tiempo en el que hay disponibilidad de agua es después de la lluvia. La mayoría del agua se drena en la piedra caliza, pero una pequeña cantidad se acumula en estanques naturales conocidos como aguadas (Reyna-Hurtado *et al*., 2012).

El área respalda una gran variedad de ungulados: tapir (*Tapirus bairdi*), especies de venado colorado (género: *Mazama*), venado cola blanca (*Odocoileus virginianus*), pecarí labiado (*Tayassu pecari*) y pecarí de collar (*Pecari tajacu*). La reserva también es el hogar de cinco de los seis grandes felinos nativos de México: jaguar (*Panthera onca*), yaguarundí (*Puma yagouaroundi*), ocelote (*Leopardus pardalis*), puma (*Puma concolor*) y tigrillo (*Leopardus weidii*); y también de dos especies amenazadas de primates endémicos (*Ateles geoffroyi yucatanensis* y *Alouatta pigra yucatanensis*). Existen 70 especies de reptiles y 21 especies de anfibios reportados para la reserva y mucho de estos son endémicos (Colston *et al.*, 2015).

Colecta de datos

Para evaluar de forma confiable los impactos potenciales de la ampliación de la carretera se requieren muchos métodos de colecta de datos. Para descubrir los tramos de la carretera en donde existe más probabilidad de que los mamíferos grandes crucen, se realizaron muestreos de parcelas de ocupación en los senderos que se extienden afuera de la carretera. El uso de área por el animal fue determinado por la presencia de huellas y excretas. Las fuentes de agua fueron identificadas y registradas para determinar si su proximidad estaba asociada con la frecuencia de cruces de animales. Los puntos de GPS de los sitios de cruce y fuentes de agua, fueron registradas para determinar su distribución.

Los datos fueron colectados en varios sitios a lo largo de los 60km de la carretera de una sola vía, que va desde la entrada de la reserva con rumbo Sur a través de la zona núcleo y terminando en la zona arqueológico de Calakmul. La anchura y rectitud de la carretera fue medida en cada sitio, junto con la distancia desde la carretera hasta la aguada permanente más cercana. Pistolas de radar fueron usadas para registrar la velocidad de los vehículos que utilizan la carretera en dos sitios de la zona de amortiguamiento de la reserva, en donde la carretera ya fue ampliada (KM15 y KM17), y tres sitios en la zona núcleo de la reserva dónde la propuesta de ampliación de la carretera ocurrirá (KM22, KM27, KM40). Estos datos fueron utilizados para determinar sí los vehículos excedían el límite de velocidad de 30km por hora y si la velocidad del vehículo (y por lo tanto la probabilidad de atropellos) es mayor dónde la carretera es más ancha.

En tres de estos sitios (KM15, KM27 Y KM40), estudios de mamíferos grandes, a lo largo de transectos de línea (Peres, 1999) que se extienden afuera de cada lado de la carretera, fueron realizados por pequeños grupos de personas caminando lentamente y en silencio, iniciando a las 6:30am cuando la mayoría de la vida silvestre puede ser detectada. Las especies, la hora, y la distancia recorrida a lo largo del transecto de línea, fue registrada cada vez que se encontró la huella de un mamífero grande, anotando el largo y ancho de la huella y un aproximado de la frescura (días). Cinco cámaras-trampa Bushnell Trophy Cam fueron colocadas en cada uno de los tres sitios (15 cámaras en total) para la confirmación visual de mamíferos grandes cruzando el camino y la frecuencia con que esto ocurría.

Estudios adicionales de transectos de línea fueron realizados a lo largo de tramos de la carretera en los cinco sitios para monitorear cruce de animales y atropellos. En cada uno de los cinco sitios de estudio, tramos de 2km hacia el norte y 2km hacia el sur fueron caminados (caminatas de 4km en total) en las mañanas y tardes; y para cada animal que fue encontrado se registró la distancia a lo largo de la carretera, la hora del día, las especies y si el animal estaba vivo o muerto.

Estudios de hábitat de 20m x 20m fueron realizados en los sitios de investigación distanciados equidistantemente a lo largo de los transectos de línea, con el fin de investigar la estructura del bosque (para posteriores análisis de predictores de hábitat de la abundancia de herpetofauna, primates y mamíferos grandes). Para cada árbol en la parcela con una circunferencia >15cm se registró la especie, el DAP, la altura y si el árbol estaba vivo o muerto. El número de árboles jóvenes (circunferencia <15cm y altura >2m) fue registrado para cada parcela, y la vegetación del sotobosque fue medida en las líneas bisectrices de la parcela usando estacas/tubos de toque de 3m. La profundidad de la hojarasca y la apertura del dosel (medido usando la red de puntos llamada canopy scope) fueron registradas a un metro de cada esquina de la parcela y en el centro de la misma. También fue registrada la distancia de la parcela a la aguada más cercana.

Análisis de datos

Todos los datos colectados fueron introducidos en Microsoft Excel para análisis iniciales y luego fueron transferidos a SPSS para estudios posteriores. La velocidad promedio de los vehículos visitantes a lo largo de la carretera fue calculada para determinar si excedían el límite de velocidad recomendado. La prueba de ANOVA de una vía fue utilizada para determinar si existía una diferencia significativa en el promedio de la velocidad de los vehículos que cruzan los 5 sitios de estudio, y si la velocidad de esta era alta en las partes que son más amplias de la carretera. El número de huellas de mamíferos grandes asociado con cada parcela de hábitat en cada uno de los transecto que se extiende afuera de la carretera, fue calculado para proporcionar una serie de variables dependientes (la abundancia de huellas de cada especie de mamíferos grandes) y variables de hábitat independientes (DAP promedio de árboles, área basal total, vegetación total del sotobosque, número de muestras, profundidad de la hojarasca promedio, altura de árboles promedio y distancia de la aguada). El Modelo Lineal Generalizado (MLG) fue utilizado para crear un modelo de los mejores predictores de la abundancia

de las especies de mamíferos grandes, y para la abundancia y diversidad de reptiles y anfibios. Este resultado fue posteriormente utilizado para determinar cuáles áreas del bosque adyacente a la carretera eran más probables de tener abundancia de mamíferos grandes y, por lo tanto, mayor probabilidad de cruces en la carretera.

El número de animales vivos y atropellados (aves terrestres, mamíferos, reptiles y anfibios) encontrados por kilómetro caminado, fue registrado para cada uno de los transectos estudiados de la carretera en cada sitio de investigación. Las diferencias en el uso de la carretera y atropellos en los diferentes sitios fueron comparadas usando ANOVAS de una vía y la relación entre atropellados y velocidad promedio de vehículos fue investigado con Pearson correlación. En KM15, KM27 y KM40, la tasa de cruces por hora de aves terrestres y mamíferos, también fue calculada a partir de los datos obtenidos de las cámaras-trampas. Esta combinación de grupos de datos fue utilizada para proporcionar información sobre el uso que hacen los animales de la carretera, y la diversidad y abundancia de especies que podrían ser afectadas por la propuesta de ampliación de la misma.

RESULTADOS

792 vehículos fueron registrados durante 114 horas y 28 minutos atreves de 53 días de monitoreo vehículos entrando y saliendo de la reserva. Se debe tener en cuenta el tipo de vehículos que entran a la reserva, ya que las posibles colisiones serían muy distintas hablando de un automóvil privado que va a 40 km/h, a una suburbano a 80km/h. Del total de vehículos registrados, 579 corresponden a automóviles particulares, 81 a camionetas tipo 'Pick-up', 74 a Suburban tipo van de 11 o 14 pax y 55 a motocicletas (Figura 1).

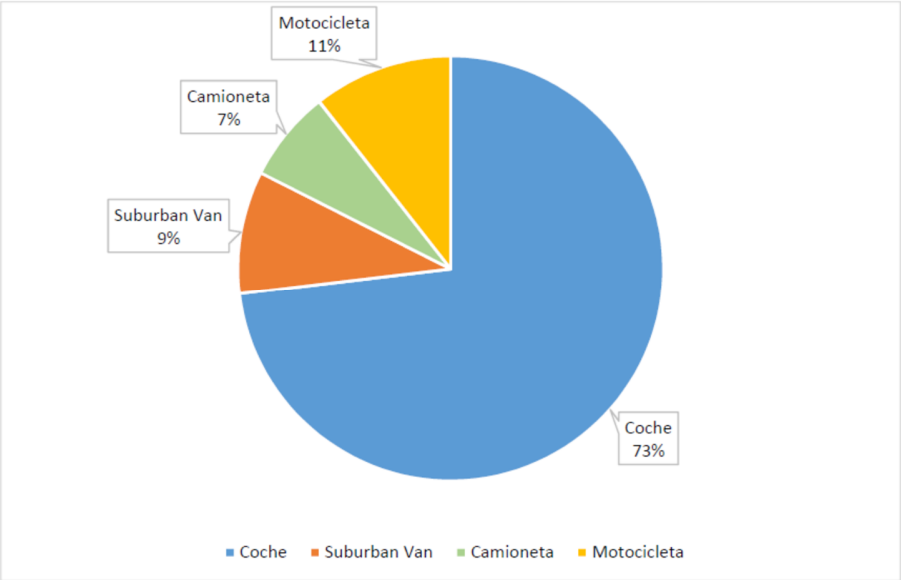

Figura 1: Porcentaje de tipo de vehículos registrados usando la carretera de Calakmul

Los datos obtenidos en la medición de velocidad, arrojaron un promedio general de 53.28 km/h para todos los vehículos, un promedio similar se obtuvo para los vehículos que entran (52 km/h), mientras que el promedio de los que salen fue de 55 km/h. Figura 2 muestra los rangos de velocidad y la cantidad de vehículos registrada en las tomas de datos. En ella se puede observar también que la mayor parte (81%) de los vehículos están en los rangos de velocidad de 30-49 y 50-69 km/h. Cabe resaltar que solamente una pequeña cantidad (6%) de vehículos respetaron el límite de velocidad establecido. Se encontró una diferencia significativa entre velocidades de vehículos promedios atreves de los puntos de muestreo por la carretera ($F_{(4, 789)}= 118.37$, $p <0.001$). Los primeros dos puntos (km 15 y km 17), que son las partes más anchas de la carretera, es en donde los automovilistas tienden a conducir más rápido y hubo una diferencia significativa de velocidad promedio entre los primeros dos puntos y los otros puntos (Tukey Post Hoc Test $p < 0.001$: Figura 3). Máxima velocidad registrado por los primeros dos puntos fue 102 km/h, y por km15 y km17 velocidad promedio fue arriba de 60km/h. Velocidad promedio fue disminuido con el avanzo de la carretera y quedó más bajo (~40m/h) por los puntos más angostos (km 27 y km 40). No hubo diferencia significativa en la velocidad promedio de diferentes tipos de vehículos usando la carretera ($F_{(4, 789)}= 5.26$, $p =0.137$ Figura 4)

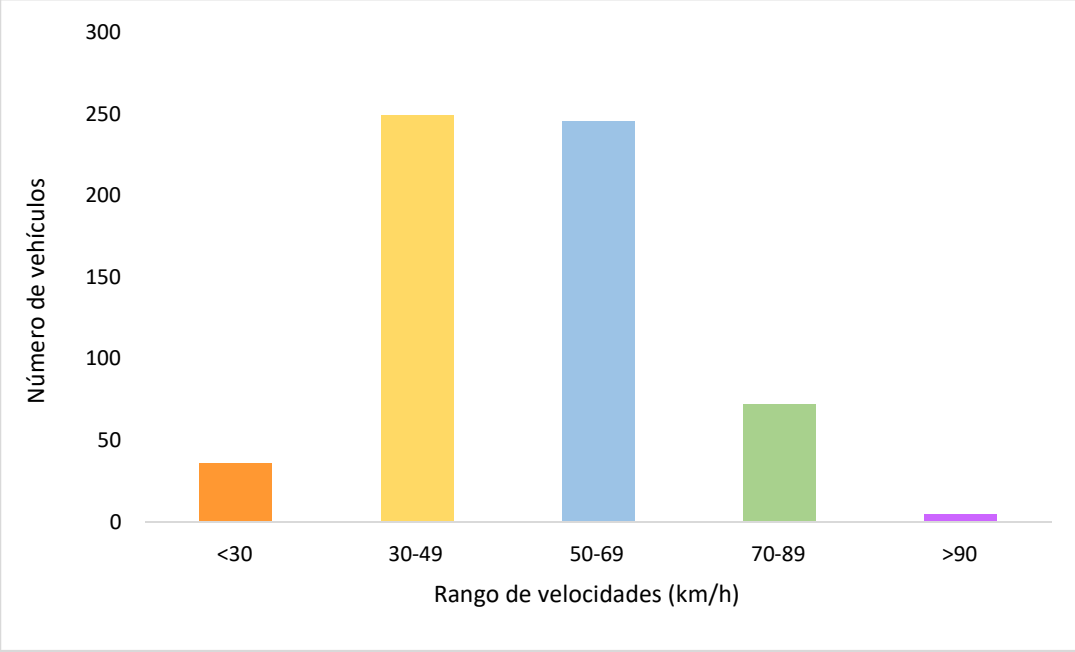

Figura 2: Número de vehículos por rango de velocidad

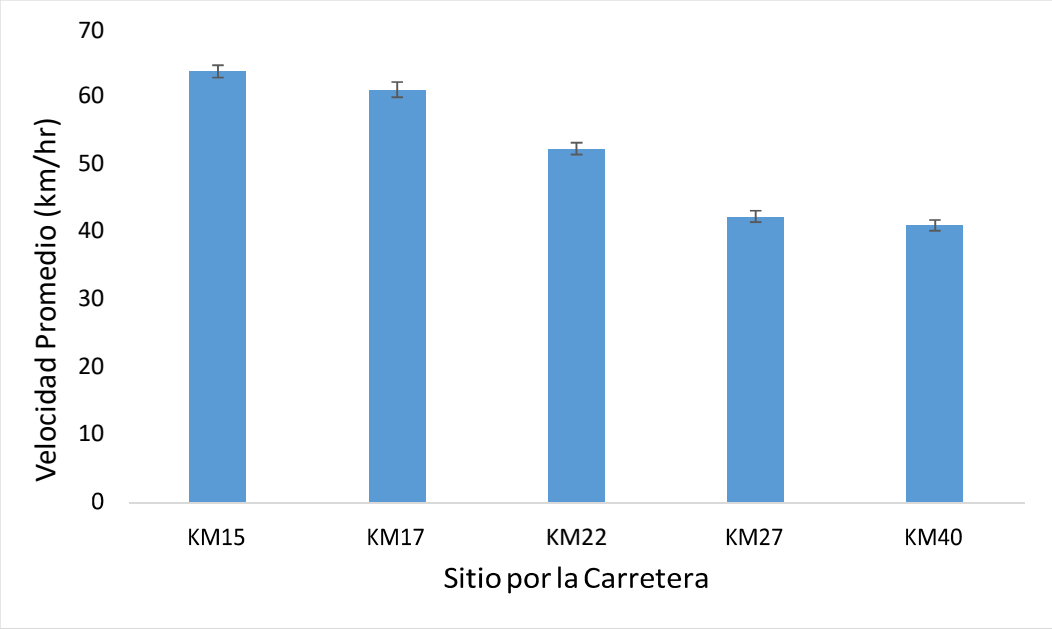

Figura 3: Velocidad promedio de vehículos por cada sitio de la carretera

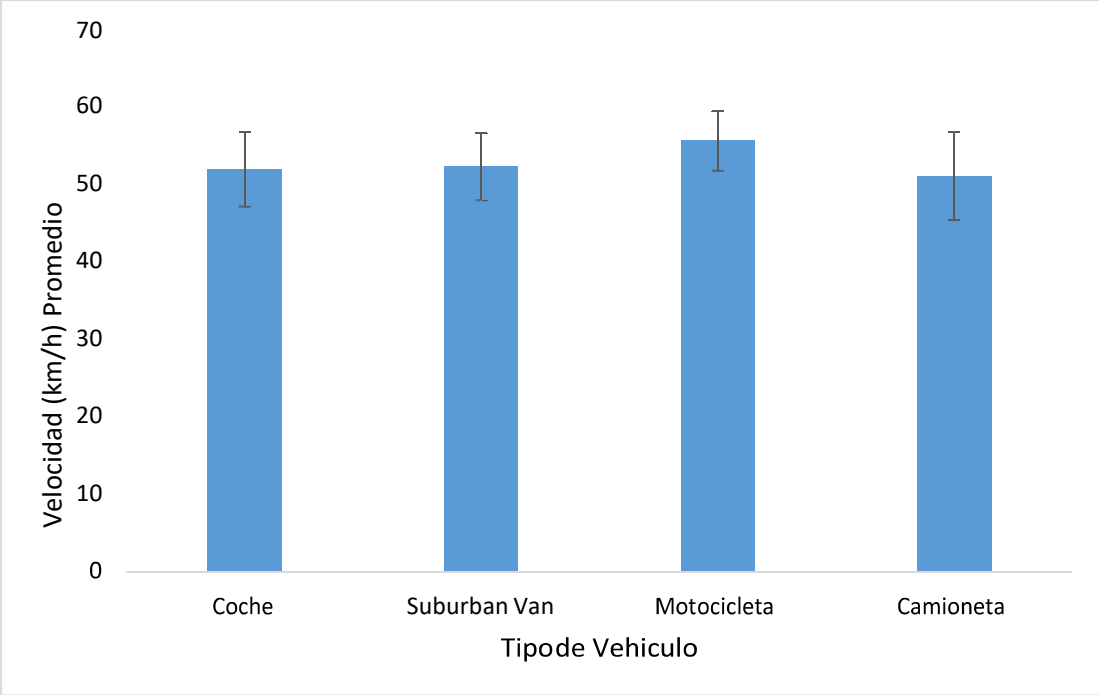

Figura 4: Velocidad promedio de diferentes tipos de vehículos registrado por la carretera

En el caso de la carretera de Calakmul dentro de los transectos realizados (dos repeticiones de cada transecto) se encontramos un total de 61 atropellamientos, 111 excretas y 182 avistamientos de individuos vivos (Imágenes 1 a 4). Por grupo de vertebrados, 201 (57%) de los encuentros corresponden al grupo de mamíferos, 71 (22%) a aves, 40 (11%) a reptiles, y 37 (10%) a anfibios.

Imagen 1. Coati (*Nasua narica*) cruzando por KM15

Imagen 2. Tayra (*Eira barbara*) cruzando por KM22

Imágenes 3 y 4. Zorros grises (*Urocyon cinereoargenteus*) y pecarí de collar (*Tayasu pecari*) por KM27

Del total de atropellamientos, los grupos más afectadas fueron los reptiles y anfibios (Figura 4). El sapo común (*Incilius valliceps*) fue la especie más afectada dentro del grupo de los anfibios (Imagen 5); en cuanto al grupo de reptiles, las serpientes son las más afectadas, identificando un total de 7 especies atropellados con la especie más frecuente atropellado el "indigo snake" (*Drymarchon corias*: Imagen 6), que es una especie diurna y grande que le gusta solearse por la carretera durante el día. Para los mamíferos solo se tiene documentado la presencia de murciélagos.

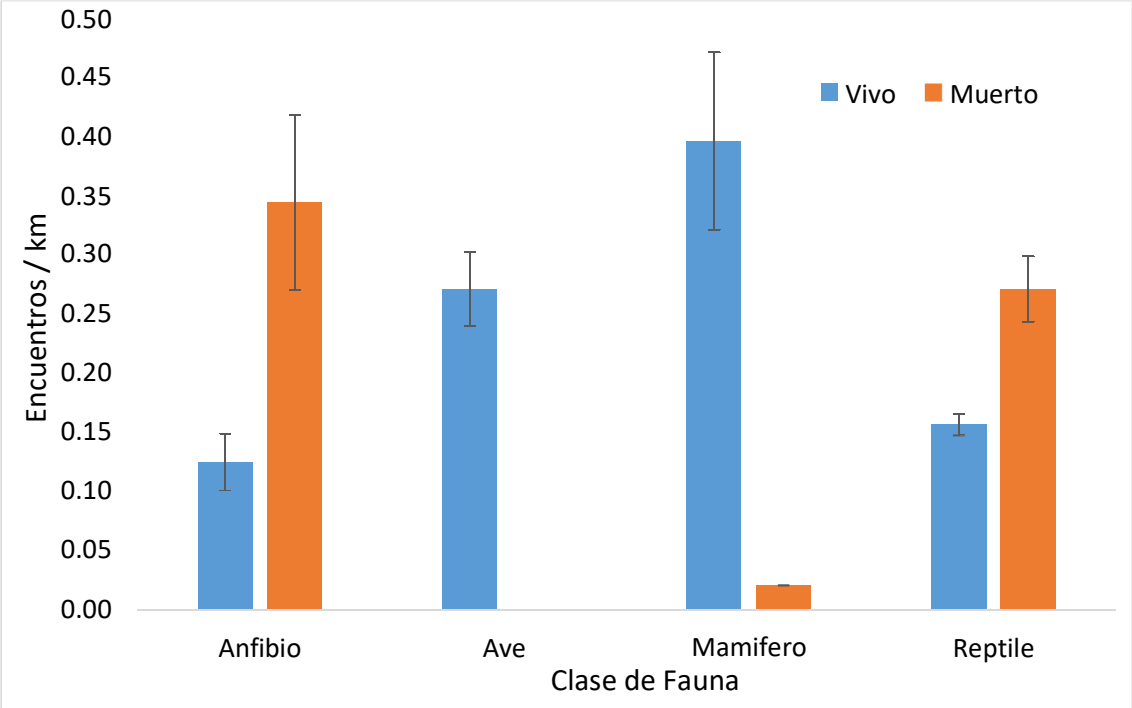

Figura 4: Encuentros promedio de fauna encontrado por la carretera

Imagen 5: Sapo atropellado (*Incillus valiceps*)

Imagen 6: Serpiente atropellada (*Drymarchon corias*)

La frecuencia relativa (número de encuentros por km caminada) de anfibios y reptiles atropelladas disminuyó con el avanza de la carretera (Figura 5). Para determinar si la diferencia en la frecuencia de atropellamientos fue por cambios en la abundancia de anfibios y reptiles atreves del sitio o fue por cambios de la velocidad de vehículos fue necesario calcular la proporción vivo y atropellado de todos los encuentros de reptiles y anfibios de cada sitio (Figura 6). Aunque la numero de encuentros de herpetofauna fue relativamente constante atreves de los sitios por la carretera, hubo una diferencia significativa en el porcentaje de encuentros de herpetofauna muerto atreves de los sitios ($F_{(4, 789)}$= 94.16, p =0.002), y el porcentaje de encuentros muertos fue más alto por los sitios de la carretera asociada con mas alta velocidad de vehículos (km15 y km17: Tukey Post-Hoc Test p<0.001). Hubo una correlación significativa entre el porcentaje de herpetofauna atropellados y la velocidad promedio de vehículos por cada sitio en la carretera (R^2 = 0.969, N = 5, p<0.001).

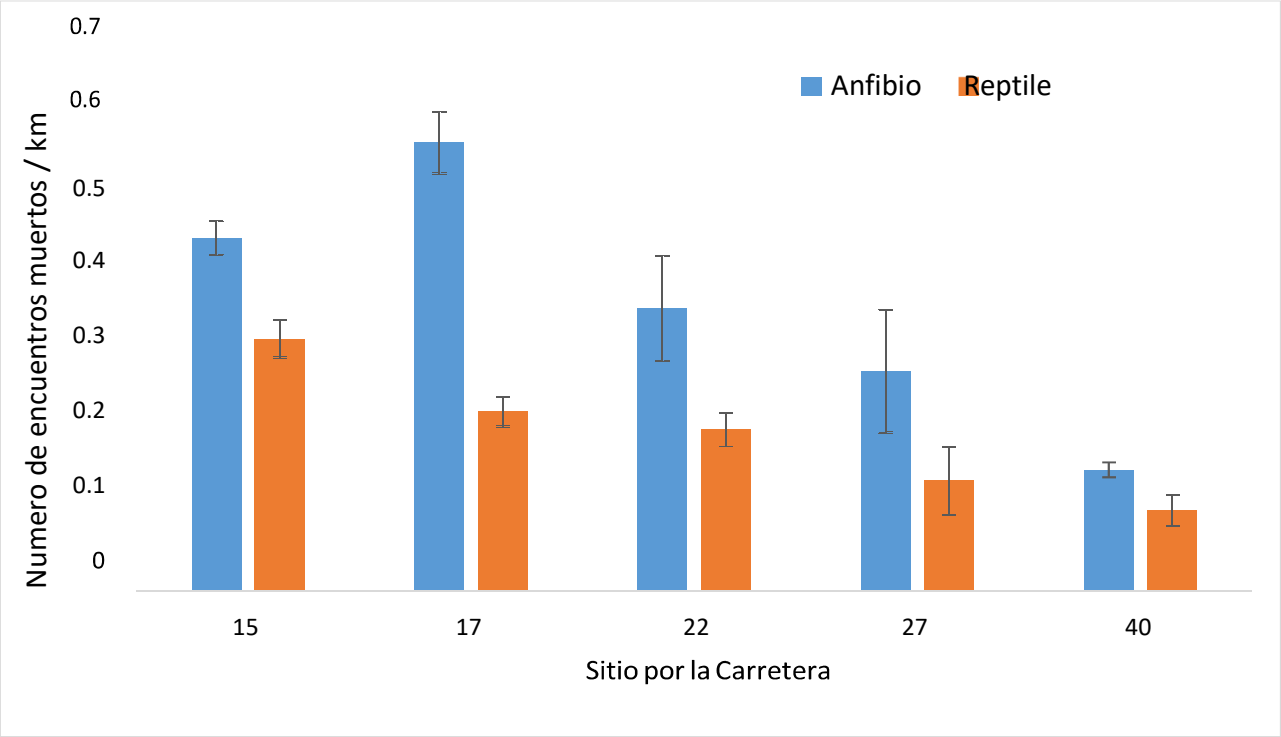

Figura 5: Encuentros promedios de reptiles y anfibios muertos por cada sitio en la carretera

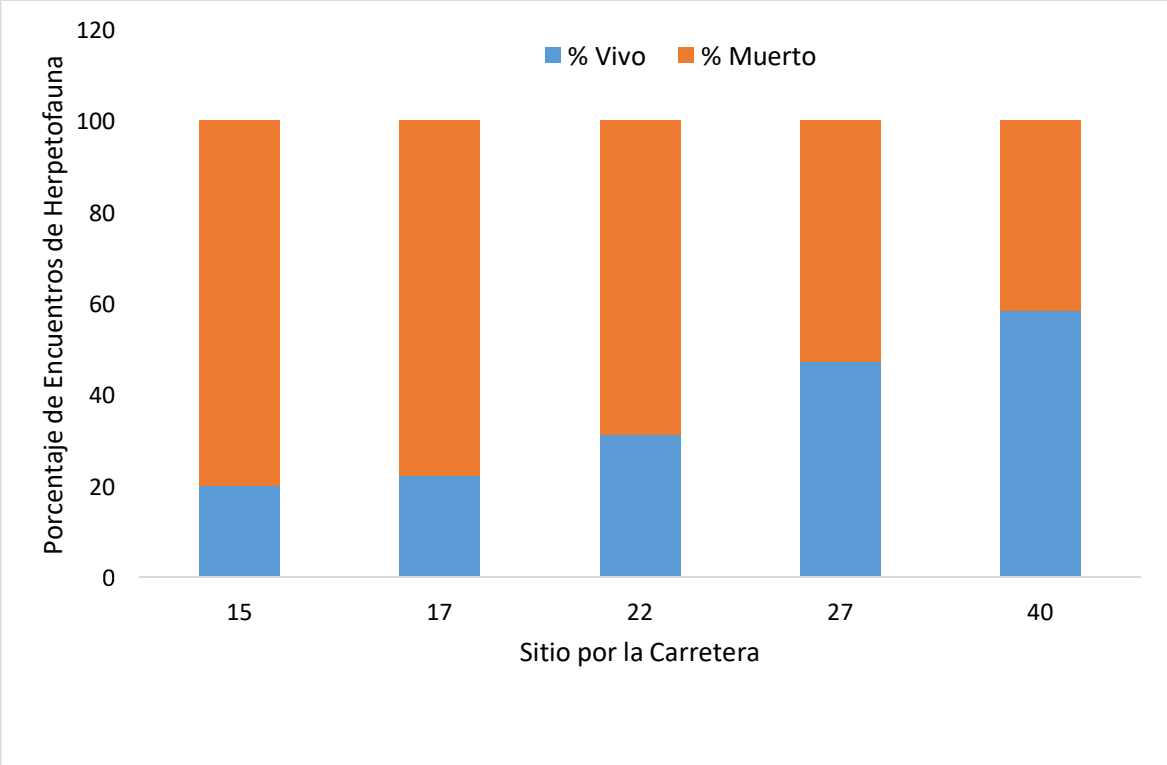

Figura 6: Porcentaje de Herpetofauna vivos y muertos por cada sitio en la carretera

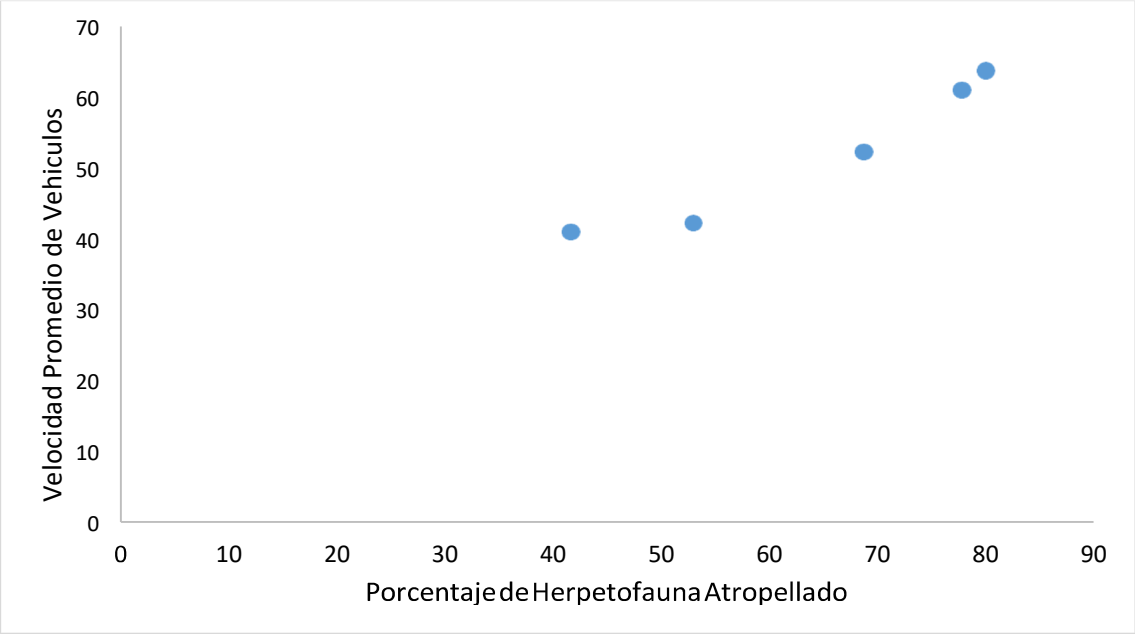

Figura 7: Correlación entre porcentaje de herpetofauna muertos y velocidad promedio de vehículos por cada sitio en la carretera

Después de 45 días consecutivas con 5 cámaras trampas puestos por la carretera en cada sitio (KM15, KM27 y KM40) hubo 244 capturas de mamíferos y 127 capturas de aves terrestres cruzando la carretera. De las capturas de mamíferos 105 de los 244 fue agutí (*Dasyprocta punctanta*) y la segunda más capturada fue el zorro gris (*Urocyon cinereoargenteus*: 55 capturas). Sin embargo, otros mamíferos grandes incluyendo puma (Imagen 7) y jaguar (Imagen 8) fueron registrados cruzando la carretera. La abundancia relativa de capturas de especies de mamífero esta presentada en Tabla 1. Con la excepción de los agutíes y zorros grises, la frecuencia relativa de capturas siempre fue más alto en KM27. De las capturas de aves, el hoco faisán (*Crax ruba*) y pavo de monte (*Meleagris ocellata*) fueron los más representados (50 y 48 registros respectivamente). La abundancia relativa de capturas de especies de ave esta presentada en Tabla 1. La frecuencia de capturas del hoco faisán fue más alto en KM27 y la frecuencia de capturas del pavo de monte fue más alto en KM40.

Tabla 1: Frecuencia relativa (número de capturas por día) de registros de mamíferos por cámaras trampas puestos en diferentes sitios por la carretera de Calakmul.

	KM15	KM27	KM40	Total
Dasyprocta punctata	0.27	0.31	1.76	2.33
Leopardus pardalis	0.40	0.22	0.04	0.67
Leopardus wiedii	0.00	0.00	0.02	0.02
Mazama sp.	0.00	0.02	0.02	0.04
Nasua narica	0.02	0.04	0.07	0.13
Odocoileus virginianus	0.02	0.04	0.04	0.11
Panthera onca	0.07	0.11	0.04	0.22
Pecari tajacu	0.04	0.11	0.02	0.18
Puma concolor	0.00	0.16	0.00	0.16
Tapirus bairdii	0.00	0.07	0.02	0.09
Urocyon cinereoargenteus	0.20	0.42	0.56	1.18
Otro Mammifero	0.07	0.16	0.09	0.31
Total general	1.09	1.67	2.69	5.44

Tabla 2: Frecuencia relativa (número de capturas por día) de registros de aves por cámaras trampas puestos en diferentes sitios por la carretera de Calakmul.

	KM15	KM27	KM40	Total
Crax rubra	0.16	0.53	0.42	1.11
Meleagris ocellata	0.07	0.11	0.89	1.07
Ortalis vetula	0.07	0.02	0.11	0.20
Crypturellus cinnamomeus	0.02	0.04	0.00	0.07
Otra ave	0.09	0.16	0.13	0.38
Total general	0.40	0.87	1.56	2.82

Imagen 7: Puma (*Puma concolor*) cruzando la carretera enfrente de una aguada por KM27

Imagen 8: Jaguar (Panthera onca) cruzando la carretera enfrente de una aguada por KM15

Como que no fue posible monitoreo todo el 60km de carreta de Calakmul para investigar la frecuencia de cruzadas de fauna por cada tramo, usamos los datos de monitoreo de la reserva hecho por Operación Wallacea y Pronatura desde 2012 para determinar las mejores predictores de la abundancia de mamíferos. Luego será posible identificar tramos de la carretera con las características asociadas con alto abundancia de mamíferos y por cual, alto probabilidad de cruzadas de fauna. Los datos de monitoreo de mamíferos grandes terrestres indicó que la abundancia de todos los tipos de mamífero grande terrestre es más alta en la Zona Núcleo Sur de la reserve donde está ubicada 40km de la 60km de carretera de Calakmul (Figura 7). Sobre los primates, la Zona Núcleo Sur fue la segunda más importante sitio (Figura 8). La abundancia de las dos especies de primate fue más alta en Dos Naciones por la cantidad de árboles grandes de Ramón (*Brosimium aliacastrum*), pero abundancia de primates en la zona núcleo sur fue notable en comparación de Mancolona, Hormiguero y KM20.

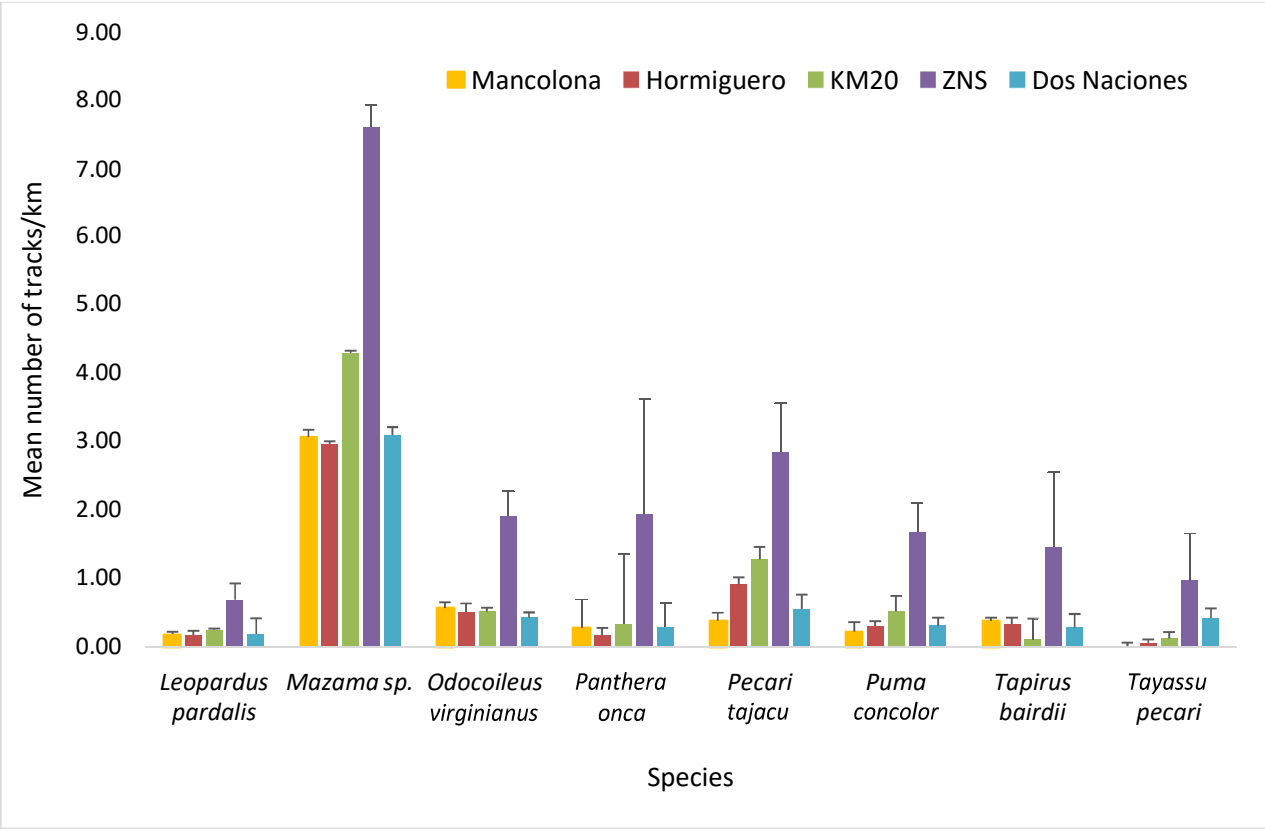

Figura 8: Abundancia relativa (números de huellas /km) de mamíferos grandes terrestres en varios sitios dentro y alrededor del CBR

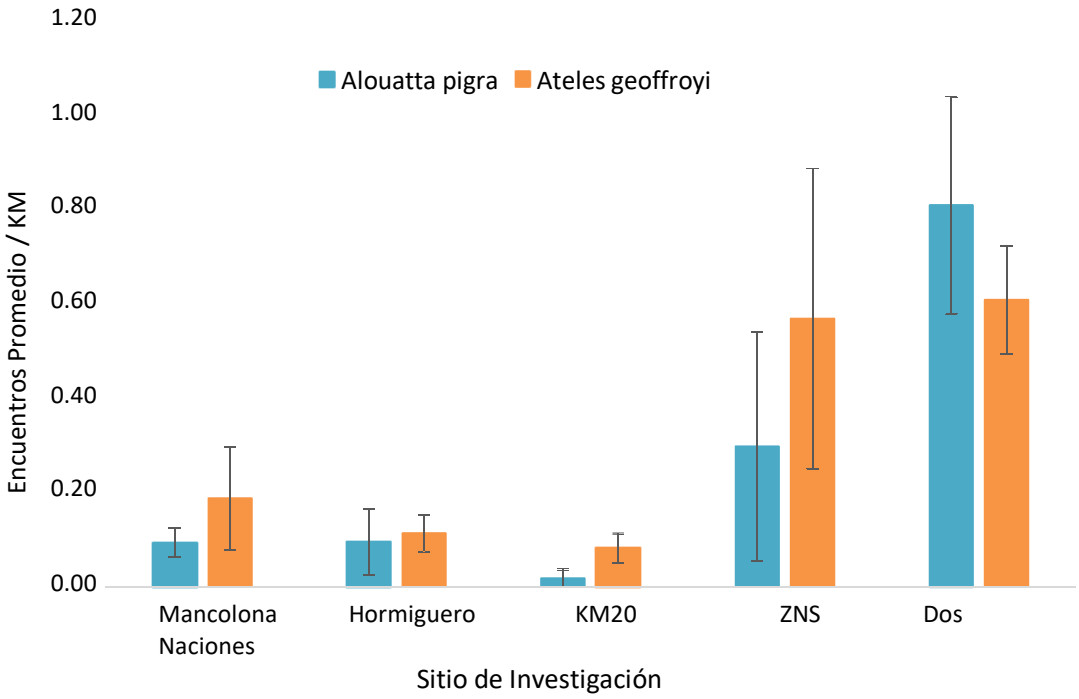

Figura 9: Abundancia relativa (números de encuentros /km) de primates en varios sitios dentro y alrededor del CBR

Cada encuentro de primate o huella de mamífero grande terrestre encontrado por los transectos fue asociado con el lote de hábitat más cercano para tener variables de hábitat que corresponde con cada registro de mamífero (Figura 9). Investigación de la abundancia de primates y mamíferos grandes terrestres en relación con las variables de hábitat fue investigado usando análisis de Generalized Linear Model (GZLM) con Aikake's Informacion Criterion (AIC) para determinar los mejores predictores de abundancia de cada especie. Para jaguar y puma los modelos incluyeron características de hábitat y la abundancia de presas preferidas (pecarí de collar, pecarí labios blancos, venadito rojo y venado cola blanca) como predictores de abundancia.

Los modelos indicaron que distancia de aguadas fue un predictor significativa para varias especies, especialmente el tapir, ocelote, venado de cola blanca y las dos especies de pecarí (Tablas 5 a 9). En consecuencia, se esperaría una mayor probabilidad de estas especies que cruzan la carretera en las zonas cercanas a las aguadas. Como que los dos mejores predictores de abundancia de jaguar fueron las dos especies de pecarí (Tabla 3), también se esperaría una mayor probabilidad de jaguares que cruzan la carretera en las zonas cercanas a las aguadas. Del mismo modo, el DAP y el área basal fueron predictores significativos de la abundancia de varias especies y por lo tanto tramos de la carretera que pasan por zonas de selva alta también son susceptibles de ser asociados con una alta frecuencia de los cruces de mamíferos. El modelo de venadito rojo contenía un nivel de error muy alto (AIC 419.805) y casi todas las variables de hábitat fueron predictores significativas de abundancia Tabla

10). De estos resultados se puede concluir que el venadito rojo utiliza una amplia gama de hábitats forestales y, por lo tanto, la probabilidad de esta especie que cruza la carretera es probable que sea constantes a través de diferentes lugares. Como que el mejor predictor de puma es la abundancia de venadito rojo (Tabla 4), también es probable que el puma cruza la carretera en varios diferentes lugares en cambio de puntos específicos como áreas cercanas de aguadas.

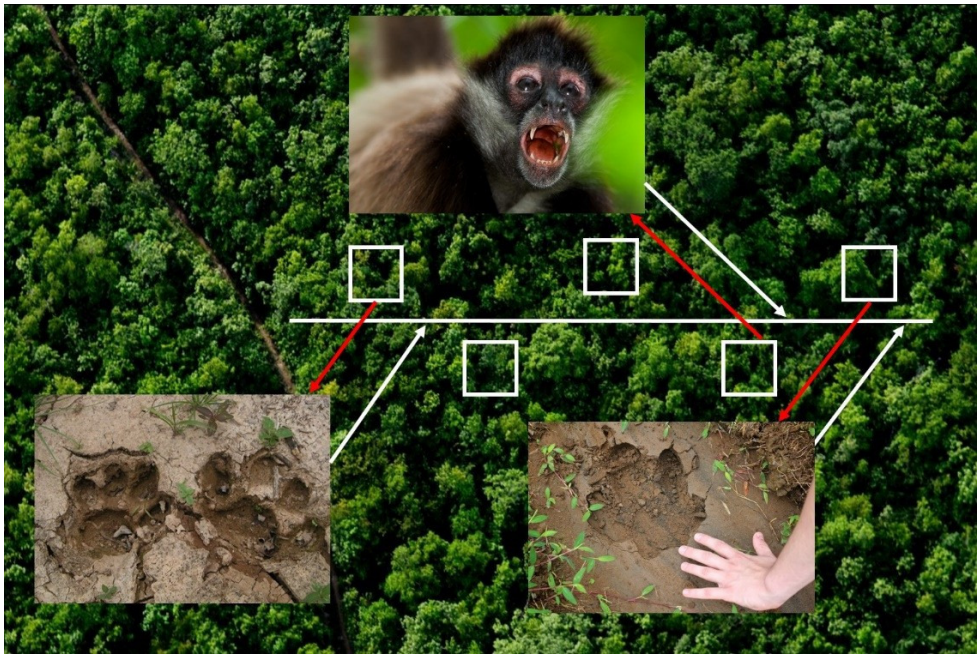

Figura 10: Recopilación de datos por transecto para vincular cada registro de mamífero (huella o encuentro) al lote de hábitat más cercano.

Tabla 3: Modelo de GZLM que indica las mejores predictores de abundancia de jaguar

	Wald Chi Square	B	Std. Error	p
Pecarí Labios Blancos	6.144	0.723	0.0865	0.003
Pecarí de Collar	5.597	0.173	0.0731	0.018
Venadito rojo	4.925	0.470	0.0211	0.026
AIC Value 77.519				

Tabla 4: Modelo de GZLM que indica las mejores predictores de abundancia de puma

	Wald Chi Square	B	Std. Error	p
Venadito Rojo	12.812	0.003	0.0155	<0.001
Área Basal	3.345	0.056	0.0017	0.067
AIC Value 100.641				

Tabla 5: Modelo de GZLM que indica las mejores predictores de abundancia de ocelote

	Wald Chi Square	B	Std. Error	p
Distancia de Aguada	9.667	-0.001	0.0004	0.002
Vegetación Bajo Dosel	8.389	-0.026	0.0091	0.004
AIC Value 79.562				

Tabla 6: Modelo de GZLM que indica las mejores predictores de abundancia de tapir

	Wald Chi Square	B	Std. Error	p
Distancia de Aguada	12.024	-0.001	0.0002	0.001
Área basal	7.956	0.009	0.0033	0.005
Arboles Jóvenes	2.684	-0.008	0.0048	0.101
DAP	1.664	-0.016	0.0002	0.197
Arboles Grandes	0.597	-0.260	0.1912	0.440
AIC 89.368				

Tabla 7: Modelo de GZLM que indica las mejores predictores de abundancia de pecari de collar

	Wald Chi Square	B	Std. Error	p
Distancia de Aguada	25.198	-0.001	0.000	0.000
Vegetación Bajo Dosel	12.317	-0.128	0.0053	0.000
Área basal	2.891	-0.016	0.0002	0.089
AIC 136.014				

Tabla 8: Modelo de GZLM que indica las mejores predictores de abundancia de pecari de labios blancos

	Wald Chi Square	B	Std. Error	p
Distancia de Aguada	8.763	-0.001	0.0004	0.003
AIC 73.892				

Tabla 9: Modelo de GZLM que indica las mejores predictores de abundancia de venado de cola blanca

	Wald Chi Square	B	Std. Error	p
Área Basal	30.795	0.010	0.0019	<0.001
DAP	13.014	-0.358	0.0993	<0.001
Distancia de Aguada	11.759	-0.001	0.0002	0.001
AIC 172.008				

Tabla 10: Modelo de GZLM que indica las mejores predictores de abundancia de venadito rojo

	Wald Chi Square	B	Std. Error	p
Área Basal	49.206	0.007	0.0010	<0.001
DAP	36.506	-0.334	0.0553	<0.001
Distancia de Aguada	21.177	0.000	0.0001	<0.001
Vegetación Bajo Dosel	14.929	-0.009	0.0024	<0.001
Arboles Grandes	8.379	0.127	0.0439	<0.001
Arboles Jóvenes	3.995	-0.001	0.0007	0.047
Riqueza de Especies	3.400	0.024	0.0130	0.065
Hojarasca	2.516	0.007	0.0044	0.113
AIC 419.805				

Para las modelos de GZLM de las dos especies de primate, solo incluimos variables relevantes para especies arborícolas y quitamos los variables de hojarasca y arboles jóvenes de la base de datos. El modelo del mono aullador indicó que el DAP promedio, cantidad de árboles grandes (con DAP >30cm) y total área basal fueron predictores significativas de abundancia (Tabla 11). El modelo del mono araña manifiesta que, como el mono aullador, el DAP promedio, cantidad de árboles grandes (con DAP >30cm) y total área basal fueron predictores significativas de abundancia (Tabla 12) indicando que los dos especies prefieren selva mediana y alta. En adición, distancia de aguada también fue un predictor significativa de abundancia de mono araña, más probable por las arboles grandes frutales de familia Morácea que se encuentra alrededor de las aguadas.

Tabla 11: Modelo de GZLM que indica las mejores predictores de abundancia de mono aullador

	Wald Chi Square	B	Std. Error	p
DAP	19.242	0.351	0.0801	<0.001
Arboles Grandes	5.923	0.157	0.0645	0.015
Área Basal	4.293	-0.007	0.0034	0.038
AIC 218.072				

Tabla 12: Modelo de GZLM que indica las mejores predictores de abundancia de mono araña

	Wald Chi Square	B	Std. Error	p
DAP	14.086	0.249	0.0663	<0.001
Arboles Grandes	6.737	0.138	0.0530	0.009
Distancia de Aguada	5.902	0.000	0.0001	0.015
Área Basal	4.587	-0.006	0.0027	0.032
AIC 271.397				

Una de las aguadas más grandes de Calakmul está ubicado por Km27 de la carretera. Alrededor de la aguada hay selva alta y mediana donde reside dos tropas de mono aullador y una tropa grande de mono araña de ~40 individuos. Los movimientos y comportamiento de esta tropa han sido estudio desde 2013 y su el mapa del rango de su territorio (hecho por 95% y 50% KDE en ArcGIS) indica que la zona núcleo de su territorio está pegado con la carretera y su territorio entero incluye ambos lados de la carretera (Figura 11). Observaciones de los monos ha indicado que cruzan la carretera a 5.32 veces por día sin bajar al suelo y que cruzan por varios sitios entre Km26 y Km28 porque hay cubierta forestal continua que se extiende sobre la carretera a lo largo de esta sección de la carretera. En adición, observaciones del comportamiento de los monos indican que dependen en gran medida del bosque de alta y media situada alrededor de la aguada, al lado de la carretera, ya que utilizan este bosque para alimentarse y descansar y solo utilizar la selva baja en el área como rutas de viaje (Figura 12).

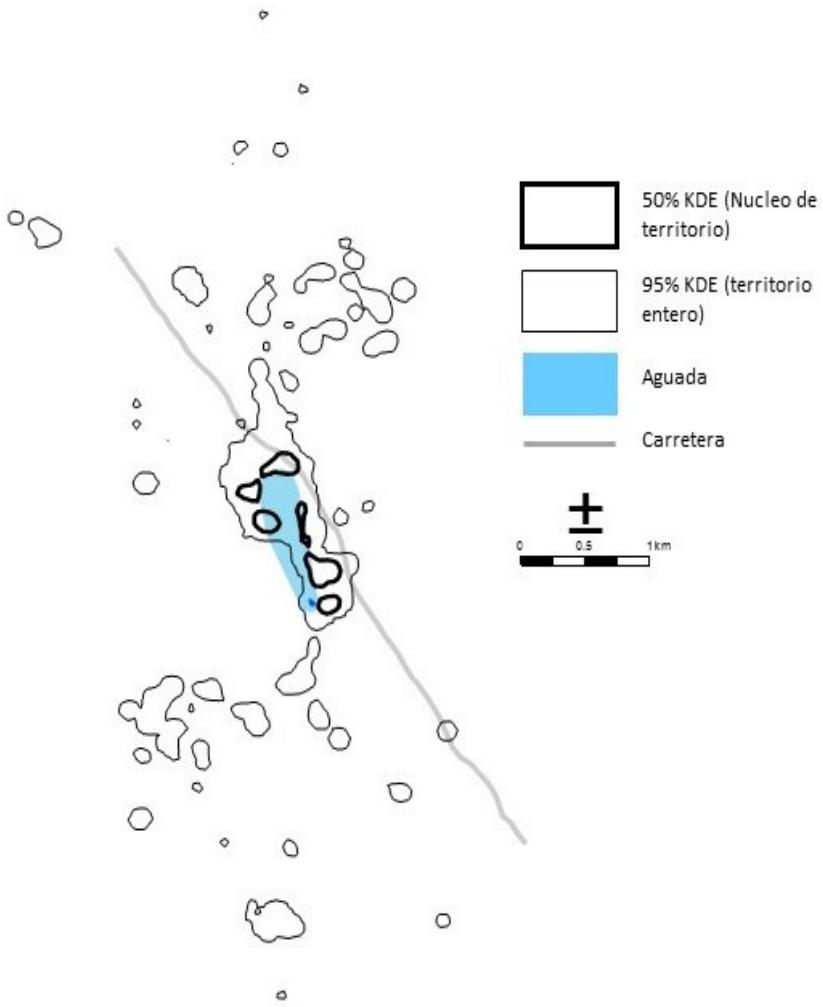

Figura 11: Mapa de territorio de la tropa de mono araña que reside en KM27, en CBR

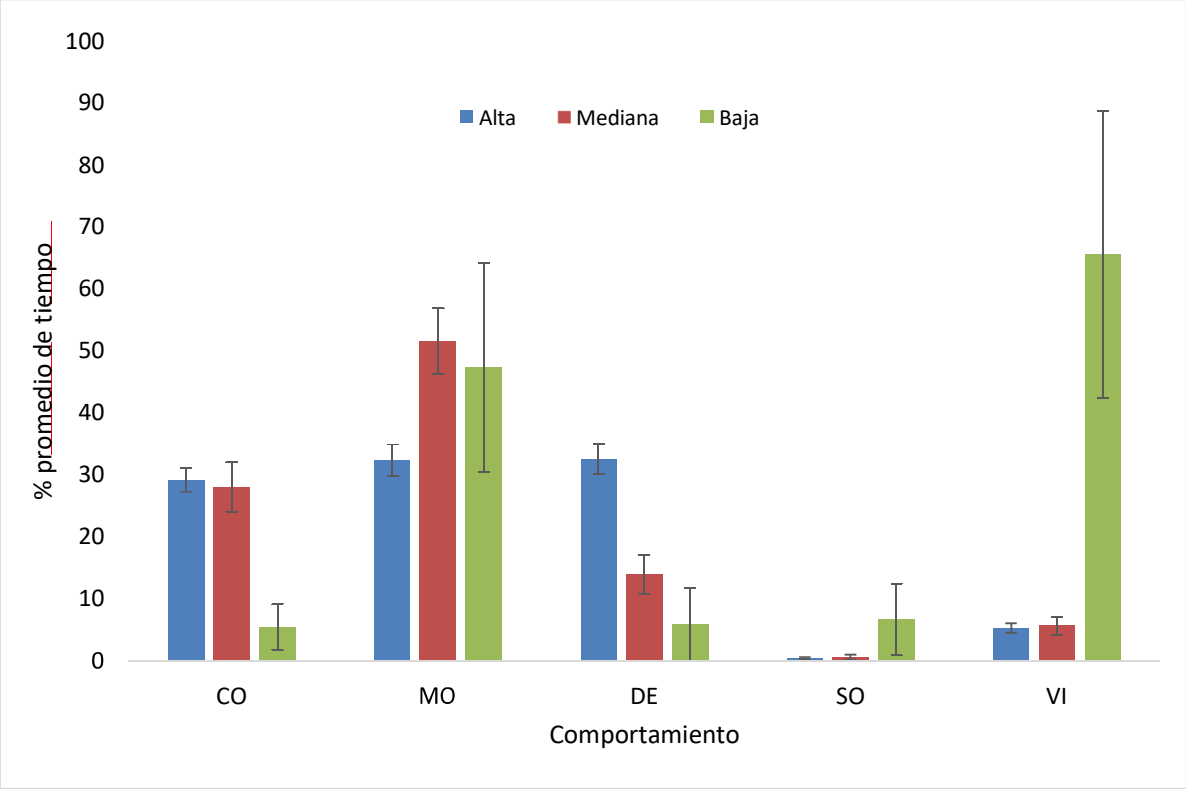

Figura 12: Porcentaje de tiempo que los monos arañas pasaron en varias actividades por diferentes tipos de bosque en su territorio por KM27.

Como esta mencionada antes en este informe, no fue posible monitoreo todo el 60km de carreta de Calakmul para investigar la frecuencia de cruzadas de fauna por cada tramo. Por cual, usamos los datos de monitoreo de la reserva hecho por Operación Wallacea y Pronatura desde 2012 para determinar las mejores predictores de la abundancia de reptiles y anfibios. Luego será posible identificar tramos de la carretera con las características asociadas con alto abundancia de herpetofauna y por cual, alto probabilidad de cruzadas de fauna y atropellamientos. Los datos de monitoreo de herpetofauna indicó que la abundancia de reptiles y anfibios son más altos Dos Naciones, pero la segunda más importante lugar fue la Zona Núcleo Sur de la reserve donde está ubicada 40km de la 60km de carretera de Calakmul (Figuras 13 y 14).

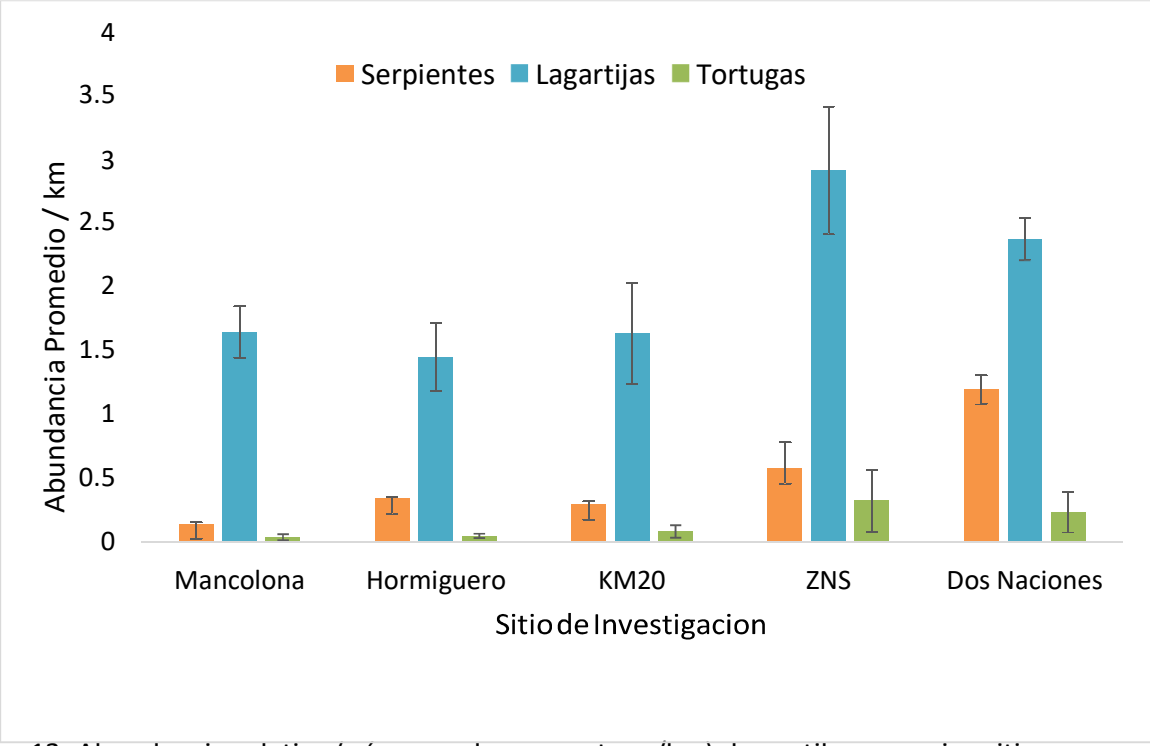

Figura 13: Abundancia relativa (números de encuentros /km) de reptiles en varios sitios dentro y alrededor del CBR

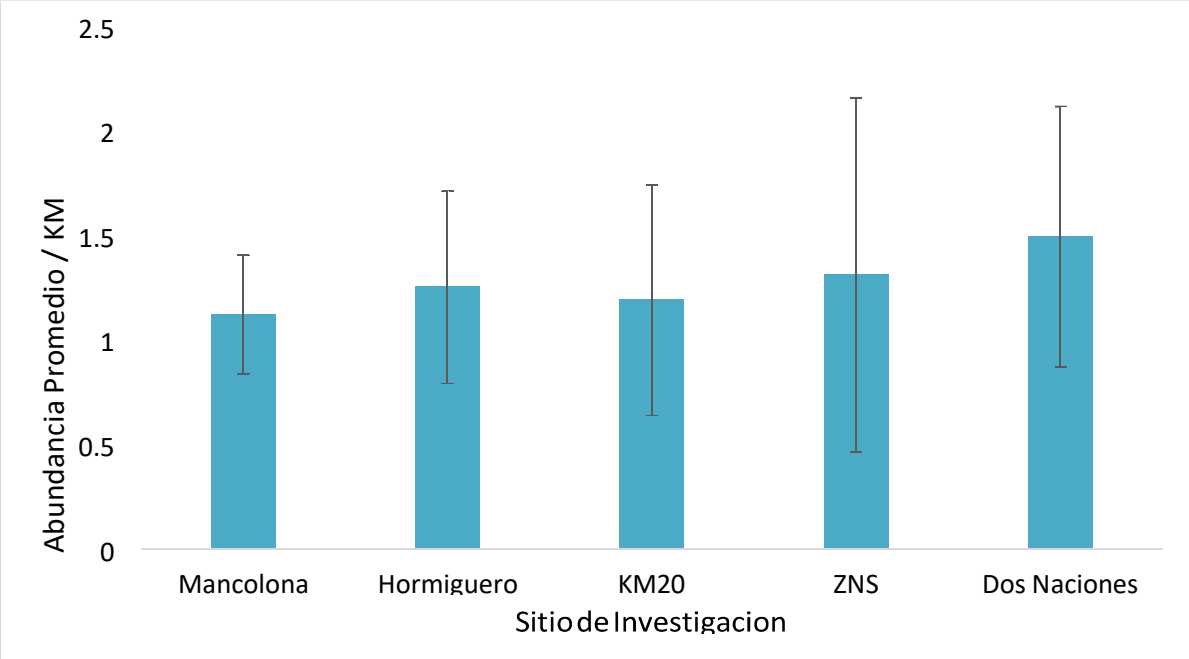

Figura 14: Abundancia relativa (números de encuentros /km) de anfibios en varios sitios dentro y alrededor del CBR

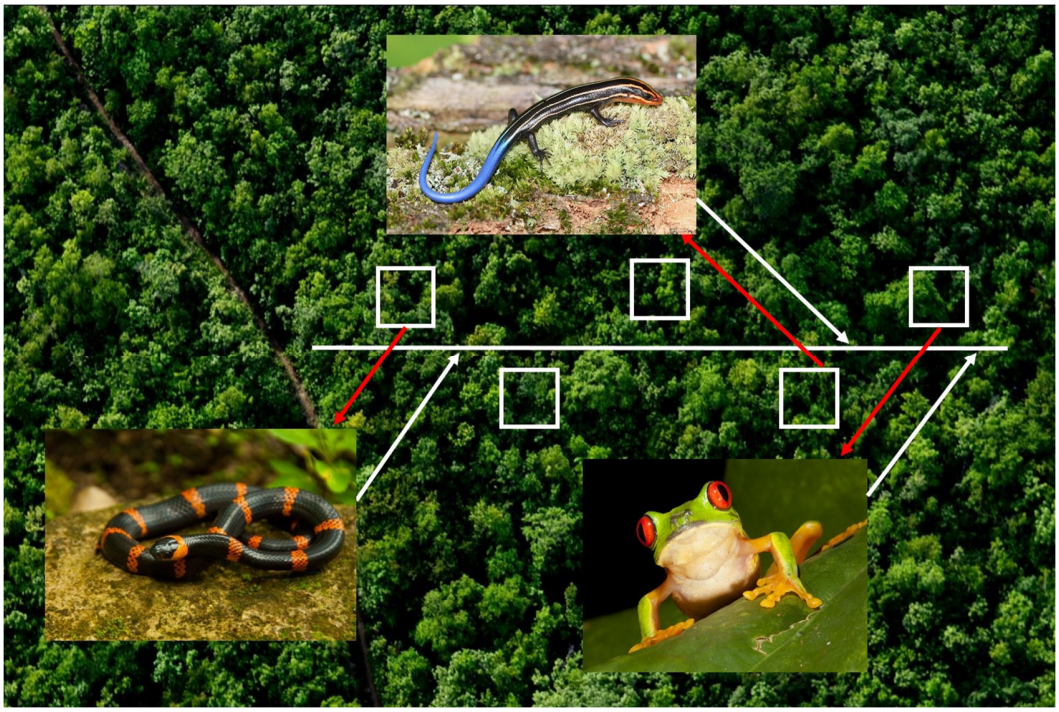

Figura 15: Recopilación de datos por transecto para vincular cada registro de herpetofauna al lote de hábitat más cercano

El modelo de GZLM de reptiles contenía un nivel de error muy alto (AIC 625.623: Tabla 10), indicando que las variables incluido en el modelo no fueron muy importantes para reptiles y, por lo tanto, no es posible determinar la probabilidad que cruza la carretera basado en las características del bosque por la orea de la carretera. Se encontró el mismo patrón de resultados para los anfibios que hubo muy alto error en el modelo (AIC 588.881: Tabla 14). Sin embargo, parece que distancia de aguada hubo un predictor importante para la abundancia de anfibios

Tabla 13: Modelo de GZLM que indica las mejores predictores de abundancia de reptiles

	Wald Chi Square	B	Std. Error	p
Hojarasca	21.317	0.015	0.0033	<0.0001
Vegetación bajo dosel	7.876	-0.004	0.0016	0.005
DAP	6.953	-0.072	0.0273	0.008
Distancia de Aguada	5.626	0.000	0.0005	0.018
Arboles jóvenes	4.844	-0.001	0.0006	0.028
AIC 625.623				

Tabla 14: Modelo de GZLM que indica las mejores predictores de abundancia de anfibios

	Wald Chi Square	B	Std. Error	p
Distancia de Aguada	19.719	0.000	0.0001	<0.001
Vegetación bajo dosel	12.717	0.006	0.0018	<0.001
DAP	10.101	0.121	0.0380	0.001
Riqueza de especies	4.118	-0.036	0.0175	0.042
Área Basal	3.603	-0.003	0.0015	0.058
AIC 588.881				

CONSIDERACIONES FINALES Y RECOMENDACIONES

Si bien este estudio abarca solo un pequeño porcentaje de la carretera, nos abre una ventana hacia la realidad de lo que sucede en la reserva. Desgraciadamente, casi ninguno de los vehículos registrados en este estudio respetó el máximo velocidad de la carretera y hubo 61 atropellamientos registrados en este corto estudio de pocos sitios por la carretera lo que sugiere que atropellamientos por la carretera de Calakmul ya es un problema notable. Considerando que investigamos un total de cinco sitios y caminamos tramos de 4km en cada sitio, con dos repeticiones de cada transecto, el esfuerzo del estudio de transectos por la carretera fue 40km en total. Hubo 61 atropellamientos en 40km caminados que será 1.525 atropellamientos de fauna por cada km de la carretera o 91.5 atropellamientos a lo largo del 60km de la carretera.

Considerando que después de 3 días, no se puede identificar atropellamientos porque están demasiado degradados, podemos concluir que cada atropellamiento que registramos fue hecho dentro de tres días antes de la fecha del registro. Por cual, cada transecto por la carretera registra atropellamientos de tres días de vehículos usando la carretera. Hubo dos diferentes repeticiones de cada transecto entonces registramos atropellamientos de 6 días de vehículos usando la carretera. En 53 días de investigación, registramos 792 vehículos usando la carretera que será 14.94 vehículos por día, 44.83 vehículos cada tres días y 89.64 cada 6 días. Por cual, podemos estimar que hubo 1.02 atropellamientos de fauna por cada vehículo usando la carretera (91.5 atropellamientos a lo largo de la carretera / 89.64 vehículos).

Esta estimada de 1.02 atropellamientos de fauna por cada vehículo usando la carretera está basada en vehículos de cuatro llantas (porque la gran mayoría de vehículos registrados fueron coches). Si se permite acceso de vehículos de doble rodada había dos veces más llantas usando la carretera entonces será doble probabilidad de atropellamientos de fauna (2.04 atropellamientos de fauna por cada vehículo con doble rodada).

Observaciones de los monos han indicado que cruzan la carretera a 5.32 veces por día sin bajar al suelo porque hay cubierta forestal continua que se extiende sobre la carretera a lo largo de la gran mayoría la carretera desde km20 a km60. El primero 20km de la carretera está más ancho entonces no hay cubierta forestal continua por este tramo de la carretera. Por cual, no es recomendable que se permite acceso a vehículos altos desde KM20 hasta KM60 de la carretera para prevenir perturbación del dosel del bosque y la fauna que contiene, y también para prevenir daños a los vehículos.

Como que los vehículos fueron más rápidos por los tramos de la carretera más anchas y hubo una correlación significativa entre velocidad pro medio y el porcentaje de encuentros que fueron atropellamientos, es muy probable que el problema pone peor si amplia el resto de la carretera. Los atropellamientos documentados para este estudio han sido sobre especies pequeñas y poco carismáticas, por lo que muy poca gente se preocupa realmente por la situación, sin darse cuenta que puede desencadenar otros efectos en toda la cadena trófica y el dinamismo del ecosistema. Sin embargo, existen reportes en el estado de Campeche de accidentes que han implicado la muerte de individuos de tapir centroamericano (*Tapirus bairdii*), una especie en peligro de extinción de acuerdo con la Norma Oficial Mexicana para la Protección Ambiental de Especies Nativas de Flora y Fauna Silvestre (NOM-059). Si bien dentro del periodo de toma de datos no se registraron muertes de mamíferos grandes, datos de cámaras trampas indicaron que mamíferos grandes terrestres cruzan la carretera con frecuencia entonces es muy probable que existan atropellamientos de mamíferos grandes y aumenten con la entrada de más automóviles.

Algunos parques en Estados Unidos de América reconocen el impacto que tiene el tránsito de los vehículos en la fauna y han implementado medidas para mitigarlo, tal es el caso de Denali National Park and Preserve (formalmente Mt. McKinley National Park) que desde 1972 ha restringido el paso de varios tipos de vehículos (Burson *et al*., 2000). Tal medida debería tomarse en cuenta ya que actualmente la totalidad de los automóviles particulares tienen autorizado ingresar a la reserva. Una forma podría ser algo similar al 'hoy no circula' basado en el tipo de vehículos, y restringir el paso de vehículos grandes ya que el impacto es mucho mayor hablando tanto de colisiones con fauna silvestre como contaminación auditiva y de partículas al aire. Sin embargo, solo controlando la cantidad de vehículos que entra la reserva no soluciona el problema que la gran mayoría de los vehículos registrados en este estudio, rebasó el máximo velocidad de 30km/hr.

El actual límite de velocidad en la carretera Calakmul es de 30 km por hora, que pueden sentirse tan lento durante la conducción que esto puede ser parte de la razón por la que los turistas no respetan el límite de velocidad. Por los tramos de la carretera más angostos, turistas manejaban una velocidad promedio de 40 km/hr y atropellamientos de fauna fueron notable menos abundante en comparación de los tramos de carretera más ancho donde la velocidad promedio fue entre 60-80km/hr. Como que 40km/hr es la velocidad máxima para conducir en zonas urbanas es una velocidad que las personas se sienten cómodos en la conducción, entonces lo que es posible que más personas se adhieran a la velocidad límite de la velocidad máxima se incrementa a 40/hr. Sin embargo, en Mexico es evidente que las señalizaciones muchas veces son de limitada utilidad ya que es conocida la carencia de cultura vial que la mayor parte de la gente tiene. A pesar de la existencia de

letreros que marcan el límite de velocidad, son muy poco tomados en cuenta. Por consiguiente, para minimizar velocidad de vehículos a lo largo de la carretera se puede utilizar señalación que indica la velocidad actual de cada vehículo que pasa (Imagen 9) y reductores de velocidad (Imagen 10).

Imagen 9: Señalación de velocidad

Imagen 10: Reductor de velocidad

Como que características de selva alta y distancia de aguadas son los predictores más significativas para la abundancia de mamíferos grandes terrestres y primates, es recomendable situar los topes y señalación de velocidad por los tramos de la carretera que coincida con selva alta y aguadas. Por cuestión de herpetofauna es más difícil prevenir atropellamientos porque los modelos de abundancia indica que herpetofauna, especialmente reptiles, utilizan una amplia gama de hábitats forestales y, por lo tanto, la probabilidad que cruza la carretera es probable que sea constantes a través de diferentes lugares. Por cual, no se puede ampliar la carretera y es necesario usar reductores de velocidad y señalación de velocidad por lo largo de la carretera. En adición, hay varias estrategias para minimizar los daños a fauna hecho por el tráfico de la carretera. Algunas de las medidas implementadas en otras carreteras que sirven de cruce de fauna y pueden utilizarse dentro de la RBC son pasos subterráneos. En la RBC ya existen pasos subterráneos, en donde se pueden ver evidencias como huellas, encuentros y capturas por cámaras trampa colocadas en esos cruces, de que efectivamente están siendo utilizados por la fauna.

Imagen 11: Paso subterráneo en km 22 Imagen 12: Ejemplo de señalizaciones de cruce de fauna

También, la utilización de otro tipo de señalización que advierta el cruce de fauna (Imagen 12), sumado a una estrategia de educación o comunicación ambiental podría ser más funcional para la reducción de velocidad por parte de los automovilistas y una mayor conciencia y respeto hacia la vida silvestre. Un aspecto importante que debe acompañar a todas las medidas que se deseen implementar es el interés de las personas por el cuidado de la reserva y la biodiversidad que en ella se encuentra, lo cual se puede lograr a través de la educación ambiental. Se reconoce que ésta debe estar enfocada a la situación de la reserva y sus características específicas. Por lo tanto, una propuesta para lograr esta concientización, que puede además contribuir a la reducción de la velocidad y a un mayor conocimiento de la fauna existente en la reserva, sería la entrega de fichas de información de las especies más características y con mayor posibilidad de ser vistas durante el trayecto hacia las ruinas en conjunto con una 'hoja de datos', en donde los visitantes puedan documentar las especies que encuentren. De esta manera se espera que los turistas se sientan involucrados con la reserva y además proporcionaran la entrada constante de datos que pueden ser importantes para futuros estudios.

Señalizaciones de cruce de fauna puede funcionar muy bien por Km27 donde los monos cruzan la carretera varias veces al día y pasan mucho tiempo en los arboles por la orea de la carretera donde se puede observarlos y sacar fotos. Como el territorio de la tropa de mono araña por m27 incluye ambos lados de la carretera, ampliación de la carretera dividiría su territorio por la mitad e impedir el acceso a los recursos importantes. Sin embargo, si el camino sigue siendo lo que es y los turistas se alteran a la alta probabilidad de ver monos entonces ellos son naturalmente propensos a reducir la velocidad de su vehículo o parar completamente para aprovechar de la observación de la fauna.

En conclusión, la búsqueda de un incremento en el flujo turístico a través de la ampliación de la carretera o el aumento de infraestructura, no debe ser el único objetivo para la zona, ya que, a pesar de los beneficios económicos que pueda traer, también representa un impacto negativo en el

ecosistema, principalmente en la fauna. Como que CBR es un patrimonial mixto de UNESCO, la naturaleza y biodiversidad tienen lo mismo importancia de los sitios arqueológicos, la carretera y fauna que lo utiliza debe ser parte de la atracción de la reserva y no solamente una ruta de acceso a las ruinas. Con una combinación de educación ambiental y señalizaciones de velocidad de cada vehículo y de cruce de fauna se puede mantener una carretera que es atractiva para turistas para observaciones de fauna durante su viaje al sitio arqueológico y por cual la carretera se convierte en parte de la experiencia turística.

REFERENCIAS

Arroyave, M.P, C. Gómez, M.E. Gutiérrez, D.P. Múnera, P.A. Zapata, I.C. Vergara, L.M. Andrade y Ramos. K. 2006. Impacto de las carreteras sobre la fauna silvestre y sus principales medidas de manejo, *Revisa EIA* 5: 45-57.

Burson, J.L. Belant, Fortier, Tomkiewicz 2000. The effect of vehicle traffic on wildlife in Denali National Park. *Arctic* 53(2): 146–15.

Chaves, O.M., Stoner, K.E. Arroyo-Rodriguez, V. 2012. Differences in diet between spider monkey groups living in forest fragments and continuous forest in Mexico. *Biotropica* 44: 105–113

Colchero, F., Conde, D.A., Manterola, C., Chavez, C., Rivera, A, & Ceballos, G. 2011. Jaguars on the move: modeling movement to mitigate fragmentation from road expansion in the Mayan forest. *Animal Conservation* 14: 158–166.

CONANP 1999. *Programa De Manejo Reserva De La Biosfera Calakmul*. CONANP: México.

Fahrig, L. and Rytwinski, T. 2009. Effects of roads on animal abundance: an empirical review and synthesis. *Ecology & Society* 14(1): 21.

Forster, R.J., Harmsen, B.J., & Doncaster, P.C. 2010. Habitat use by sympatric jaguars and pumas across a gradient of human disturbance in Belize. *Biotropica* 42: 724-731.

Goosem, M. 2001. Effects of tropical rainforest roads on small mammals: inhibition of crossing movements. *Wildlife Research* 28(4): 351 – 364.

Harmsen, B.J., Foster, R.J., Silver, S., Ostro, L. and Doncaster, C.P., 2010. Differential Use of Trails by Forest Mammals and the Implications for Camera-Trap Studies: A Case Study from Belize. *Biotropica*, *42*(1), pp.126-133.

Huijser, A. Kociolek, P. McGowen, A. Hardy, A.P. Clevenger and R. Ament. 2007. *Wildlife-Vehicle Collision and Crossing Mitigation Measures: a Toolbox for the Montana Department of*

Transportation. Western Transportation Institute College of Engineering: Montana State University.

Jaeger, J. A, Bowman, J., Brennan, J., Fahrig, L., Bert, D., Bouchard, J., Charbonneau, N., Frank, K., Gruber, B. and Toschanowitz, K. T. 2005. Predicting when animal populations are at risk from roads: an interactive model of road avoidance behaviour. *Ecological Modelling* 185: 329 – 348.

Laurance, S. G., Stouffer, P. C. and Laurance, W. F. 2004. Effects of road clearings on movement patterns of understorey rainforest birds in central Amazonia. *Conservation Biology* 18: 1099 – 1109.

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

Suazo-Ortuño, I., Alvarado-Diaz, J. & Martinez-Ramos, M. 2008. Effects of conversion of dry tropical forest to agricultural mosaic on herpetofaunal assemblages. *Conservation Biology* 22: 362-374.

Taylor, B. D. and Goldingay, R. L. 2010. Roads and wildlife: impacts, mitigation and implications for wildlife management in Australia. *Wildlife Research* 37: 320 – 331.

van Langervelde, F. and Jaarsma, C. F. 2004. Using traffic flow theory to model traffic mortality in mammals. *Landscape Ecology* 19: 895 – 907.