



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

POSGRADO EN CIENCIAS BIOLÓGICAS

FACULTAD DE CIENCIAS BIOLÓGICAS

ECOLOGÍA

FACTORES GEOGRÁFICOS ASOCIADOS AL OFIDISMO EN MÉXICO

TESIS

QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:

MAESTRO(A) EN CIENCIAS BIOLÓGICAS

PRESENTA:

RANGEL CAMACHO RODRIGO SALVADOR

TUTOR(A) PRINCIPAL DE TESIS: DOCTOR, CARLOS ALBERTO YÁÑEZ ARENAS
FACULTAD DE CIENCIAS

COMITÉ TUTOR: DOCTOR, OCTAVIO RAFAEL ROJAS SOTO
INSTITUTO NACIONAL DE ECOLOGÍA

COMITÉ TUTOR: DOCTOR, RODOLFO RIOJA NIETO
FACULTAD DE CIENCIAS

CIUDAD UNIVERSITARIA, CD. MX. MAYO, 2021



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 BIOLÓGICAS

ECOLOGÍA

FACTORES GEOGRÁFICOS ASOCIADOS AL OFIDISMO EN MÉXICO

TESIS

QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:

MAESTRO(A) EN CIENCIAS BIOLÓGICAS

PRESENTA:

RANGEL CAMACHO RODRIGO SALVADOR

TUTOR(A) PRINCIPAL DE TESIS: DOCTOR, CARLOS ALBERTO YÁÑEZ ARENAS

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

COMITÉ TUTOR: DOCTOR, OCTAVIO RAFAEL ROJAS SOTO

INSTITUTO NACIONAL DE ECOLOGÍA

COMITÉ TUTOR: DOCTOR, RODOLFO RIOJA NIETO

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

CIUDAD UNIVERSITARIA, CD. MX. 2021

COORDINACIÓN DEL POSGRADO EN CIENCIAS BIOLÓGICAS

FACULTAD DE CIENCIAS

OFICIO CPCB/334/2021

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 virtual del Comité Académico del Posgrado en Ciencias Biológicas, celebrada el día **08 de febrero de 2021** se aprobó el siguiente jurado para el examen de grado de **MAESTRO EN CIENCIAS BIOLÓGICAS** en el campo de conocimiento de **ECOLOGÍA** del estudiante **RANGEL CAMACHO RODRIGO SALVADOR** con número de cuenta **310578596** con la tesis titulada **"FACTORES GEOGRÁFICOS ASOCIADOS AL OFIDISMO EN MÉXICO"**, realizada bajo la dirección del **DR. CARLOS ALBERTO YAÑEZ ARENAS**, quedando integrado de la siguiente manera:

Presidente: DR. OSCAR ALBERTO FLORES VILLELA
Vocal: DRA. LETICIA MARGARITA OCHOA OCHOA
Vocal: DR. CONSTANTINO GONZÁLEZ SALAZAR
Vocal: DR. GERARDO ANTONIO MARTÍN MUÑOZ DE COTE
Secretario: DR. OCTAVIO RAFAEL ROJAS SOTO

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

ATENTAMENTE
"POR MI RAZA HABLARÁ EL ESPÍRITU"
Cd. Universitaria, Cd. Mx., a 29 de abril de 2021

COORDINADOR DEL PROGRAMA



DR. ADOLFO GERARDO NAVARRO SIGÜENZA



COORDINACIÓN DEL POSGRADO EN CIENCIAS BIOLÓGICAS

Unidad de Posgrado, Edificio D, 1º Piso. Circuito de Posgrados, Ciudad Universitaria
Alcaldía Coyoacán. C. P. 04510 CDMX. Tel. (+5255)5623 7002 <http://pcbiol.posgrado.unam.mx/>

Agradecimientos Institucionales.

- a. Al Posgrado en Ciencias Biológicas por permitirme realizar mis estudios y brindarme todas las facilidades.
- b. Beca CONACYT con número de CVU: 919712 por financiar mis estudios.
- c. A mi Tutor principal: Dr. Carlos Alberto Yáñez Arenas y comité tutorial: Dr. Octavio Rafael Rojas Soto y Dr. Rodolfo Rioja Nieto por acompañarme en mi formación personal y académica y haberme apoyado en todo momento en el desarrollo de mi tesis.

Agradecimientos.

A mis papás a por brindarme el apoyo incondicional, los medios, alentarme a continuar siempre, ser un soporte y apoyo en tiempos difíciles. Además de confiar en mí y mis decisiones.

A mi hermano por ser una inspiración y un motivo para superarme. Además de ayudarme, darme todo su apoyo y compartir tanto conmigo.

A mi familia en general, primos, tíos y sobrinos por apoyarme de tantas maneras, inspirarme y ser parte de mi como persona.

Gracias a Lichos por todo su apoyo, por enseñarme tanto, académica como personalmente, por ser mucho más que un tutor de tesis y estar ahí para aconsejarme en situaciones que incluso van más allá de su deber como profesor.

A mis amigos por interesarse por mi, aconsejarme en lo que consideran correcto, mostrarme su sentimiento de orgullo y darme todo ese cariño que escogieron darme.

A la UNAM por darme la oportunidad de forma parte de la institución y permitirme cursar otro grado académico en esta hermosa institución.

Dedicatoria.

A toda mi familia, tanto los que me tocaron al nacer, como los que yo escogí.

Principalmente a mis padres y mi hermano. Pero también para mis primos, tíos, sobrinos, amigos y novia.

Índice

| | |
|----------------------------------------------------|-----------|
| Resumen | 1 |
| Introducción | 2 |
| Objetivo general | 6 |
| Objetivos particulares | 6 |
| Antecedentes | 6 |
| • Vipéridos..... | 6 |
| • Ofidismo en México..... | 7 |
| • Modelos de nicho y distribución de especies..... | 8 |
| Métodos | 9 |
| Resultados | 15 |
| Discusión | 27 |
| Conclusiones | 30 |
| Referencias Bibliográficas | 31 |
| Anexos | 38 |

Resumen

Las mordeduras por serpientes venenosas (ofidismo) son catalogadas como una enfermedad tropical desatendida, ocurriendo en el mundo aproximadamente 5,400,000 casos al año. México es uno de los tres países de América más afectados por este fenómeno con un promedio de 3,500 incidentes por año. En este trabajo se estudiaron los patrones geográficos de mordeduras por serpientes venenosas en México para el período 2016-2018. Se obtuvieron casos de mordeduras y se estimó la tasa de incidencia cada cien mil habitantes a escala estatal y municipal. Adicionalmente se generaron modelos de distribución para 12 serpientes venenosas (*Crotalus atrox*, *Crotalus molossus*, *Crotalus simus*, *Crotalus tzabcan*, *Crotalus culminatus*, *Crotalus scutulatus*, *Crotalus enyo*, *Crotalus ruber*, *Agkistrodon russeolus*, *Agkistrodon bilineatus*, *Agkistrodon taylori* y *Bothrops asper*), identificadas previamente en la literatura como las principales responsables de la mayoría de los accidentes en el país. Las distribuciones de las serpientes se utilizaron para calcular la riqueza de especies de importancia médica, la cual, en conjunto con variables ambientales y sociodemográficas, se integraron en un modelo para evaluar cuáles son los factores que explican mejor la incidencia de mordeduras en ambas escalas. Se utilizaron Modelos Lineales Generalizados (GLMs) para evaluar la relación entre la incidencia y las variables independientes: ambientales (temperatura promedio, precipitación anual media y elevación), sociales (población total, población urbana, población rural, población total calculada, ingreso bajo la línea de bienestar municipal, ingreso bajo línea de bienestar por persona e índice de rezago social) y biológicas (idoneidad ambiental de cada especie independiente, idoneidad sumada de las serpientes de importancia médica en México y riqueza de especies de importancia médica en México). Además, para tener en cuenta la autocorrelación espacial se calibró un modelo de regresión binomial logística con efectos espaciales aleatorios. Los estados con mayor valor de incidencia fueron Hidalgo, Puebla y Quintana Roo. Las variables que mejor explicaron espacialmente dicha incidencia son: idoneidad ambiental de *A. bilineatus*, *A. taylori*, *B. asper*, *C. atrox*, población urbana, ingreso mensual bajo el nivel medio de bienestar municipal, población total e índice de rezago social. A una escala municipal, de aquellos con la tasa de incidencia más elevada, ocho pertenecen al estado de Oaxaca y dos a Puebla.

Abstract

Venomous snakebites are classified as a neglected tropical disease in the world with approximately 5,400,000 cases per year. Mexico is listed as one of the three most affected countries by this phenomenon in America with an average of 3,500 annual incidents. Here, we studied geographic patterns of snakebites in México for the period 2016-2018. We obtained total snakebites and estimated the incidence rate at municipality and state level. We also generated distribution models for 12 mexican vipers (*Crotalus atrox*, *Crotalus molossus*, *Crotalus simus*, *Crotalus tzabcan*, *Crotalus culminatus*, *Crotalus scutulatus*, *Crotalus enyo*, *Crotalus ruber*, *Agkistrodon russeolus*, *Agkistrodon taylori* and *Bothrops Asper*), previously identified as the main species responsible for the majority of the snakebites in the country. These models were used to calculate species richness, which were integrated with environmental and sociodemographic factors to assess which are the variables that better explained snakebite incidence at both levels. We employed Generalized Linear Models (GLM) to assessed the relation between incidence and independent variables: environmental (average temperature, mean annual rainfall and elevation), social (total population, urban population, rural population, calculated total population, under the municipal welfare line, income under the welfare line per person and social lag index) and biological (environmental suitability of each independent species, summed suitability of medically important snakes in Mexico and richness of medically important species in Mexico). In order to consider spatial autocorrelation we also calibrated a binomial logistic regression model with random spatial effects. The states with the highest incidence values were Hidalgo, Puebla and Quintana Roo. The factors that better explain in space the incidence at state level were: environmental suitability of *A. bilineatus*, *A. taylori*, *B. asper*, *C. atrox*, urban population, monthly income below the average level of municipal welfare, total population, and social lag index. At municipal scale, of those with the highest incidence rate, eight belong to the state of Oaxaca and two to Puebla.

Introducción

En el mundo existe una gran diversidad de especies de serpientes, de las cuales las familias Viperidae y Elapidae resultan de particular interés desde el punto de vista epidemiológico, ya que son las responsables de la mayor parte de las mordeduras y envenenamientos en humanos (Bolaños 1982). Cada año ocurren globalmente alrededor de 5,400,000 casos de mordeduras por serpiente y entre 2,500,000 -3,000,000 envenenamientos y 120,000 – 125,000 muertes humanas (Kasturiratne *et al.* 2008). A este fenómeno se le conoce como ofidismo y

representa un riesgo para la salud pública en diferentes partes del mundo, principalmente en Asia, África y Latinoamérica. En el caso particular de Latinoamérica, a pesar de que los datos están fragmentados en diferentes bases de datos, incompletos para muchas divisiones políticas y periodos temporales y están pobremente representados en la mayoría de lugares, se registran aproximadamente unos 57,500 - 75,362 casos por año (Gutiérrez 2011), siendo la subfamilia Crotalinae la causante de la mayoría (85%) de accidentes (Bolaños 1982). Para México el panorama también es similar, ya que en el periodo transcurrido entre 2003 y 2010, se mantuvo un promedio mayor o igual a 3,500 incidentes por año (Zuñiga-Carrasco y Caro-Lozano 2013), incluso siendo catalogado por Cuellar-Gordo *et al.* (2016) como uno de los tres países más afectados por el ofidismo en América junto con Brasil y Colombia.

El ofidismo representa pérdida de vidas humanas, así como afectaciones económicas. En especial para países en vías de desarrollo, donde la mayor parte de la población se sustenta de actividades agrícolas y turísticas. Estas actividades están estrechamente relacionadas con el ofidismo, siendo las personas entre 11 y 50 años las más afectadas, que a su vez representan al sector económicamente más activo y que en muchas ocasiones son responsables del sustento familiar (Gutiérrez *et al.* 2010; Longbottom *et al.* 2018; Vaiyapuri *et al.* 2013; WHO 2007). En México, al igual que en otros países, la mayor parte de los accidentes ofídicos ocurren en hombres que trabajan en el campo con edades de entre 15 y 44 años (Zuñiga-Carrasco y Caro-Lozano 2013).

Desarrollar estrategias que permitan disminuir o evitar los accidentes ofídicos requiere profundizar sobre sus causas. Para esto es necesario evaluar la relación entre el ofidismo y factores ambientales, sociales, económicos y biológicos, ya que es un fenómeno complejo (Gutiérrez 2006; Chaves *et al.* 2015). Se han realizado numerosos estudios de la ecología y etología de muchas especies de importancia médica (e.g. Bastos *et al.* 2005; Oliveira-Ermelinda 2001) y frecuentemente se llevan a cabo análisis donde se describe el panorama epidemiológico y las cifras de accidentes por unidades geográficas, como son las provincias, los estados y los condados (e.g. de Torrent *et al.* 2004; Dehghani 2012; Leite *et al.* 2013; Yañez-Arenas *et al.* 2016). Sin embargo, existen pocos estudios explicativos de los fenómenos causales o correlacionados con los patrones geográficos del ofidismo (Bravo-Vega *et al.* 2019).

Para entender la naturaleza del ofidismo y disminuir su impacto en las comunidades humanas, es necesario conocer los factores espaciales que explican la variación del riesgo de ser mordido por una serpiente (Yañez-Arenas *et al.* 2018). El principal factor determinante para que ocurra un accidente ofídico es la presencia de al menos una especie de serpiente

venenosa. No obstante, se sabe que no todas las especies venenosas representan el mismo riesgo. Por lo general, dependiendo de la región del mundo, una o dos especies son las que causan la mayor parte de los accidentes y por lo tanto, son consideradas de mayor importancia médica. Por ejemplo, *Echis* spp. en Africa; *Daboia russelii*, *Echis* spp., *Naja* spp. y *Bungarus* spp. en Asia (Alirol *et al.* 2010); *Bothrops asper* y *Bothrops atrox* en América central y del sur, respectivamente (Gutiérrez 2006); *Vipera* spp. en Europa (Persson 2017); *Pseudonaja* spp. en Oceanía (White 1998); y en el caso de Norteamérica se asocia la mayoría de casos con *Crotalus* sp. (Gold *et al.* 2002). En México la mayoría de accidentes se asocian principalmente con *Crotalus atrox*, *Crotalus molossus*, *Crotalus durissus* (*Crotalus simus*, *Crotalus tzabcan*, *Crotalus culminatus*), *Agkistrodon bilineatus* (*Agkistrodon russeolus*, *Agkistrodon taylori*, *Agkistrodon bilineatus*) y *Bothrops asper* (Hernández y Bravo 2009), dependiendo las especies que se distribuyen en cada región.

La presencia, abundancia y los patrones de actividad de las serpientes venenosas se ven afectados por las condiciones ambientales. Yañez-Arenas *et al.* (2014) observaron que la favorabilidad ambiental (estimada mediante modelado de nicho ecológico) de dos especies de importancia médica explicó gran parte de la variación espacial de la incidencia municipal de mordeduras en el estado de Veracruz, México. Probablemente porque en dichos modelos la favorabilidad ambiental representa los patrones geográficos de la abundancia de *Bothrops asper* y *Crotalus simus*. Otros estudios han evaluado la asociación directa entre los accidentes ofídicos y ciertos aspectos abióticos. Por ejemplo, se ha observado que la elevación tiene una relación inversa con el número acumulado de mordeduras de serpientes (Chaves *et al.* 2015), y han encontrado que conforme la elevación aumenta, la temperatura corporal de los individuos disminuye y por consiguiente también sus períodos de actividad (Olivera-Ermelinda 2001, Almaraz-Vidal 2016; Fernández-Badillo *et al.* 2016). En el norte de Ghana y Nigeria Molesworth *et al.* (2003) documentaron que el índice de vegetación de diferencia normalizada promedio (NDVI por sus siglas en inglés; usado como aproximación de la productividad vegetal a través de la identificación de biomasa fotosintéticamente activa) fue, entre varios predictores, el único factor que explicó significativamente la incidencia de mordeduras por serpientes venenosas. De igual manera, en el noreste de Brasil se identificó una influencia significativa de la humedad y temperatura, siendo esta última la principal variable predictora. En cuanto a la precipitación, se observó que el mayor número de casos fue registrado tres meses después del mes más lluvioso (Da Costa *et al.* 2019).

Por otro lado, el riesgo ofídico también se encuentra estrechamente relacionado con aspectos sociodemográficos, como la densidad poblacional humana y su nivel socio-económico, ya que se considera que el envenenamiento provocado por serpientes es una enfermedad ligada a la pobreza (asociada con un nivel medio de vida bajo), sobre todo la mortalidad como consecuencia de la mordedura (Harrison 2009). En general, se ha documentado que, en zonas rurales, el número de casos de accidentes ofídicos es mayor que en las áreas urbanas (Yañez-Arenas *et al.* 2018; Chaves *et al.* 2015). Por ejemplo, en Irán, Dehghani (2012) encontró que el 68% de las mordeduras por serpiente venenosas ocurren en áreas rurales. Por otro lado, Cuellar (2016) reportó que en Colombia, la agricultura está relacionada con el ofidismo. En India Vaiyapuri (2013), sostiene que el ofidismo es un problema esencialmente importante en zonas rurales particularmente en poblaciones pequeñas.

En México, la mayor parte de los estudios del ofidismo han sido descriptivos como reportes del total de casos de mordeduras y la incidencia por municipio o por estado (Tay-Zavala 2002; González-Rivera *et al.* 2009; Yañez-Arenas 2014; Almaraz-Vidal 2016; Yañez-Arenas *et al.* 2016). El único estudio en el que se han evaluado los factores que se correlacionan y explican mejor los patrones geográficos de ofidismo comprende únicamente el estado de Veracruz (Yañez-Arenas *et al.* 2014). A pesar de que este estudio demuestra que la favorabilidad ambiental de las especies de importancia médica (*Crotalus simus* y *Bothrops asper*) en combinación con la marginación humana explican gran parte de la variación espacial en la incidencia de mordeduras por serpiente venenosa en esa región, resulta necesario analizar si esto puede ser generalizable a otras regiones e incluso a escala nacional.

En este trabajo se analizó cuáles son los factores ambientales asociados al ofidismo en México y si el patrón de accidentes con serpientes venenosas puede ser explicado por un modelo general, o si la inclusión/exclusión de ciertos factores determina por región, el ajuste y la capacidad explicativa. Con base en los estudios existentes, se espera que la incidencia de mordeduras por serpientes venenosas será explicada, independientemente de la escala o unidad espacial, por un modelo estándar que incluirá un conjunto de factores definido. Específicamente, se espera que la idoneidad ambiental y la riqueza de especies de importancia médica, la densidad poblacional humana rural y la marginación estén correlacionados positivamente con la incidencia de mordeduras por serpiente venenosa, mientras que el grado de urbanización, la huella humana, y la elevación se correlacionen inversamente.

Objetivo general

Determinar los factores que explican la incidencia de mordeduras por serpiente venenosa en México y su efecto a través de dos escalas de análisis (estatal y municipal).

Objetivos particulares

- Calcular la incidencia de mordeduras por unidad geográfica del año 2016 al 2018.
- Modelar la idoneidad ambiental de las especies de serpiente de importancia médica en México.
- Estimar la riqueza taxonómica de las especies de importancia médica.
- Evaluar a escala estatal la relación entre la incidencia de mordeduras por serpiente venenosa contra la idoneidad ambiental y riqueza de las especies de importancia médica, las variables ambientales y sociodemográficas.
- Evaluar a escala municipal la relación entre la incidencia de mordeduras por serpiente venenosa contra la idoneidad ambiental y riqueza de las especies de importancia médica, las variables ambientales y sociodemográficas.

Antecedentes

Vipéridos

Las serpientes de la familia viperidae (mocasines, víboras de cascabel y víboras verdaderas) incluyen alrededor de 260-364 especies, agrupadas en cuatro subfamilias: Azemiopinae, Causinae, Crotalinae y Viperinae (McDiarmid *et al.* 1999; Uetz *et al.* 2020). En México, sólo se distribuye la subfamilia Crotalinae, representada por 64 especies que se agrupan en 10 géneros, las cuales poseen hábitos y características particulares. Entre éstas, destacan los géneros *Crotalus* (víboras de cascabel), *Bothrops* (nauyacac) y *Agkistrodon* (cantiles; Castro *et al.* 2014). Todas ellas poseen un par de fosetas termorreceptoras, también conocidas como fosetas loreales, ubicadas entre el ojo y los orificios nasales, además de presentar dientes inoculadores de veneno, los cuales se encuentran en la parte anterior de la mandíbula superior y se conectan por un conducto con las glándulas productoras de veneno (Klauber 1956).

El género *Crotalus* es el mayormente representado en México y se distribuye en el continente americano desde el sur de Canadá hasta Argentina (Blair *et al.* 2016). Cuenta con alrededor de 37 especies, de las cuales 34 (92%) se distribuyen en México, siendo endémicas 22 de éstas (Flores-Villela 1993; Campbell y Lamar 2004; Flores-Villela y Canseco-Márquez 2004; Paredes-García *et al.* 2011).

El género *Bothrops* se encuentra representado solamente por una especie *B. asper*. Esta especie suele ser de talla grande, 180 cm en promedio y temperamentales. Esta especie es de gran importancia médica debido a su amplia distribución (desde el noreste de México hasta el extremo norte de Perú; Sasa *et al.* 2009) y al número de accidentes que ocasionan (Castro *et al.* 2014).

El género *Agkistrodon*, el cual se distribuye desde el noreste, centro y sureste de Estados Unidos, pasando por México y llegando hasta Centro América (McCraine 2011). Actualmente este género contiene seis especies formalmente descritas (Campbell y Lamar 2004; Porras *et al.* 2013) y tres (*A. bilineatus*, *A. russeolus* y *A. taylori*) se encuentran en el territorio nacional.

Ofidismo en México

Uno de los primeros estudios en México sobre ofidismo fue realizado por Tay-Zavala en 2002, donde menciona a las familias Elapidae y Viperidae como las de mayor riesgo en México. Describió el fenómeno del ofidismo y la epidemiología del mismo, donde los hombres entre 15 y 44 años resultan ser los más afectados, principalmente en labores de campo. Por otra parte, ahonda en la sintomatología de las mordeduras, desde las marcas de colmillos, hasta la muerte del paciente. Por lo que recomienda una pauta de tratamiento para los diversos grados de intoxicación, contemplando: el sitio de la mordedura, el tiempo transcurrido, y los síntomas generales.

González-Rivera *et al.* (2009) describen la presencia de la serpiente en la cultura y como se ha utilizado como símbolo. Por ejemplo, en medicina y en la bandera mexicana. Posteriormente, abordan el cuadro clínico y describen los síntomas, que pueden ser locales o generales, los cuales varían en función de que el veneno sea neurotóxico o hemotóxico-citotóxico y mencionan los estados más afectados entre el 2003 y 2006, los cuales resultaron ser: Oaxaca, Veracruz, San Luis, Potosí, Hidalgo y Puebla.

Posteriormente, Yañez-Arenas en 2014 describe el fenómeno en Veracruz del periodo de 2003 a 2012, siendo el 2006 el año con mayor número de casos y resalta que los municipios con más casos no son precisamente los que presentan la mayor tasa de incidencia.

Almaraz-Vidal en 2016 menciona la diversidad de especies que se encuentran en la región de las grandes montañas en Veracruz y lo propone como un factor que junto con las condiciones poblacionales podrían estar estrechamente relacionados con accidentes ofídicos. También menciona que muchas veces los accidentes son atendidos en regiones diferentes al

lugar de ocurrencia, por lo que es difícil rastrear las entidades federativas o poblaciones donde aconteció la mordedura.

Por último, uno de los trabajos más recientes (Yañez-Arenas *et al.* 2016) aborda el ofidismo nuevamente de manera descriptiva del año 2003 al 2012 en el estado de Yucatán. El único estudio en el que se han evaluado los factores que se correlacionan y explican mejor los patrones geográficos de ofidismo comprende únicamente el estado de Veracruz (Yañez-Arenas *et al.* 2014). Este estudio demuestra que la favorabilidad ambiental de *Crotalus simus* y *Bothrops asper* en combinación con la marginación humana explican gran parte de la variación espacial de la incidencia de mordeduras por serpientes venenosas en esa región. Por lo tanto, es necesario analizar si el mismo fenómeno se puede generalizar a escala nacional.

Modelos de nicho y distribución de especies

Existen diferentes definiciones de nicho ecológico, pero la mayoría provienen de dos principales conceptos básicos. El primero en acuñar el término fue Johnson en 1910 (Gaffney, 1975), definiéndolo como “unidad de distribución, dentro de la cual cada especie se mantiene, determinada principalmente por el suministro de alimento y factores ambientales”. Situándolo como una propiedad del ambiente (Soberón 2007). Sin embargo, no es la única definición que se le ha dado con el tiempo.

Los dos conceptos base para la actualidad son el de Grinnell en 1924, define nicho como la unidad de distribución más pequeña, dentro de la cual, cada taxón se mantiene debido a sus limitaciones instintivas y estructurales. Proponiendo al nicho como una propiedad del ambiente, no de los taxones y el de Elton por su parte, en 1927 definió el nicho como la función de un organismo en su comunidad, considerando principalmente las relaciones tróficas y dejando de lado las condiciones ambientales. Haciéndolo particularmente relevante para los estudios a escalas pequeñas particularmente de redes tróficas.

Hutchinson en 1957 define el nicho de un taxón como un hipervolumen de un espacio n-dimensional cuyas dimensiones son todos los factores que actúan sobre el taxón. Por lo que para él es posible graficar cada uno de estos factores y como afectan a la especie. Esta definición contempla tanto aspectos físicos como biológicos y no existen nichos vacíos que puedan ser ocupados. Con base en esta definición, se desarrolló la “Dualidad de Hutchinson”, la cual es fundamental para el modelado de nichos ecológicos y describe que a cada punto en el espacio geográfico le corresponde un punto con cierta combinación de características

ambientales. Considerando el espacio geográfico como aquel que puede ser encontrado sobre la geografía terrestre y al espacio ambiental como aquel espacio cartesiano n-dimensional que es definido por las magnitudes de las variables ambientales (Colwell y Rangel 2009).

Entonces, se puede definir el modelado de nicho ecológico como la caracterización de los requerimientos ambientales de una especie. De tal manera que, al asociar la distribución geográfica conocida de organismos de dicha especie a datos ambientales se pueden obtener los requerimientos ambientales conocidos. Estos últimos serán utilizados, con algún algoritmo matemático para identificar las combinaciones del espacio ambiental que cumplen con dichas características. De esta manera es posible asignar un valor de favorabilidad ambiental a cada unidad espacial (Soberon et al., 2017). Al llevar el concepto de nicho al espacio geográfico obtendremos un modelo con el cual podremos aproximar y predecir la distribución posible de la especie de interés (Elith y Leathwick 2009), que también corresponde con lo que Soberón (2007) describe como nicho ocupado, es decir, las características ambientales que existen en la geografía del planeta capaces de satisfacer ciertas necesidades fisiológicas de la especie y que a su vez han podido ser alcanzadas por esta. Para un mejor entendimiento, se describe un diagrama de “BAM”, el cual contempla tres factores: “A” condiciones scenopoéticas, las cuales son aquellas características ambientales que no se ven afectadas por la presencia o ausencia de una especie. Es decir, condiciones que permiten al taxón sobrevivir y reproducirse (A del inglés abiotic), “B” región del mundo con las condiciones bióticas adecuadas (B del inglés biotic) y por último “M” la cual es el área de accesibilidad histórica, y representa el espacio accesible por dispersión (M del inglés motility) (Soberón y Peterson 2005).

Métodos

Casos e incidencia de mordeduras por serpientes venenosas

Se recopiló la información de la Secretaría de Salud, sobre el total de casos de mordeduras por serpientes venenosas para todos los municipios de los 32 estados de México en el periodo de 2016-2018. Con esto se calculó la tasa de incidencia de mordeduras, la cual se obtiene dividiendo el total de mordeduras entre la población de la entidad federativa durante el mismo periodo de los casos de mordedura (EUPATI 2015). Para manejar los datos suele multiplicarse por 10ⁿ o expresarse como porcentaje (Fajardo-Gutiérrez 2017), por lo que la incidencia reportada en este trabajo se obtuvo al multiplicar el cociente por 100,000.

Variables ambientales y sociodemográficas

Las variables ambientales utilizadas tanto para generar los modelos de distribución de especies como para los análisis geo-estadísticos posteriores, se obtuvieron de CHELSA (<http://chelsa-climate.org/bioclim/>), la cual es una base de datos climáticos de la superficie terrestre de alta resolución (30 arcos de segundo, aprox. 1 km² por pixel), y que contempla diferentes variables de temperatura y precipitación calculadas con datos del año 1979 a 2013 (Karger *et al.* 2017) (Cuadro 1). Por su parte, la mayoría de las variables sociodemográficas se obtuvieron del Geoportal del Sistema Nacional de Información sobre la biodiversidad (<http://www.conabio.gob.mx/informacion/gis>). Esta información consiste en variables espacializadas en mapas vectoriales, cuya más reciente actualización se produjo en el año 2010. Para representar la población local, debido a la falta de datos de censos poblacionales o deficiencias de los mismos en gran parte del país, sobre todo, en los estados del Pacífico sur, como Guerrero, Chiapas y Oaxacase se requirió utilizar información complementaria de la base WorldPop (<https://www.worldpop.org/>); la cual utilizó luces nocturnas y otras imágenes de satélite para predicción (Tatem 2017) .

Cuadro 1. Capas bioclimáticas de CHELSA con datos del año 1979 a 2013 (<http://chelsa-climate.org/bioclim/>)

| Código | Variable |
|--------|-----------------------------------------|
| Bio1 | Temperatura media anual |
| Bio2 | Rango diurno medio |
| Bio3 | Isotermalidad |
| Bio4 | Estacionalidad de la temperatura |
| Bio5 | Máxima temperatura del mes más cálido |
| Bio6 | Mínima temperatura del mes más frío |
| Bio7 | Rango anual de temperatura |
| Bio8 | Temperatura media del cuarto más húmedo |

| | |
|-------|-----------------------------------------|
| Bio9 | Temperatura media del cuarto más seco |
| Bio10 | Temperatura media del cuarto más cálido |
| Bio11 | Temperatura media del cuarto más frío |
| Bio12 | Precipitación anual |
| Bio13 | Precipitación del mes más húmedo |
| Bio14 | Precipitación del mes más seco |
| Bio15 | Estacionalidad de la precipitación |
| Bio16 | Precipitación del cuarto más húmedo |
| Bio17 | Precipitación del cuarto más seco |
| Bio18 | Precipitación del cuarto más cálido |
| Bio19 | Precipitación del cuarto más frío |

Especies de serpiente y registros de presencia

Los registros de presencia de las serpientes de relevancia médica se obtuvieron en los sitios web (descargados en abril de 2018) de Global Biodiversity Information Facility (GBIF, <http://www.gbif.org>) y de VertNet (<http://vertnet.org/>). Para minimizar la auto-correlación espacial de los registros y disminuir el sobreajuste en los modelos (Boria et al. 2014) se eliminaron los registros agrupados (aquellos que pudieran estar representando áreas más intensamente muestreadas) mediante un filtrado geográfico de 50 km utilizando la herramienta “Spatially Rarefy Occurrence Data” de “SDMtoolbox” (Brown et al. 2014), en ArcMap 10.5 (ESRI).

Se contemplaron 10 especies, considerando la taxonomía actual (*C. atrox*, *C. molossus*, *C. simus*, *C. tzabcan*, *C. culminatus*, *C. scutulatus*, *A. russeolus*, *Agkistrodon taylori*, *A. bilineatus* y *B. Asper*) consideradas de importancia médica para México. De acuerdo con Hernández y Bravo (2009), estas serpientes son las que causan la mayoría de los accidentes en el país. Adicionalmente, se modelaron *Crotalus ruber* y *Crotalus enyo* por ser especies

representativas y comunes en la península de Baja California. En esta región no habita ninguna de las 10 especies previamente identificadas como de importancia médica en el país. Sin embargo, dado que en la región existen reportes de accidentes se consideró que éstos pudieran ser ocasionados por éstas dos serpientes ya que son las más comunes y están presentes en la región (Paredes-García *et al.* 2011, CONANP 2019).

Modelos de distribución de especies

Se seleccionó para cada especie un área de accesibilidad histórica (área M; *sensu* Soberón y Peterson 2005) con base en una capa vectorial global de ecorregiones desarrollada por la WWF (Ellis *et al.*, 2013). Como parte del área M se seleccionó cualquier ecorregión donde hubiera al menos un registro de presencia de la especie en cuestión y posteriormente con un modelo digital de elevación (DEM) se recortaron manualmente los polígonos previamente seleccionados, contemplando las formaciones montañosas que pudieran representar barreras físicas para las especies. Con el polígono que define la M de cada especie se recortaron las capas ambientales. Para eliminar la colinealidad entre variables se realizó una matriz de correlación de Pearson en SDMtoolbox de ArcMap 10.5 (ESRI), con el cual se seleccionaron variables ambientales para cada especie con un umbral de correlación aceptado del 0.00005, donde se priorizaron las variables que representaban una mayor duración temporal como: temperatura anual media, estacionalidad de la temperatura, precipitación anual media y estacionalidad de la precipitación y así evitar un sobre ajuste al contar con más variables de las requeridas (Phillips y Dudík, 2008).

Los modelos de distribución se construyeron mediante el algoritmo de máxima entropía Maxent 3.4.1 (Phillips *et al.* 2017). Este algoritmo estima la probabilidad de que las condiciones ambientales de un determinado píxel sean similares a aquellas condiciones donde la especie ya ha sido registrada, suponiendo que todos los píxeles o celdas tienen de base una probabilidad desconocida de ser seleccionados, pero igual entre cada uno de ellos. La selección del modelo de Maxent se llevó a cabo a través de la paquetería KUENM (Cobos *et al.* 2019) en R (R Development Core Team, 2019), ya que el uso de esta paquetería permite probar múltiples combinaciones de parámetros y ajustes. Para dicha selección se considera el desempeño de cada modelo ajustado en relación a un conjunto de datos independientes (que no fueron usados en la calibración) en tres pasos jerárquicos: primero, se evalúa la significancia estadística usando la técnica ROC (receiver operating characteristic) parcial. Segundo, se evalúa el rendimiento midiendo la tasa de omisión (proporción de registros de

ocurrencia omitidos) a partir de un criterio de error permitido. Tercero, se utiliza el criterio de información de Akaike (AIC) para elegir los modelos con menos parámetros. Por lo regular, KUENM selecciona más de un modelo final que podría ser adecuado, por lo que se seleccionó la mediana del modelo correspondiente a la mediana de los modelos obtenidos en estos casos proporcionada por KUENM. Por último, para obtener los mapas de distribución potencial se estableció una tasa de omisión de los registros de ocurrencia 2.5% (especies de amplia distribución) y 0% (especies de distribución restringida como *A. taylori*). Esto que significa que se consideraron como no favorables todos los valores por debajo de dicho 2.5% de las idoneidades obtenidas y así excluir las presencias posiblemente problemáticas con valores extremos (Yañez-Arenas *et al.* 2018). De esta forma se obtuvieron mapas binarios, dando valor de 1 a aquellos píxeles con condiciones adecuadas con valores mayores al umbral y valor de 0 los píxeles con condiciones inadecuadas, es decir valores iguales o menores al umbral para cada especie con ayuda de ArcMap 10.5 (ESRI).

Riqueza e idoneidad

Para generar el mapa de idoneidad ambiental combinada de las doce especies de importancia médica, se sumaron los 12 mapas no binarizados. La riqueza de especies se estimó al repetir el proceso realizado con los mapas de idoneidad, pero en este caso con los mapas binarizados, es decir aquellos con la aplicación del umbral del 2.5%.

Por último, se extrajeron los valores de la mediana y el promedio de cada uno de los 12 mapas de idoneidad ambiental de especies por separado, el de idoneidad combinada y el de riqueza de especies a una capa vectorial con polígonos de los municipios y estados del país con ayuda de en R-3.6.0 (R Development Core Team, 2019).

Bases de datos de variables

Se generaron dos bases de datos, una a nivel estatal y otra municipal. En ambos casos se unieron las variables ambientales (temperatura promedio, precipitación anual media y elevación), sociales (población total, población urbana, población rural, población total calculada, ingreso bajo la línea de bienestar municipal, ingreso bajo línea de bienestar por persona e índice de rezago social) y biológicas (la idoneidad ambiental de cada especie, la idoneidad sumada de las serpientes de importancia médica en México y la riqueza de especies de importancia médica en México) con el total de casos y la incidencia calculada para ambas

escalas. Estas últimas dos fueron consideradas las variables de respuesta, mientras que el resto las independientes o explicativas para los análisis descritos a continuación.

Relación entre la incidencia ofídica y factores geográficos

Se realizaron análisis de correlación de Spearman entre la incidencia de mordeduras y las variables independientes. Luego se realizaron gráficos de dispersión para observar el tipo de distribución de datos, con el fin de identificar la forma y la intensidad de correlación entre las variables independientes y la variable de respuesta a nivel municipal.

Para evaluar la relación entre cada una de las variables de respuesta y las variables explicativas en conjunto por tipo (*i.e.*, ambientales, sociales o biológicas) se usaron modelos lineales generalizados (GLM por sus siglas en inglés; McCullagh y Nelder 1989). Se siguió un protocolo de regresión por pasos, quitando manualmente las variables no significativas o que tenían una correlación muy baja. Se seleccionó el GLM con los valores más altos de correlación y AIC más bajo, con el fin de identificar el conjunto de variables que mejor explican la incidencia. Posteriormente, se repitió el procedimiento con las variables ambientales y sociales por separado, por lo que al terminar este proceso se obtuvieron tres GLMs, uno por cada tipo de variables. Finalmente, se generó un GLM final que incluyó a todos los tipos de variables. Se seleccionó como mejor modelo aquel donde las variables tuvieran un nivel alto de significancia, pocos efectos negativos en el caso de las especies de serpientes, debido a la naturalidad de las variables explicativas y el menor AIC posible.

Para integrar los efectos espaciales en el análisis de los factores ambientales se ajustó un modelo espacialmente explícito mediante la función `hSDM.binomial.iCAR` del paquete `hSDM` (Vieilledent *et al.* 2015) en R (R Development Core Team, 2019). Esta función construye un modelo de regresión logística binomial en un marco jerárquico bayesiano, con el fin de identificar variaciones en el intercepto de cada municipio o estado, el cual es el promedio de los interceptos de las unidades geográficas vecinas y así sea posible identificar si existe o no estacionalidad espacial. Para identificar los efectos estadísticamente significativos se busca que las muestras de las probabilidades posteriores no contengan 0 entre el primer y tercer cuartil, correspondientes al 2.5% y 97.5% de los intervalos de credibilidad respectivamente.

En el caso de incidencia municipal al no encontrar correlación entre la incidencia de accidentes ofídicos y la mayoría de las variables explicativas se desarrolló una correlación con los servicios de salud disponibles por municipio.

Resultados

Panorama epidemiológico

Se reportaron 9,985 casos de mordedura de serpiente entre los años 2016 y 2018 en México. En estos tres años observamos que los estados con mayor número de casos totales son diferentes a los estados con una mayor incidencia de mordeduras (Figura 1, Cuadro 2 y Cuadro 3). Situación similar a lo observado a escala municipal, al no corresponder entre los municipios con más casos totales y aquellos con mayor incidencia (Figura 2, Cuadro 4 y Cuadro 5). Así mismo, al comparar los Cuadros 2 y 3, es posible identificar que los estados a los que pertenecen los municipios más afectados por número total de casos e incidencia municipal, son diferentes a los que observamos a escala estatal en ambos rubros.

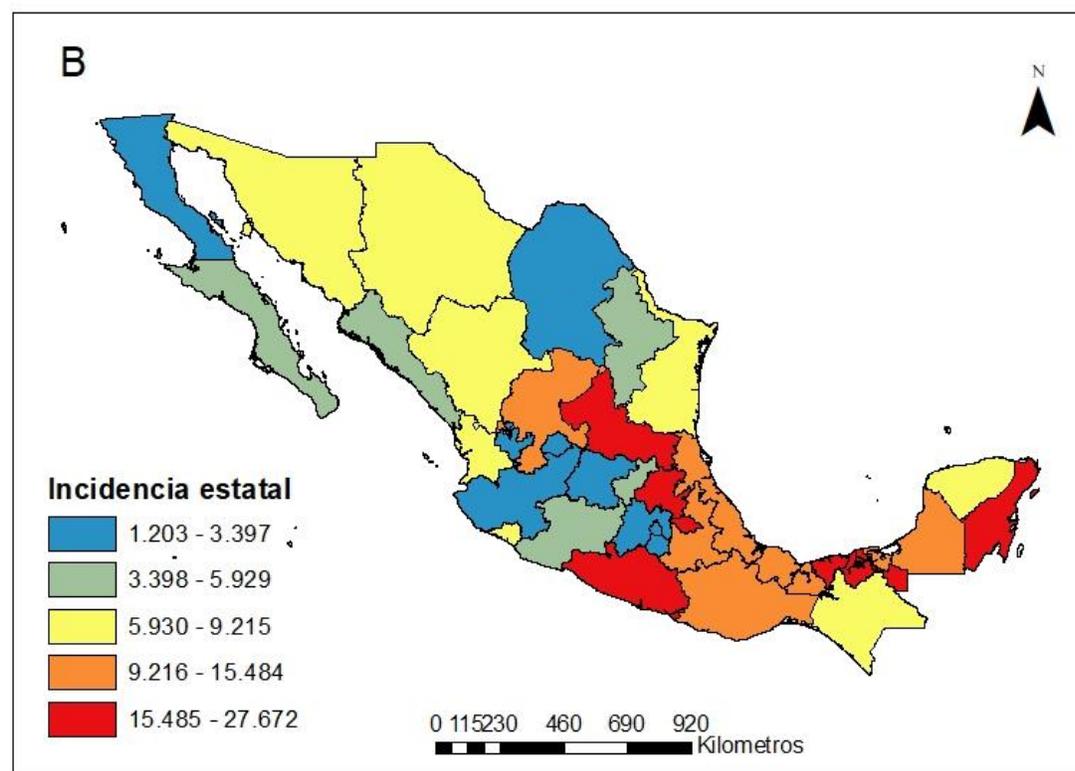
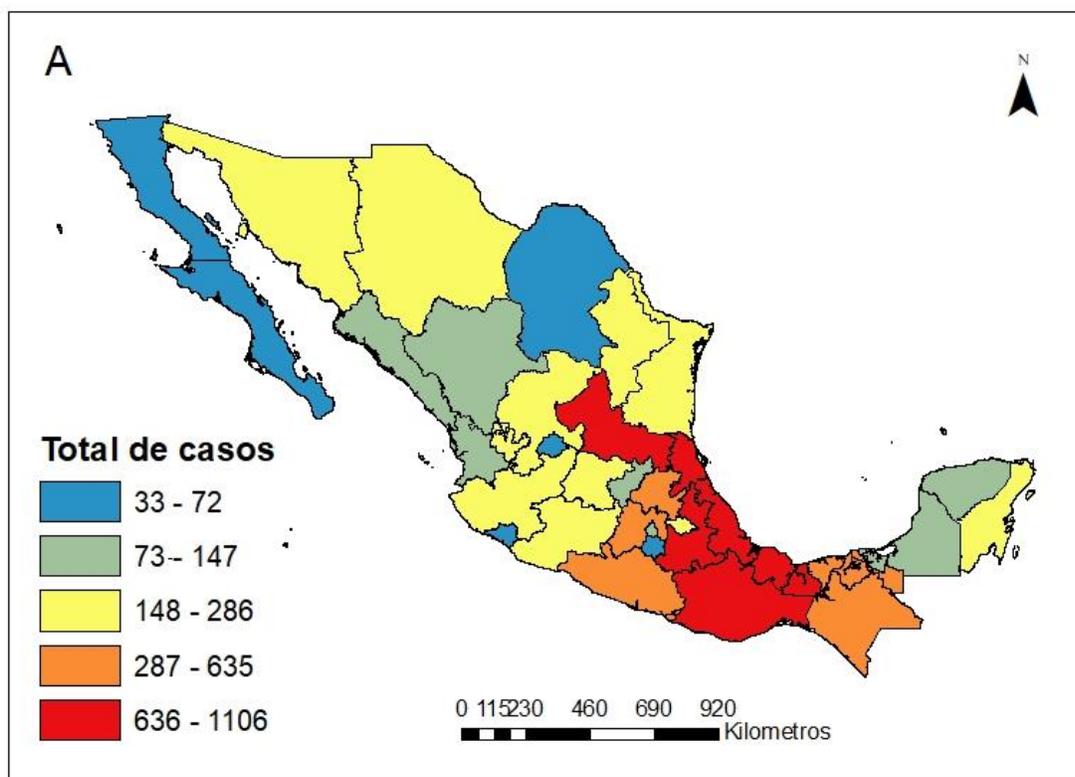


Figura 1. Casos de mordeduras de serpiente por estado en México (2016-2018) (A) e incidencias calculadas de mordeduras de serpiente por estado en México por cada cien mil habitantes (2016-2018)(B).

Cuadro 2. Casos de mordeduras de serpientes por estado en México (2016-2018).

| Estado | Total de Casos |
|----------------------|----------------|
| Veracruz | 1106 |
| Oaxaca | 960 |
| Puebla | 829 |
| San Luis Potosí | 780 |
| Guerrero | 635 |
| Hidalgo | 613 |
| México | 539 |
| Chiapas | 506 |
| Tabasco | 428 |
| Jalisco | 286 |
| Quintana Roo | 276 |
| Chihuahua | 260 |
| Michoacán de Ocampo | 242 |
| Sonora | 237 |
| Tamaulipas | 234 |
| Zacatecas | 228 |
| Tlaxcala | 217 |
| Guanajuato | 211 |
| Nuevo León | 200 |
| Ciudad de México | 147 |
| Yucatán | 145 |
| Sinaloa | 139 |
| Durango | 123 |
| Querétaro | 123 |
| Campeche | 111 |
| Nayarit | 111 |
| Coahuila de Zaragoza | 72 |
| Colima | 52 |
| Baja California Sur | 50 |
| Morelos | 49 |
| Baja California | 43 |
| Aguascalientes | 33 |

Cuadro 3. Incidencias observadas cada cien mil habitantes por estado en México (2016-2018).

| Estado | Incidencia |
|----------------------|------------|
| San Luis Potosí | 27.67234 |
| Hidalgo | 19.12324 |
| Quintana Roo | 17.18339 |
| Guerrero | 16.90742 |
| Tabasco | 16.62967 |
| Tlaxcala | 16.59827 |
| Oaxaca | 15.48402 |
| Zacatecas | 13.74042 |
| Veracruz | 13.22984 |
| Puebla | 13.10417 |
| Campeche | 12.18553 |
| Chiapas | 9.215497 |
| Nayarit | 8.615524 |
| Sonora | 7.824099 |
| Chihuahua | 7.152589 |
| Durango | 6.844018 |
| Colima | 6.787807 |
| Yucatán | 6.7473 |
| Tamaulipas | 6.479507 |
| Baja California Sur | 5.928808 |
| Querétaro | 5.669206 |
| Michoacán de Ocampo | 4.951399 |
| Nuevo León | 4.72999 |
| Sinaloa | 4.673544 |
| Jalisco | 3.396629 |
| Guanajuato | 3.34987 |
| México | 3.174313 |
| Aguascalientes | 2.44757 |
| Morelos | 2.446911 |
| Coahuila de Zaragoza | 2.327911 |
| Ciudad de México | 1.62871 |
| Baja California | 1.203029 |

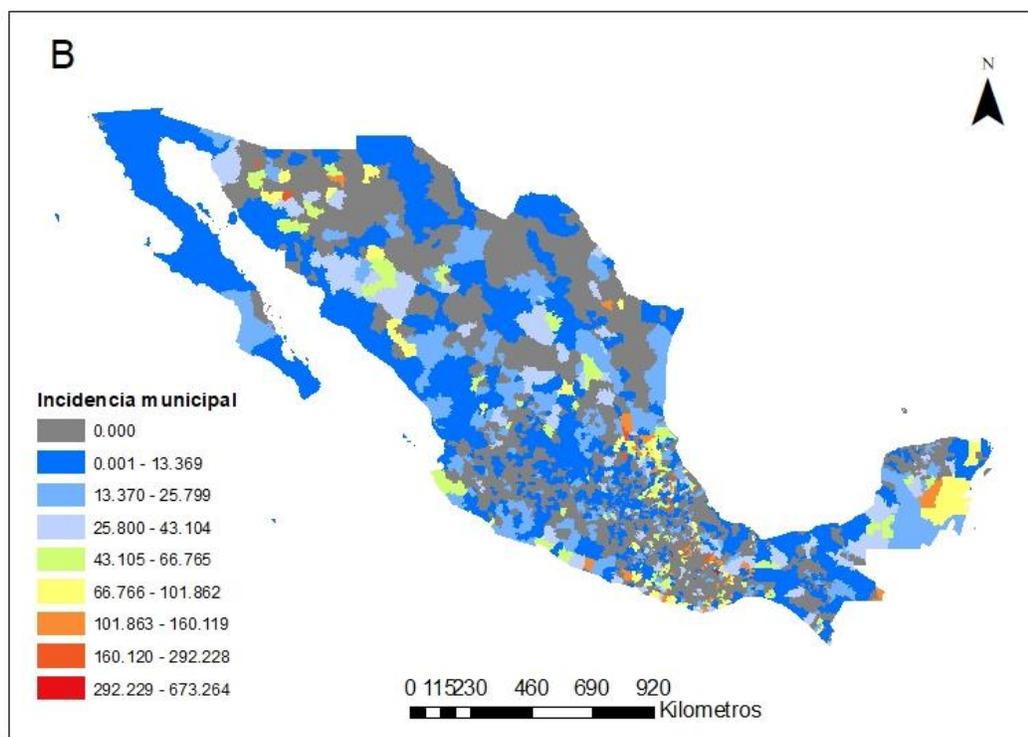
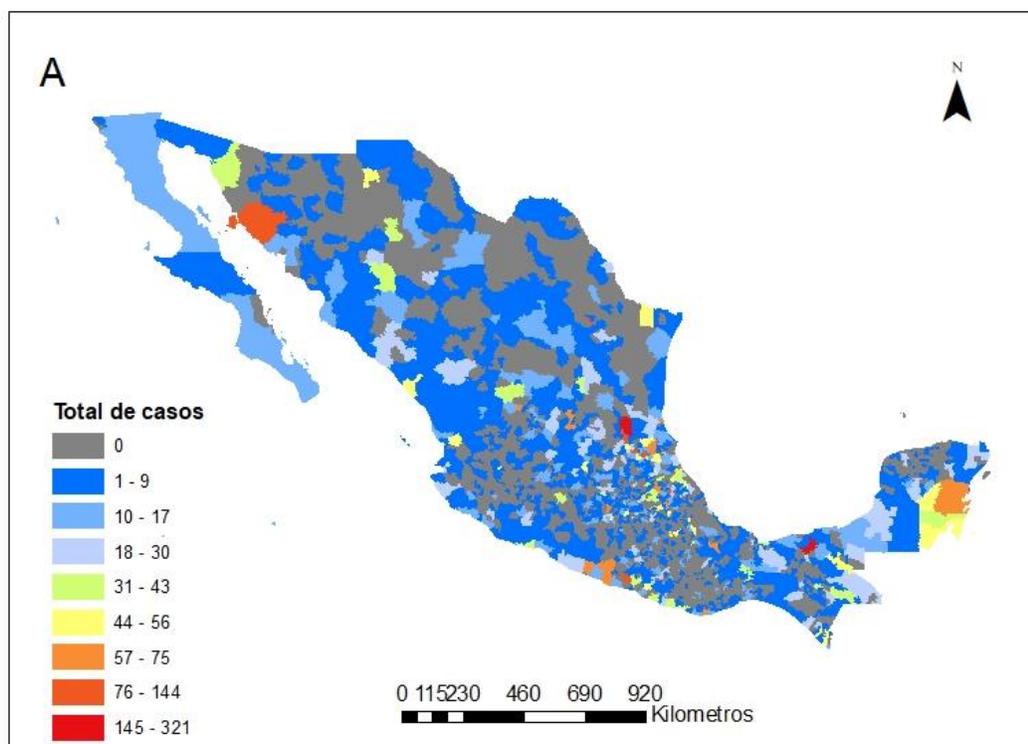


Figura 2. Casos de mordeduras de serpiente por municipio en México (2016-2018) (A) e incidencia de mordeduras por serpiente en los municipios de México (2016-2018) (B) basado en datos provenientes de Secretaría de Salud.

Cuadro 4. Casos de mordeduras de serpiente más relevantes por municipio en México (2016-2018).

| Estado | Municipios con mayor número de casos | Total de Casos |
|-----------------|--------------------------------------|----------------|
| Tabasco | Centro | 321 |
| San Luis Potosí | Ciudad Valles | 223 |
| San Luis Potosí | Tamazunchale | 144 |
| Veracruz | Poza Rica de Hidalgo | 120 |
| Hidalgo | Huejutla de Reyes | 111 |
| Sonora | Hermosillo | 104 |
| Nuevo León | Monterrey | 97 |
| Guerrero | Ayutla de los Libres | 89 |
| San Luis Potosí | Aquismón | 88 |
| Puebla | Zacapoaxtla | 88 |

Cuadro 5. Incidencias observadas cada cien mil habitantes más relevantes por municipio en México (2016-2018).

| Estado | Municipios con mayor Incidencia | Incidencia observada |
|--------|---------------------------------|----------------------|
| Oaxaca | Santa Ana Ateixtlahuaca | 673.264 |
| Oaxaca | Tamazulápam del Espíritu Santo | 452.276 |
| Oaxaca | Pinotepa de Don Luis | 428.043 |
| Oaxaca | San Andrés Lagunas | 418.072 |
| Oaxaca | Santiago Nejapilla | 397.862 |
| Puebla | Zapotitlán de Méndez | 292.228 |
| Oaxaca | San Ildefonso Villa Alta | 250.757 |
| Oaxaca | San Pedro Coxcaltepec Cántaros, | 241.716 |
| Oaxaca | Ixtlán de Juárez | 241.169 |
| Puebla | Ixtepec | 233.395 |

Es importante enfatizar que sólo 40.43% de los 2 463 municipios registrados en el año 2018 dentro del territorio nacional reportó accidentes en el periodo de 2016 al 2018. En cuanto a la incidencia por 100,000 habitantes en el mismo periodo, el municipio más afectado fue Santa Ana Ateixtlahuaca, con una incidencia de 673.264, municipio que, a pesar de sólo tener 3 casos registrados, cuenta con una población aproximada de 510 habitantes. Por otra parte, ocho de los diez municipios con mayor incidencia se encuentran en Oaxaca y los dos en Puebla.

Análisis correlativo y espacialmente explícito de la incidencia de mordeduras de serpientes venenosas en México

Se obtuvieron modelos de distribución con métricas aceptables de acuerdo con la evaluación y selección de los mejores modelos de KUENM. La cual utiliza criterios de significancia

estadística (ROC parcial), rango de omisión (E = una proporción de las ocurrencias que pueden no ser predichas por el modelo) y la complejidad del modelo (AICc) y arroja los modelos que cumplen de mejor manera estas métricas. Esto para las 12 especies contempladas para el estudio. En la Cuadro 6 se presentan los valores estadísticos resultantes de la evaluación de dichos modelos.

Cuadro 6. Estadísticos de los modelos de distribución de las serpientes de importancia médica de México. AUCr = cociente del AUC promedio de la ROC parcial; Std. Desv = desviación estándar.

| Especie | AUCr | Std. Desv. |
|----------------------|-------------|-------------------|
| <i>A. bilineatus</i> | 0.712 | 0.017 |
| <i>A. russeolus</i> | 0.853 | 0.026 |
| <i>A. taylori</i> | 0.768 | 0.071 |
| <i>B. asper</i> | 0.644 | 0.024 |
| <i>C. atrox</i> | 0.755 | 0.007 |
| <i>C. culminatus</i> | 0.751 | 0.047 |
| <i>C. enyo</i> | 0.783 | 0.020 |
| <i>C. molossus</i> | 0.709 | 0.016 |
| <i>C. ruber</i> | 0.860 | 0.013 |
| <i>C. scutulatus</i> | 0.742 | 0.015 |
| <i>C. simus</i> | 0.638 | 0.076 |
| <i>C. tzabcan</i> | 0.761 | 0.019 |

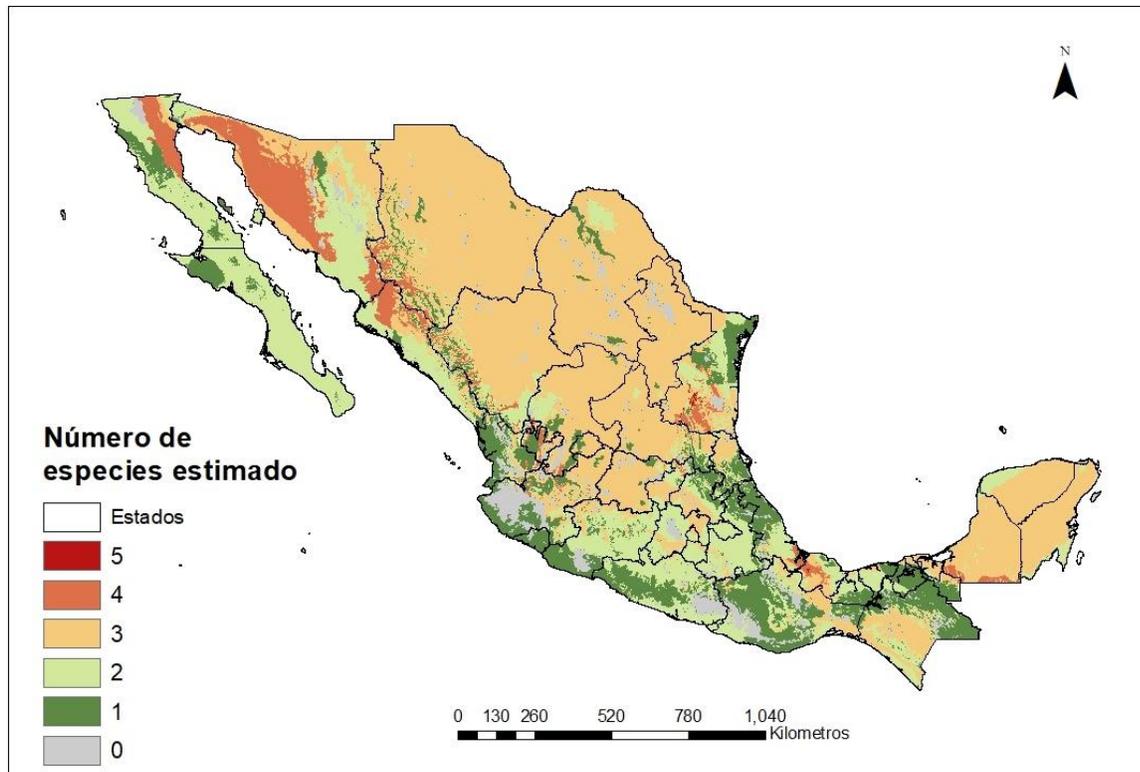


Figura 3. Riqueza estimada de serpientes de importancia médica consideradas para el estudio en México.

La mayor riqueza estimada de serpientes de importancia médica consideradas como relevantes en el presente estudio se encontró en los estados de Tamaulipas y Veracruz, mientras que Sonora cuenta con 4 especies en la mayoría de su superficie (Figura 3). Por el contrario, el menor número de especies se predijo en la parte central del país, algunas áreas de Baja California, en el Golfo de México y en el Pacífico. En general son zonas de baja altitud y cercanas a la costa.

En el análisis de correlación de variables primero se analizó la incidencia a nivel estatal. Con el conjunto de variables biológicas la media de idoneidad ambiental de *A. bilineatus*, *A. russeolus*, *A. taylori*, *B. asper*, *C. atrox* y *C. enyo* tuvo una correlación de $\rho=0.4963$ con la incidencia de mordeduras de serpiente. Por su parte, las medianas de idoneidad ambiental de *A. bilineatus*, *A. russeolus*, *A. taylori* y *B. asper* se correlacionan con $r=0.3048$. En cuanto a las variables ambientales la correlación mayor resultó ser $r=0.32$ con las medias estatales de precipitación y temperatura. Por último, de las variables sociales, la combinación que mejor se correlaciona son Población urbana, Ingreso municipal bajo la línea de bienestar, Población

total calculada, Población rural, Ingreso per cápita bajo la línea de bienestar y Rezago social con un valor de $r=0.54$, todas con $P<0.05$.

Con las especies seleccionadas, se realizó un GLM para la combinación de medias y otro para la combinación de medianas de la idoneidad para ver cuáles eran significativas para el modelo. Se optó por la combinación de medias (*A. bilineatus*, *A. russeolus*, *A. taylori*, *B. asper*, *C. atrox* y *C. enyo*) debido a que el efecto de todas las serpientes fue altamente significativo ($P<2.21e-07$) sobre la incidencia, con excepción de *A. russeolus* ($P=0.853$) y *C. enyo*, la cual fue negativa y el AIC=4066.7 por parte de las medias, menor en comparación con las medianas con un valor de AIC=5078.8.

Al aumentar las variables sociales y depurarse el conjunto con las idoneidades medias de las serpientes, se obtuvo un nuevo GLM binomial explicando la relación entre el total de casos y la población calculada con las variables: *A. bilineatus*, *A. taylori*, *B. asper*, *C. atrox*, población urbana, ingreso mensual bajo el nivel medio de bienestar municipal, población total e índice de rezago social. Para este caso todas las variables fueron altamente significativas ($P<0.003$) con una devianza nula de: 5424.6 en 31 grados de libertad y devianza residual de: 1678.6 en 23 grados de libertad. Estas variables fueron utilizadas para generar un modelo de regresión logística binomial en un marco jerárquico bayesiano, considerando la correlación espacial. El modelo se generó con 100001:199996 iteraciones, una tasa de adelgazamiento igual a cinco, con una cadena de tamaño 20000 (Cuadro 7).

Cuadro 7. Valores de la mediana y los intervalos de credibilidad de cada variable obtenidos en el modelo de regresión logística espacialmente explícito.

| Efectos por variable | Intercepto de variables | Media de <i>A. bilineatus</i> | Media de <i>A. taylori</i> | Media de <i>B. asper</i> | Media de <i>C. atrox</i> | Población urbana | Ingreso mensual bajo el nivel medio de bienestar municipal | Población total | Rezago Social | Efecto espacial aleatorio asociado a cada entidad | Devianza |
|-----------------------------|-------------------------|-------------------------------|----------------------------|--------------------------|--------------------------|------------------|------------------------------------------------------------|-----------------|---------------|---------------------------------------------------|----------|
| Mediana | -10.112 | -0.3378 | -1.457 | 1.0618 | 0.1244 | 0.02854 | 3.052 | -1.1324 | -1.205 | 1.3695 | 261.9 |
| Intervalo inferior de 2.5% | -10.998 | -1.3490 | -4.643 | -0.3295 | -0.6439 | -0.77465 | 2.607 | -2.0820 | -1.454 | 1.1275 | 256.5 |
| Intervalo superior al 97.5% | -9.829 | 0.4175 | 2.105 | 2.8081 | 1.6950 | 0.97513 | 3.610 | -0.4956 | -0.901 | 1.6865 | 267.9 |

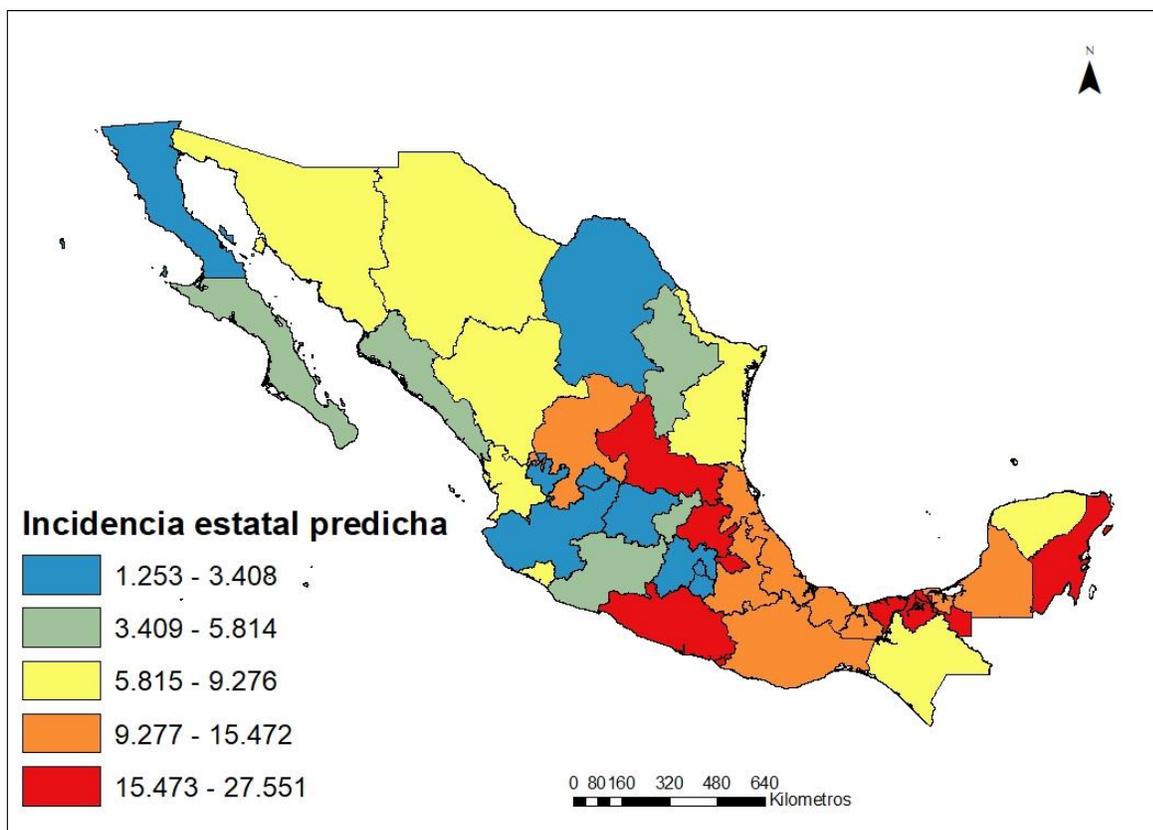


Figura 4. Incidencia de mordeduras de serpiente por estado en México predicha por el modelo de regresión logística binomial espacialmente explícito de incidencia estatal predicha.

Los 32 estados conservaron su categoría de incidencia con respecto a la incidencia observada y se mantuvieron en el mismo lugar que ocupan con respecto a las mordeduras de serpiente entre su población total (Figura 4).

En la siguiente escala de análisis, la municipal, de la misma manera que en la escala estatal, se analizaron los tres grupos de variables (ambientales, sociales y biológicas) de forma independiente. Nuevamente el grupo de variables biológicas se analizó primero, de este nuevamente la combinación de la media de idoneidad ambiental de *A. bilineatus*, *A. russeolus*, *A. taylori*, *B. asper*, *C. atrox* y *C. enyo* obtuvo el valor de correlación más alto $r=0.259$ con la incidencia de mordeduras de serpiente. Por su parte, la combinación de medianas de idoneidad ambiental de *A. bilineatus*, *A. taylori* y *B. asper* obtuvo el valor de correlación más alto de $r=0.259$. En cuanto a las variables ambientales la correlación mayor resultó ser $r=0.194$ con únicamente la precipitación promedio anual. Por último, se abordaron las variables sociales, de las cuales la combinación de las misma que mejor se correlaciona, aunque dicha correlación

es baja, es Población total, Población urbana, e Ingreso per cápita bajo la línea de bienestar con un valor de $r=0.336$ todas con $P<0.05$.

Al no encontrarse una relación entre la incidencia de accidentes ofídicos y la mayoría de las variables explicativas se desarrolló una correlación con los servicios de salud disponibles por municipio, utilizando las variables de Servicios de salud por persona, $\rho=0.262$ ($P< 2.2e-16$) y Porcentaje de población con algún servicio de salud, $\rho=-0.066$ ($P=0.0001$), resultando únicamente una pequeña correlación con los servicios de salud disponibles por persona.

De igual manera que con la escala anterior, con las especies seleccionadas previamente, se realizó un GLM para la combinación de medias y otro para la combinación de medianas de la idoneidad. En este caso, se optó por probar con la combinación de medianas (*A. bilineatus*, *A. taylori* y *B. asper*) con alta significancia en todas las variables ($P<4.72e-08$), $AIC=127833$ y la combinación de medias (*A. bilineatus*, *A. russeollus*, *A. taylori*, *B. asper*, *C. atrox* y *C. enyo*), significancia ($P<2e-16$) en todas las especies y $AIC=126341$ al ser muy parecidos ambos conjuntos de serpientes. Al aumentar las variables sociales y depurarse el conjunto con las idoneidades medias de las serpientes, se obtuvieron dos nuevos GLMs binomiales explicando la relación entre el total de casos y la población calculada con las variables. Sin embargo, el mejor modelo fue el de la combinación de medias con: *A. taylori* y *B. asper*, Población total calculada, Población total, Población urbana e Ingreso mensual bajo el nivel medio de bienestar municipal. Dónde todas las variables fueron altamente significativas ($P<0.0001$) con una devianza nula de: 21838 con 2007 grados de libertad y devianza residual de: 15595 con 2001 grados de libertad.

Por último, estas variables fueron utilizadas para generar un modelo de regresión logística binomial en un marco jerárquico bayesiano, considerando la correlación espacial. Sin embargo dicho modelo no logró explicar la incidencia municipal satisfactoriamente. La devianza no se pudo calcular para ningún intervalo y la correlación con la incidencia observada fue de únicamente $r=0.381$ y $P< 2.2e-16$.

Discusión

Panorama epidemiológico

En el periodo de estudio (2016-2018) los cuatro estados con más casos reportados fueron: Veracruz con 1106, Oaxaca con 960, Puebla con 829 y San Luis Potosí con 780; y parecen mantenerse, siendo prácticamente los mismos que en épocas anteriores, ya que en el lapso

transcurrido entre 2003 y 2007, los estados con mayor número de accidentes fueron Oaxaca, con 2266 y Veracruz con 2231; seguidos de San Luis Potosí, Hidalgo y Puebla (Hernández y Bravo 2009). Esto posiblemente se debe a que son estados que poseen una combinación de presencia de varias especies de importancia médica con factores sociales, como: altos índices de rezago social y bajos ingresos, gran parte de su población en condiciones rurales, situaciones que se ven asociadas con el nivel de accidentes totales en la escala estatal (Figura 1). Este patrón se modifica al considerar la población total de cada estado, ya que al considerar la incidencia y no los casos totales, la lista de estados afectados cambia considerablemente, debido a que así es posible comparar densidades poblacionales diferentes.

En cuanto a la escala municipal únicamente 996 municipios reportaron de 1 a 321 casos, lo que representa el 40% de los municipios en México. Entre los diez municipios con más casos, la mitad de estos resaltan por ser municipios con cabeceras de distrito, ciudades grandes o que incluso albergan capitales estatales como Monterrey, Nuevo León; Centro, Tabasco; Hermosillo, Sonora; Poza Rica, Veracruz; y Zacapoaxtla, Puebla. Aunado a la pequeña correlación con la incidencia y los servicios de salud disponibles, sugiere que los accidentes no ocurren precisamente dónde se registran, sino que ocurren en lugares sin servicios de salud disponibles para atender el accidente ofídico, lo que pone de manifiesto la carencia de los recursos para atender y registrar fidedignamente los casos. Esto, además de deficiencias en censos poblacionales en gran parte del país, dificulta en gran medida el cálculo de incidencias; sobre todo, en los estados del Pacífico sur, como Guerrero, Chiapas y Oaxaca, ya que no se puede calcular dicho indicador sin un valor de población total o uno muy por debajo de la realidad. Para tener una estimación más precisa de la incidencia se intentó utilizar las poblaciones calculadas por luces. Sin embargo, esta aproximación resultó complicada en ciertos municipios, debido a la heterogeneidad en las condiciones sociales de ciertas poblaciones, por ejemplo: en zonas rurales poco más del 50% de las personas vive en condiciones de pobreza extrema, por lo que no cuentan con energía eléctrica en sus hogares y, por lo tanto, carecen de alumbrado eléctrico (INEGI 2010; FAO 2018). Por eso, estimamos que el cálculo es mucho menor al de la población real. Sin embargo, se observó que la mayoría de los municipios con incidencia más alta, se encuentran en Oaxaca y pocos en Puebla, haciendo posible observar que los municipios con más accidentes y los que tienen mayores incidencias son diferentes.

Análisis correlativo y espacialmente explícito de la incidencia de mordeduras de serpientes venenosas en México

En la escala estatal se encontró un conjunto de especies que se explican la incidencia de casos (*A. bilineatus*, *A. russeolus*, *A. taylori*, *B. asper*, *C. atrox* y *C. enyo*). Estas especies parecen concordar con un trabajo anterior (Hernández y Bravo 2009) donde la presencia *A. bilineatus*, *A. russeolus*, *A. taylori* (antes *A. bilineatus* para México), *B. asper* y *C. atrox*, son factores relacionados con las mordeduras en los lugares donde se distribuyen. Por su parte, *C. enyo* tiene una relación negativa con la incidencia. Probablemente explicado por su sobrelape con *C. atrox* en la península de Baja California, o por ser en sí la península una zona de baja incidencia, por lo que fue retirada para el modelo final y se conservaron únicamente las especies con una correlación positiva y altamente significativa.

En cuanto a las variables sociodemográficas se observó un efecto positivo de la población urbana, ingreso mensual bajo el nivel medio de bienestar municipal, población total e índice de rezago social, aunque podría suceder también por la multicolinealidad de estas variables (Alin 2010). En la mayoría de estudios la población urbana tiene un efecto negativo sobre la incidencia, contrario a lo que se observó en el presente estudio (Yañez-Arenas *et al.* 2018; Chaves *et al.* 2015). Sin embargo, esto podría explicarse por el registro de los accidentes en los hospitales urbanos de las ciudades más grandes cercanas a las localidades donde aconteció un accidente y no por que sucedan precisamente dónde son reportadas (Almaraz-Vidal en 2016). Esta situación, aunada al acceso a servicios de transporte e información, podrían contribuir en estudios a futuro.

Al aumentar la resolución espacial de análisis y analizar la incidencia de mordeduras de serpientes municipalmente, se observó el mismo patrón registrado por otros estudios. En los que se ha observado que al aumentar la población, los casos y la incidencia aumenta hasta cierto punto, cuando las zonas dejan de ser rurales y se vuelven urbanas, ya que las zonas rurales densamente pobladas son las que parecen tener el mayor número de incidentes, sobre todo debido a las actividades agrícolas que se realizan en estos lugares (Bochner *et al.* 2004; Chippaux 2012; Zúñiga-Carrasco y Caro-Lozano 2013). Otro factor que podría tener cierta influencia, es el tamaño de la población humana en sí, independientemente de la condición rural o urbana, ya que tamaños poblacionales grandes dejan pocos espacios de interacción con otros organismos. Por ejemplo: las poblaciones de vipéridos se ven afectadas por el impacto humano, al igual que muchas otras especies (Jochimsen 2005). Sin embargo, en esta escala, se encontró una baja correlación espacializada ($r=0.38$) entre las variables y dicha

incidencia. Lo cual se podría explicar por el sesgo en el muestro de accidentes ofídicos, ya que no todos los estados cuentan con las mismas facilidades de acceso a servicios de salud en todos sus municipios (INEGI 2010). Entonces se podría estar calculando una incidencia que no refleja en su totalidad la realidad de los accidentes ofídicos en una escala fina delimitada por el hombre, lo que hace muy complicado identificar las variables involucradas.

En cuanto a la riqueza de especies no se encontró una correlación con la incidencia en ninguna de las dos escalas de estudio. Esto debido a que de acuerdo a los resultados del presente trabajo, el ofidismo en México no se ve afectado por el número de especies que se distribuyen en un área; sino que principalmente se debe a la presencia de cinco especies (*A. bilineatus*, *A. taylori*, *B. asper*, *C. atrox* y *C. enyo*), las cuales raramente son simpátricas e incluso la mayoría del país cuenta con distribución de tres especies de importancia médica (Fig. 3).

Por último, convendría realizar análisis más detallados y con escalas más naturales que las divisiones políticas, para identificar factores biológicamente relevantes. Por otra parte, es necesario estudiar las dinámicas temporales del ofidismo, para entender, no sólo dónde ocurren los accidentes, sino cuándo. Además, resultaría útil compararlo con fenómenos similares, como los envenenamientos por arácnidos, los ataques provocados por fauna feral y natural (i.e. perros, roedores, etc.) para saber si existen patrones que determinen el número de accidentes en un área y así poder hacer programas de prevención social especializados.

Conclusiones

- Los estados que más casos registran entre los años 2016 y 2018 son: Veracruz, Oaxaca y Puebla.
- Los estados con una mayor incidencia de ofidismo entre 2016 y 2018 son: San Luis Potosí, seguido de Hidalgo y finalmente Quintana Roo.
- Únicamente 996 municipios de los 2 463 estudiados reportaron de 1 a 321 casos de mordedura de serpiente.
- Los municipios con más accidentes reportados entre 2016 al 2018 fueron: Centro, Tabasco; Ciudad Valles y San Luis Potosí, San Luis Potosí.
- Los municipios con mayores valores de incidencia fueron Santa Ana Ateixtlahuaca, Tamazulápam del Espíritu Santo, Pinotepa de Don Luis, los tres en el estado de Oaxaca.
- En México los accidentes no suelen reportarse en el municipio del accidente, si no el que cuente con los servicios de salud adecuados.

- *A. bilineatus*, *A. taylori*, *B. asper*, *C. atrox* son las serpientes que causan la mayoría de los accidentes en México y se correlacionan directamente con la cantidad de estos.
- Para estimar la incidencia de mordeduras de serpientes en alguno de los estados del país es conveniente considerar la favorabilidad ambiental de las especies: *A. bilineatus*, *A. taylori*, *B. asper* y *C. atrox*, además de los indicadores de población urbana, ingreso mensual bajo el nivel medio de bienestar municipal, población total calculada e índice de rezago social.
- Para estimar la correlación a nivel municipal de manera adecuada, es conveniente usar otro tipo de análisis y principalmente datos obtenidos en el lugar del accidente.

Referencias Bibliográficas

- Alin, A. (2010). Multicollinearity. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Computational Statistics*, 2(3), 370-374.
- Alirol, E., Sharma, S. K., Bawaskar, H. S., Kuch, U., & Chappuis, F. (2010). Snake bite in South Asia: a review. *PLoS Neglected Tropical Diseases*, 4, e603.
- Almaraz-Vidal, D. (2016) Las serpientes venenosas de importancia médica de la región de Las Grandes Montañas de Veracruz, México: aspectos ecológicos y accidentes ofídicos. *Venomous snakes of medical importance in the region of Grandes Montañas of Veracruz, Mexico: ecological aspects and ophidian accidents.*
- Bastos, E. G. D. M., de Araújo, A. F., & Silva, H. R. D. (2005). Records of the rattlesnakes *Crotalus durissus terrificus* (Laurenti)(Serpentes, Viperidae) in the State of Rio de Janeiro, Brazil: a possible case of invasion facilitated by deforestation. *Revista Brasileira de Zoologia*, 22(3), 812-815.
- Blair, C., & Sánchez-Ramírez, S. (2016). Diversity-dependent cladogenesis throughout western Mexico: evolutionary biogeography of rattlesnakes (Viperidae: Crotalinae: *Crotalus* and *Sistrurus*). *Molecular Phylogenetics and Evolution*, 97, 145-154.
- Bochner, R., & Struchiner, C. J. (2004). Aspectos ambientais e socioeconômicos relacionados à incidência de acidentes ofídicos no Estado do Rio de Janeiro de 1990 a 1996: uma análise exploratória. *Cadernos de Saúde Pública*, 20, 976-985.
- Bolaños, R. (1982). Las serpientes venenosas de Centroamérica y el problema del ofidismo. Primera parte. Aspectos zoológicos, epidemiológicos y biomédicos. *Revista Costarricense de Ciencias Médicas*, 3, 165-184.

- Boria, R. A., Olson, L. E., Goodman, S. M., & Anderson, R. P. (2014). Spatial filtering to reduce sampling bias can improve the performance of ecological niche models. *Ecological Modelling*, 275, 73-77.
- Bravo-Vega, C. A., Cordovez, J. M., Renjifo-Ibáñez, C., Santos-Vega, M., & Sasa, M. (2019). Estimating snakebite incidence from mathematical models: A test in Costa Rica. *PLoS neglected tropical diseases*, 13(12), e0007914.
- Brown, J. L., & Anderson, B. (2014). SDMtoolbox: a python-based GIS toolkit for landscape genetic, biogeographic and species distribution model analyses. *Methods in Ecology and Evolution* 5: 694–700.
- Castro, E. E. N., Valle, M. B., & Cano, A. A. (2014). Reptiles venenosos en México.
- Chaves, L. F., Chuang, T. W., Sasa, M., & Gutiérrez, J. M. (2015). Snakebites are associated with poverty, weather fluctuations, and El Niño. *Science Advances*, 1(8), e1500249.
- Chippaux, J. P. (2012). Epidemiology of snakebites in Europe: a systematic review of the literature. *Toxicon*, 59, 86-99.
- Chippaux, J. P. (2017). Incidence and mortality due to snakebite in the Americas. *PLoS Neglected Tropical Diseases*, 11, e0005662.
- Cobos, M. E., Peterson, A. T., Barve, N., & Osorio-Olvera, L. (2019). kuenm: an R package for detailed development of ecological niche models using Maxent. *PeerJ*, 7, e6281.
- Colwell, R. K., & Rangel, T. F. (2009). Hutchinson's duality: the once and future niche. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 106, 19651-19658.
- CONANP. (2019). Programa de Acción para la Conservación de las Especies (PACE): Serpientes de Cascabel (*Crotalus* spp.).
- CONABIO. (2018). Portal de geoinformación 2018. Sistema nacional de información sobre la biodiversidad (SNIB).
- Cuellar Gordo, L. C., Amador Orozco, B., Olivares Goenaga, G., Borré Ortiz, Y. M., & Pinedo Otálvaro, J. (2016). Comportamiento epidemiológico del accidente ofídico en el Departamento del Magdalena, Colombia (2009-2013). *Revista Ciencias de la Salud*, 14.
- Da Costa, M. K. B., da Fonseca, C. S., Navoni, J. A., & Freire, E. M. X. (2019). Snake bite accidents in Rio Grande do Norte state, Brazil: Epidemiology, health management and influence of the environmental scenario. *Tropical Medicine & International Health*, 24, 432-441.

- Dehghani, R., Rabani, D., Shahi, M. P., Jazayeri, M., & Bidgoli, M. S. (2012). Incidence of snake bites in kashan, iran during an eight year period 2004-2011. *Archives of Trauma Research*, 1, 67.
- de Torrent, R., Raquel, M., Ulón, S. N., & Sario, H. M. (2004). Epidemiológica del accidente ofídico en la provincia de Corrientes.
- Ediriweera, D. S., Kasturiratne, A., Pathmeswaran, A., Gunawardena, N. K., Wijayawickrama, B. A., Jayamanne, S. F., ... & Lalloo, D. G. (2016). Mapping the risk of snakebite in Sri Lanka-a national survey with geospatial analysis. *PLoS Neglected Tropical Diseases*, 10.
- Ellis, E., Goldewijk, S., Siebert, D. y Ramankutty, N. (2013). Anthropogenic Biomes of the World, Version 2, (2000). Palisades, NY: NASA Socioeconomic Data and Applications Center (SEDAC).
- Elith, J., & Leathwick, J. R. (2009). Species distribution models: ecological explanation and prediction across space and time. *Annual review of ecology, evolution, and systematics*, 40, 677-697.
- Elton, C. S. (1927). Animal ecology. University of Chicago Press.
- Fajardo-Gutiérrez, A. (2017). Medición en epidemiología: prevalencia, incidencia, riesgo, medidas de impacto. *Revista Alergia México*, 64, 109-120.
- FAO. (2018). México rural del siglo XXI. Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. *Pobreza y Ruralidad*, 8.
- Fernández-Badillo, L., Manríquez-Morán, N. L., Castillo-Cerón, J. M., & Goyenechea, I. (2016). Análisis herpetofaunístico de la zona árida del estado de Hidalgo. *Revista mexicana de biodiversidad*, 87, 156-170.
- Flores Villela, O. (1993). Herpetofauna mexicana: lista anotada de las especies de anfibios y reptiles de México, cambios taxonómicos recientes, y nuevas especies= Annotated list of the species of amphibians and reptiles of Mexico, recent taxonomic changes, and new species. Pittsburgh: Carnegie Museum of Natural History.
- Flores-Villela, O., & Canseco-Márquez, L. (2004). Nuevas especies y cambios taxonómicos para la herpetofauna de México. *Acta zoológica mexicana*, 20, 115-144.
- Gaffney, P. M. 1975. Roots of the niche concept. *American Naturalist* 109(968): 490.
- Gold, B. S., Dart, R. C., & Barish, R. A. (2002). Bites of Venomous Snakes. *New England Journal of Medicine*, 347(5), 347–356.

- González Rivera, A. (2009). Epidemiología de las mordeduras por serpiente. Su simbolismo.
- Grinnell, J. (1924). Geography and evolution. *Ecology*, 5(3), 225-229.
- Gutiérrez, J. M., Theakston, R. D. G., & Warrell, D. A. (2006). Confronting the neglected problem of snake bite envenoming: the need for a global partnership. *PLoS medicine*, 3, e150.
- Gutiérrez, J. M., Williams, D., Fan, H. W., & Warrell, D. A. (2010). Snakebite envenoming from a global perspective: Towards an integrated approach. *Toxicon*, 56(7), 1223-1235.
- Gutiérrez, J. M. (2011). Envenenamientos por mordeduras de serpientes en América Latina y el Caribe: Una visión integral de carácter regional. *Boletín de malariología y salud ambiental*, 51, 1-16.
- Harrison, R. A., Hargreaves, A., Wagstaff, S. C., Faragher, B., & Laloo, D. G. (2009). Snake envenoming: a disease of poverty. *PLoS Neglected Tropical Diseases*, 3, e569.
- Hernández, C. G. S., & Bravo, A. A. (2009). Mordeduras por serpiente venenosa: panorama epidemiológico en México. *Salud Pública de México*, 51, 95-96.
- INEGI (2010) Censo de población y vivienda.
- Jochimsen, D. M. (2005). Factors influencing the road mortality of snakes on the Upper Snake River Plain, Idaho.
- Karger, D.N., Conrad, O., Böhrer, J., Kawohl, T., Kreft, H., Soria-Auza, R.W., Zimmermann, N.E., Linder, H.P. & Kessler, M. (2017) Climatologies at high resolution for the earth's land surface areas. *Scientific Data* 4, 170122.
- Kasturiratne, A., Wickremasinghe, A. R., de Silva, N., Gunawardena, N. K., Pathmeswaran, A., Premaratna, R., ... & de Silva, H. J. (2008). The global burden of snakebite: a literature analysis and modelling based on regional estimates of envenoming and deaths. *PLoS Medicine*, 5, e218.
- Klauber, L. M. (1956). *Rattlesnakes* (Vol. 1). Univ of California Press.
- Leite, R. D. S., Targino, I. T. G., Lopes, Y. A. C. F., Barros, R. M., & Vieira, A. A. (2013). Epidemiology of snakebite accidents in the municipalities of the state of Paraíba, Brazil. *Ciencia & saude coletiva*, 18, 1463-1471.
- Longbottom, J., Shearer, F. M., Devine, M., Alcoba, G., Chappuis, F., Weiss, D. J., ... & Williams, D. J. (2018). Vulnerability to snakebite envenoming: a global mapping of hotspots. *The Lancet*, 392, 673-684.

- Luna-Bauza, M. E. (2007). Bases para el tratamiento por intoxicación por veneno de serpiente. *Rev Fac Med UNAM*, 50, 199-203.
- McCullagh, P., & Nelder, J. A. (1989). *Generalized linear models.*, 2nd edn.(Chapman and Hall: London). Standard book on generalized linear models.
- McCranie, J. R. (2011). *The snakes of Honduras: systematics, distribution, and conservation.* Society for the Study of Amphibians and Reptiles.
- McDiarmid, R.W., Campbell, J.A., Touré, T.A., 1999. *Snake Species of the World: A Taxonomic and Geographical Reference*, Vol. 1. The Herpetologists' League, Washington, D.C.
- Molesworth, A. M., Cuevas, L. E., Connor, S. J., Morse, A. P., & Thomson, M. C. (2003). Environmental risk and meningitis epidemics in Africa. *Emerging infectious diseases*, 9, 1287.
- Oliveira, M. E., & Martins, M. (2001). When and where to find a pitviper: activity patterns and habitat use of the lancehead, *Bothrops atrox*, in central Amazonia, Brazil. *Herpetological Natural History*, 8, 101-110.
- Paredes-García, D. M., Ramírez-Bautista, A., & Martínez-Morales, M. A. (2011). Distribución y representatividad de las especies del género *Crotalus* en las áreas naturales protegidas de México. *Revista mexicana de biodiversidad*, 82, 689-700.
- Persson, H. (2017). Clinical toxicology of snakebite in Europe. In *Handbook of clinical toxicology of animal venoms and poisons* (pp. 413-432). CRC Press.
- Phillips, S. J., & Dudík, M. (2008). Modeling of species distributions with Maxent: new extensions and a comprehensive evaluation. *Ecography*, 31, 161-175.
- Phillips, S. J., Dudík, M., & Schapire, R. E. (2017). Maxent software for modeling species niches and distributions (Version 3.4. 1). *Tillgänglig från url: http://biodiversityinformatics.amnh.org/open_source/maxent.*
- Porras, L. W., Wilson, L. D., Schuett, G. W., & Reiserer, R. S. (2013). A taxonomic reevaluation and conservation assessment of the common cantil, *Agkistrodon bilineatus* (Squamata: Viperidae): a race against time. *Amphibian & Reptile Conservation*, 7, 48-73.
- R Development Core Team (2019). *R: A language and environment for statistical computing.* R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. ISBN 3-900051-07-0, URL <http://www.R-project.org>.
- Sasa, M., Wasko, D. K., & Lamar, W. W. (2009). Natural history of the terciopelo *Bothrops asper* (Serpentes: Viperidae) in Costa Rica. *Toxicon*, 54, 904-922.

- Soberon, J., & Peterson, A. T. (2005). Interpretation of models of fundamental ecological niches and species' distributional areas.
- Soberón, J. (2007). Grinnellian and Eltonian niches and geographic distributions of species. *Ecology letters*, 10, 1115-1123.
- Tatem, A. J. (2017). WorldPop, open data for spatial demography. *Scientific data*, 4(1), 1-4.
- Tay Zavala, J., Sánchez Vega, J. T., Díaz Sánchez, J. G., Ruíz Sánchez, D. O. R. A., & Dora Castillo, L. (2002). Serpientes y reptiles de importancia médica en México. *Revista de la Facultad de Medicina*, 45.
- Title, P. O., & Bemmels, J. B. (2018). ENVIREM: an expanded set of bioclimatic and topographic variables increases flexibility and improves performance of ecological niche modeling. *Ecography*, 41, 291-307.
- Vaiyapuri, S., Vaiyapuri, R., Ashokan, R., Ramasamy, K., Nattamaisundar, K., Jeyaraj, A., & Hutchinson, E. G. (2013). Snakebite and its socio-economic impact on the rural population of Tamil Nadu, India. *PloS one*, 8, e80090.
- Vieilledent, G., Merow, C., Guélat, J., Latimer, A. M., Kéry, M., Gelfand, A. E., & Silander Jr, J. A. (2015). Hierarchical Bayesian species distribution models with the hSDM R Package.
- White, J. (1998). Envenoming and antivenom use in Australia. *Toxicon*, 36, 1483-1492.
- World Health Organization. (2007). Rabies and Envenomings. A Neglected Public Health Issue. World Health Organization, Geneva.
- Yañez-Arenas, C., Peterson, A. T., Mokondoko, P., Rojas-Soto, O., & Martínez-Meyer, E. (2014). The use of ecological niche modeling to infer potential risk areas of snakebite in the Mexican state of Veracruz. *PloS one*, 9(6), e100957.
- Yañez-Arenas, C., Yañez-Arenas, A., & Martínez-Ortiz, D. (2016). Panorama epidemiológico de las mordeduras por serpiente venenosa en el estado de Yucatán, México (2003-2012). *Gaceta Médica de México*, 152, 568-574.
- Yañez-Arenas, C. (2014). Análisis temporal y geográfico del envenenamiento por mordedura de serpiente en Veracruz, México (2003-2012). *Gaceta Médica de México*, 150, 60-64.
- Yañez-Arenas, C., Díaz-Gamboa, L., Patrón-Rivero, C., López-Reyes, K., & Chiappa-Carrara, X. (2018). Estimating geographic patterns of ophidism risk in Ecuador. *Neotropical Biodiversity*, 4, 55-61.

- Zúñiga Carrasco, I. R., & Caro Lozano, J. (2013). Aspectos clínicos y epidemiológicos de la mordedura de serpientes en México. *Evidencia médica e Investigación en Salud*, 6, 125-136.

En línea

- EUPATI (2015). Conceptos epidemiológicos: incidencia y prevalencia. Visto en <https://www.eupati.eu/es/farmacoepidemiologia-es/conceptos-epidemiologicos-incidencia-y-prevalencia/> el (20-12-2020)
- Uetz, P., Freed, P. & Hošek, J. (2020) The Reptile Database. Visto en <http://www.reptile-database.org> el (16-03-2021)

Anexos

Modelos de distribución de las 12 especies en las cuales se basaron los análisis presentados.

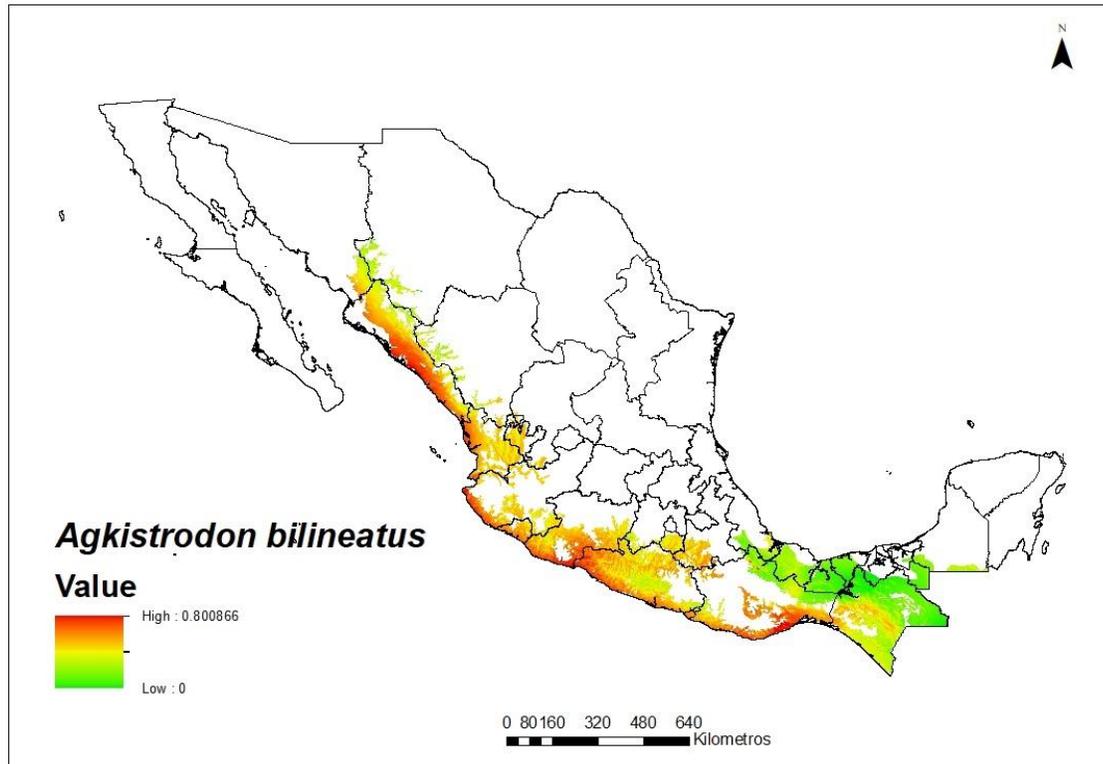


Figura 5. Modelo de Distribución con idoneidad ambiental de *A. bilineatus*.

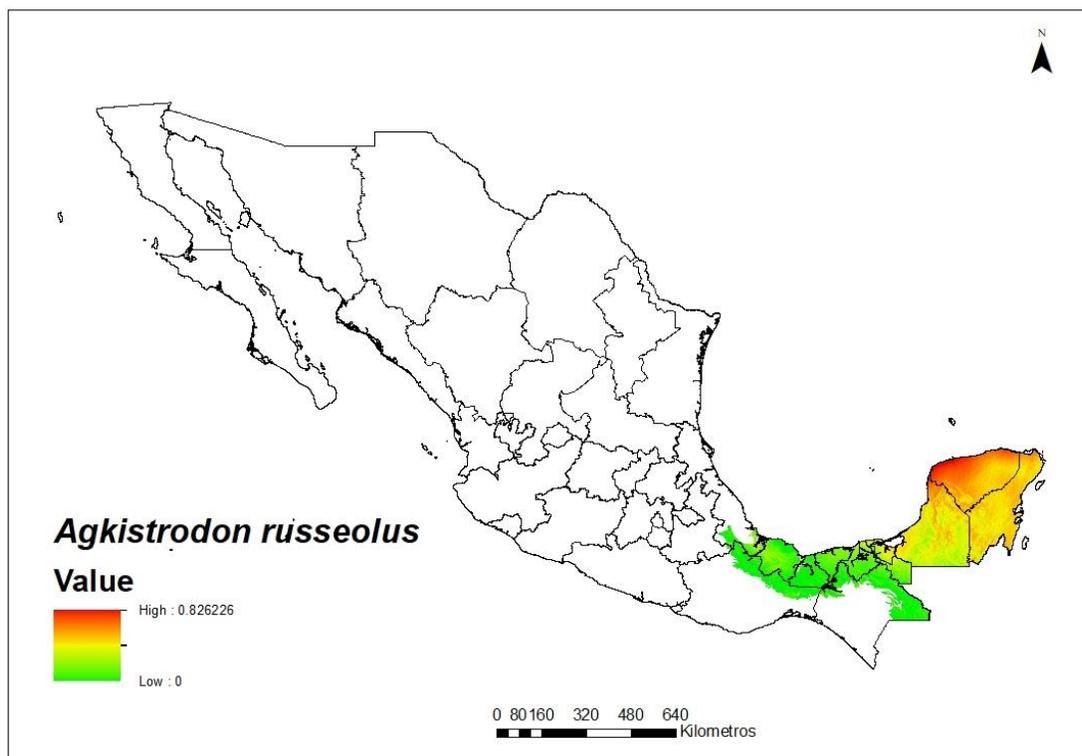


Figura 6. Modelo de Distribución con idoneidad ambiental de *A. russeolus*.

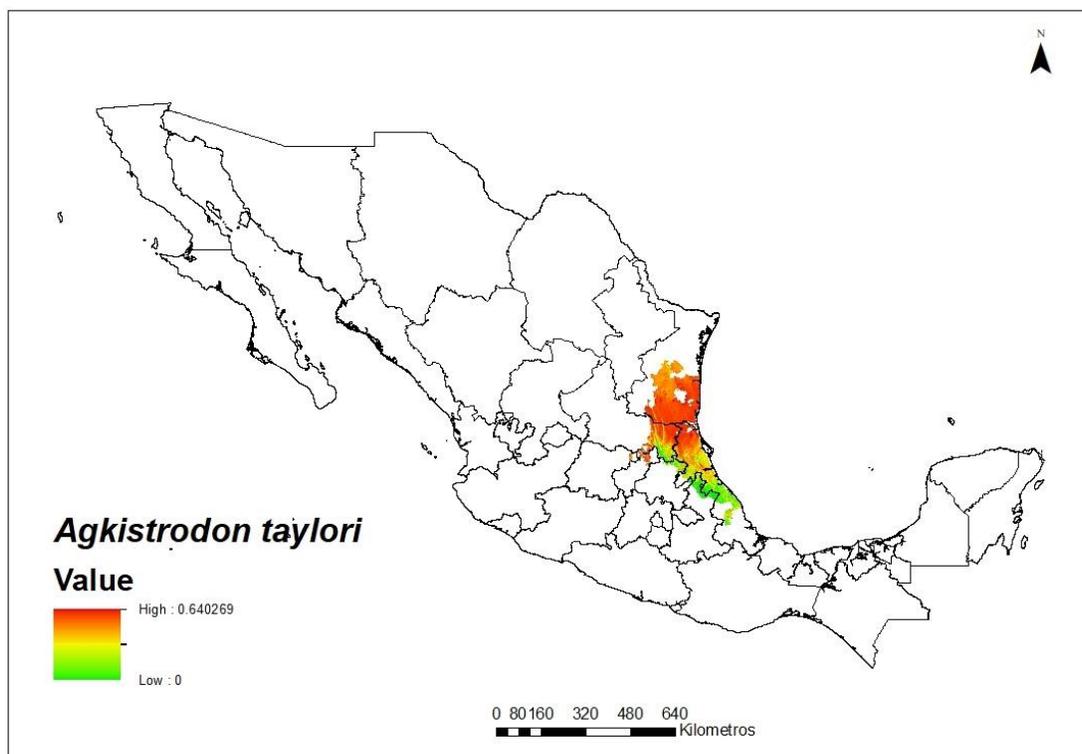


Figura 7. Modelo de Distribución con idoneidad ambiental de *A. taylori*.

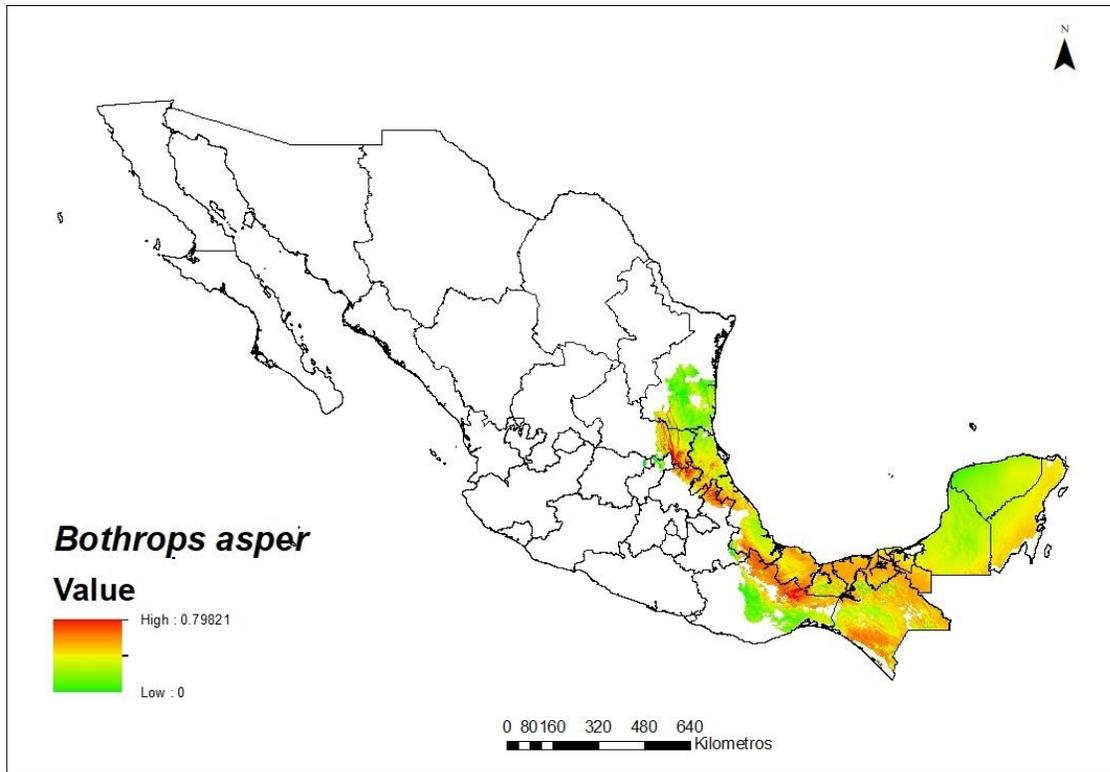


Figura 8. Modelo de Distribución con idoneidad ambiental de *B. asper*.

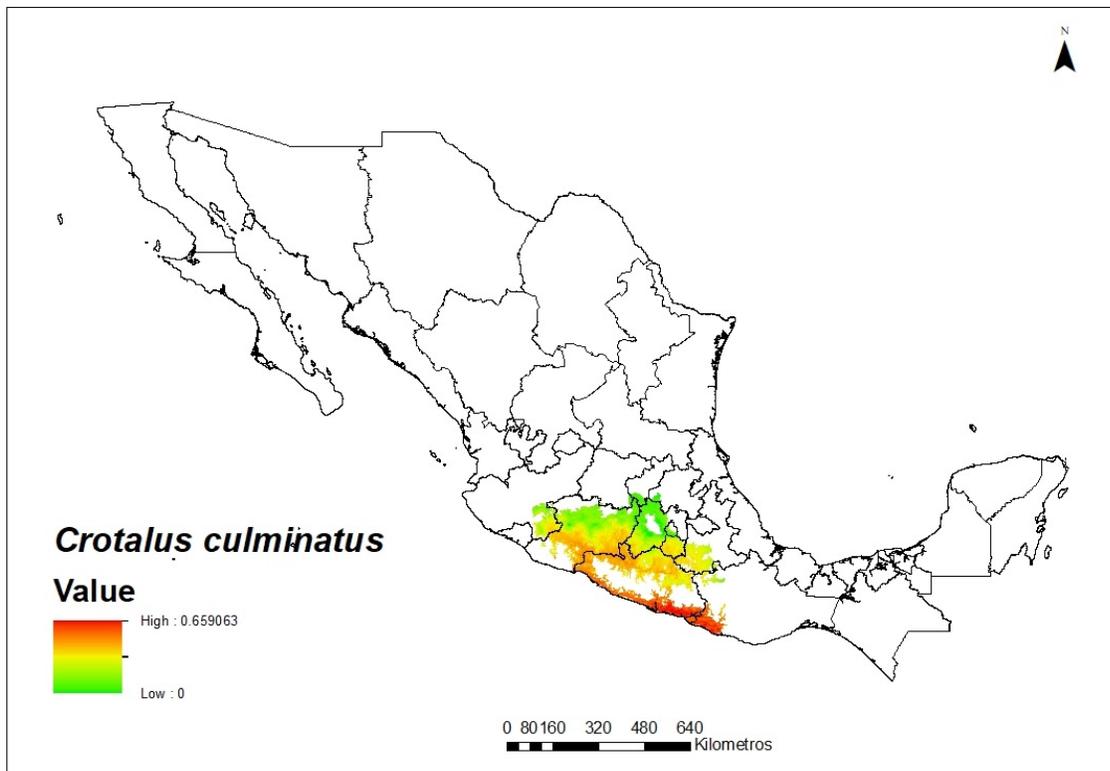


Figura 9. Modelo de Distribución con idoneidad ambiental de *C. culminatus*.

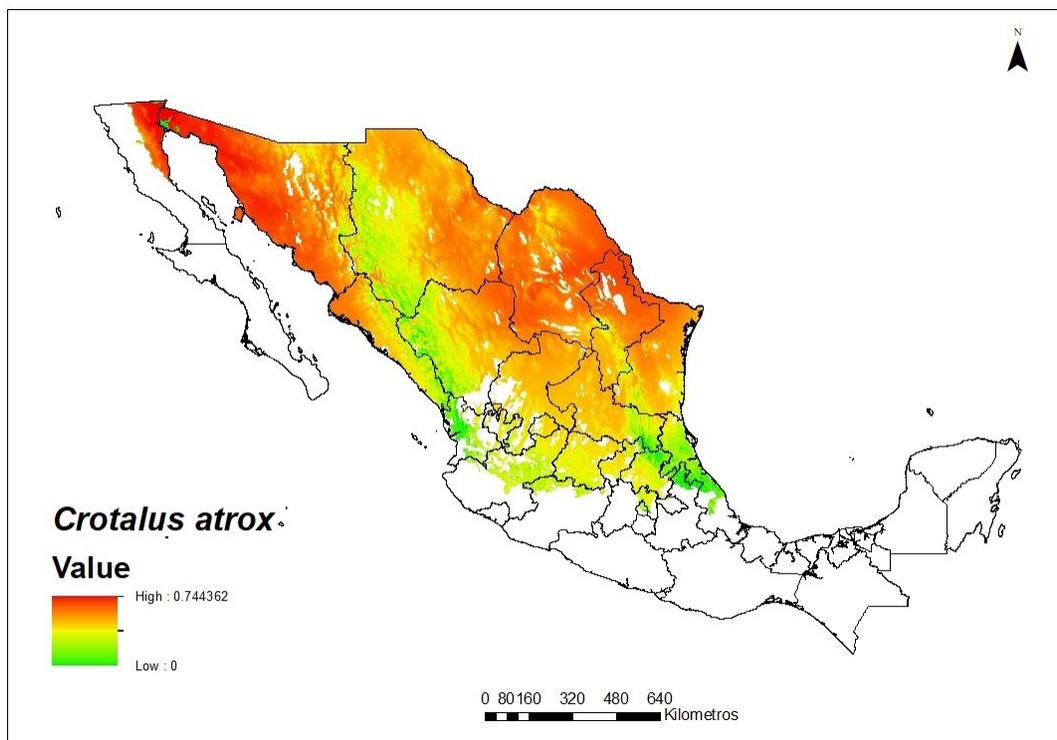


Figura 10. Modelo de Distribución con idoneidad ambiental de *C. atrox*.

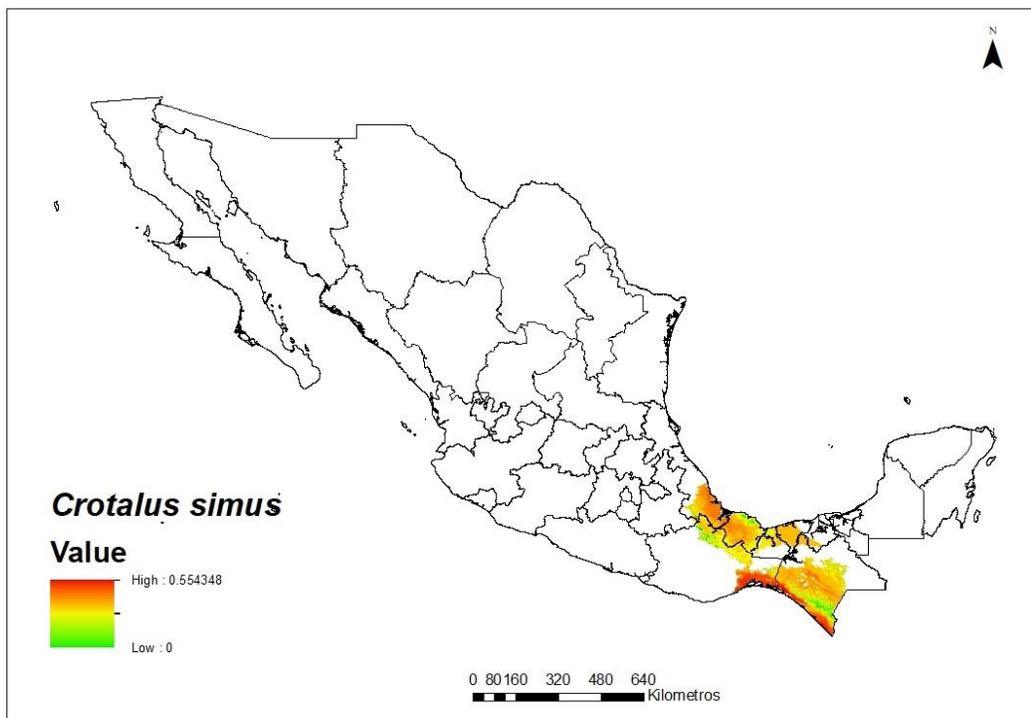


Figura 11. Modelo de Distribución con idoneidad ambiental de *C. simus*.

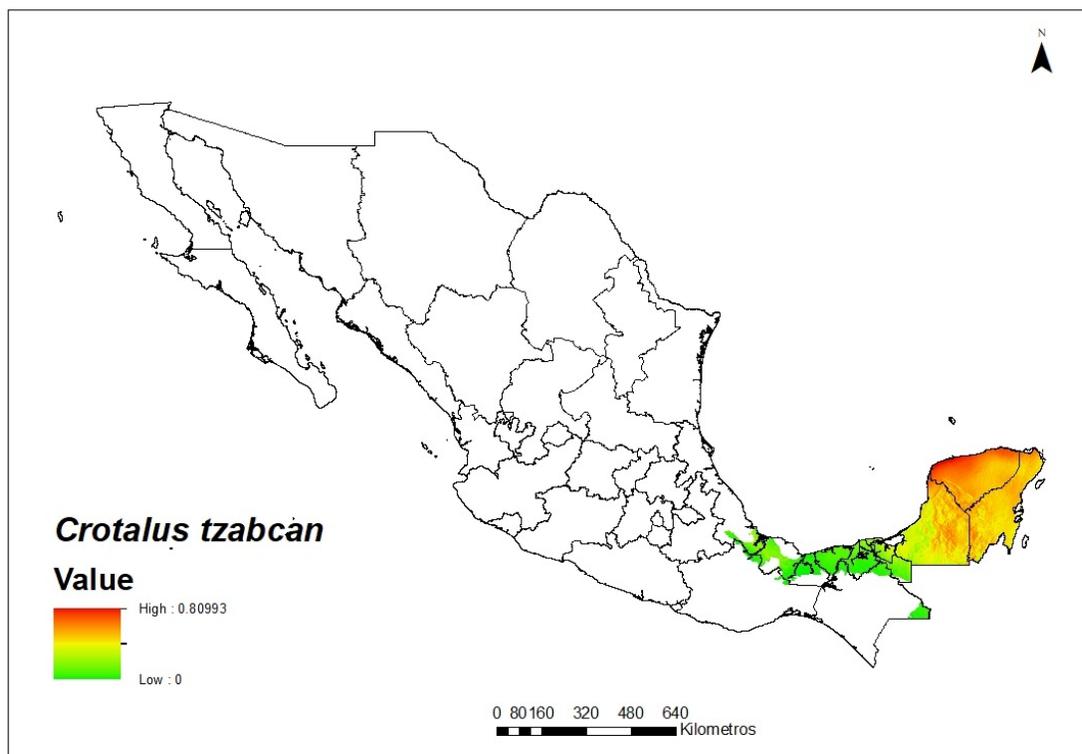


Figura 12. Modelo de Distribución con idoneidad ambiental de *C. tzabcan*.

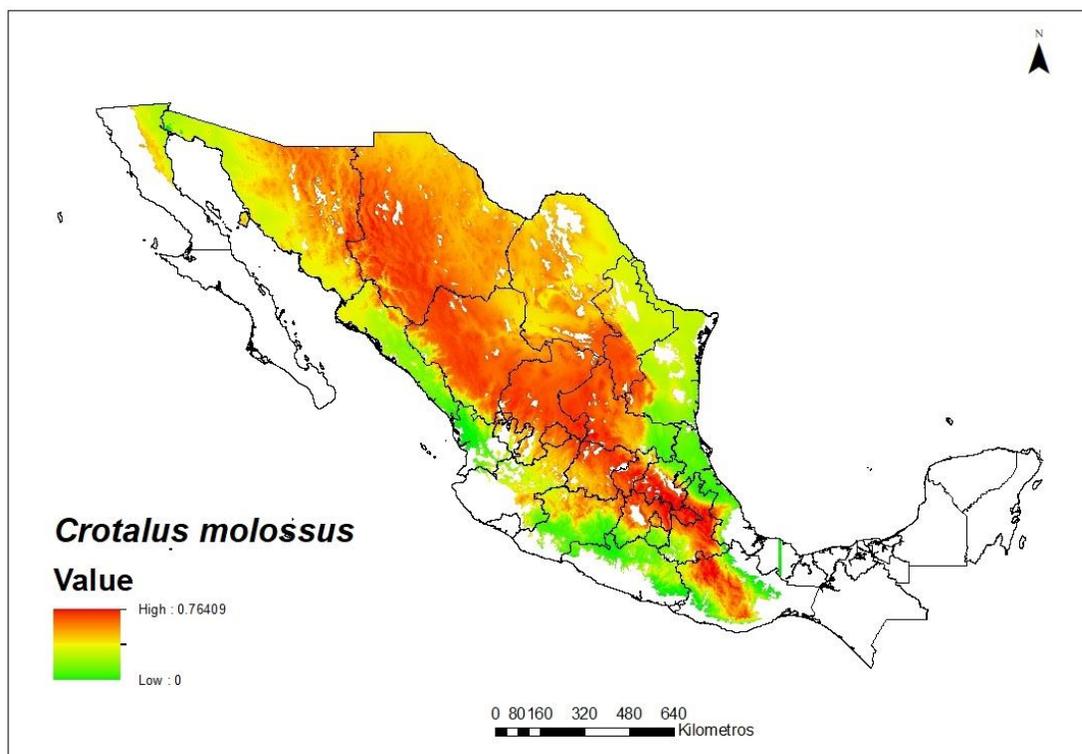


Figura 13. Modelo de Distribución con idoneidad ambiental de *C. molossus*.

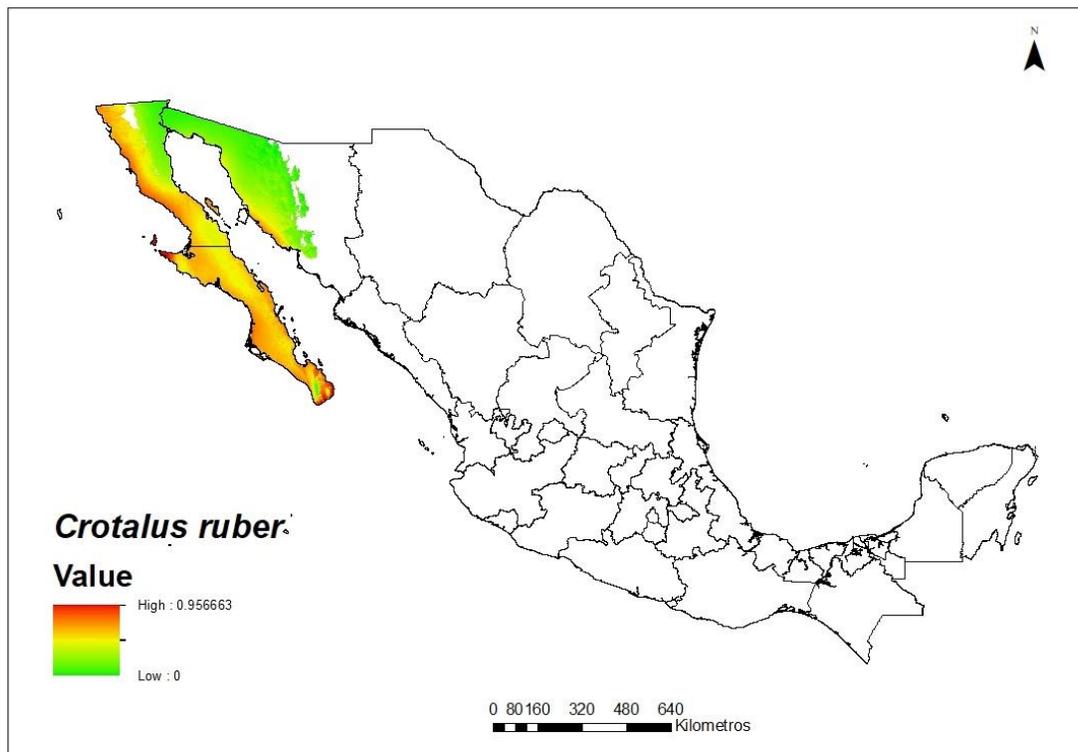


Figura 14. Modelo de Distribución con idoneidad ambiental de *C. ruber*.

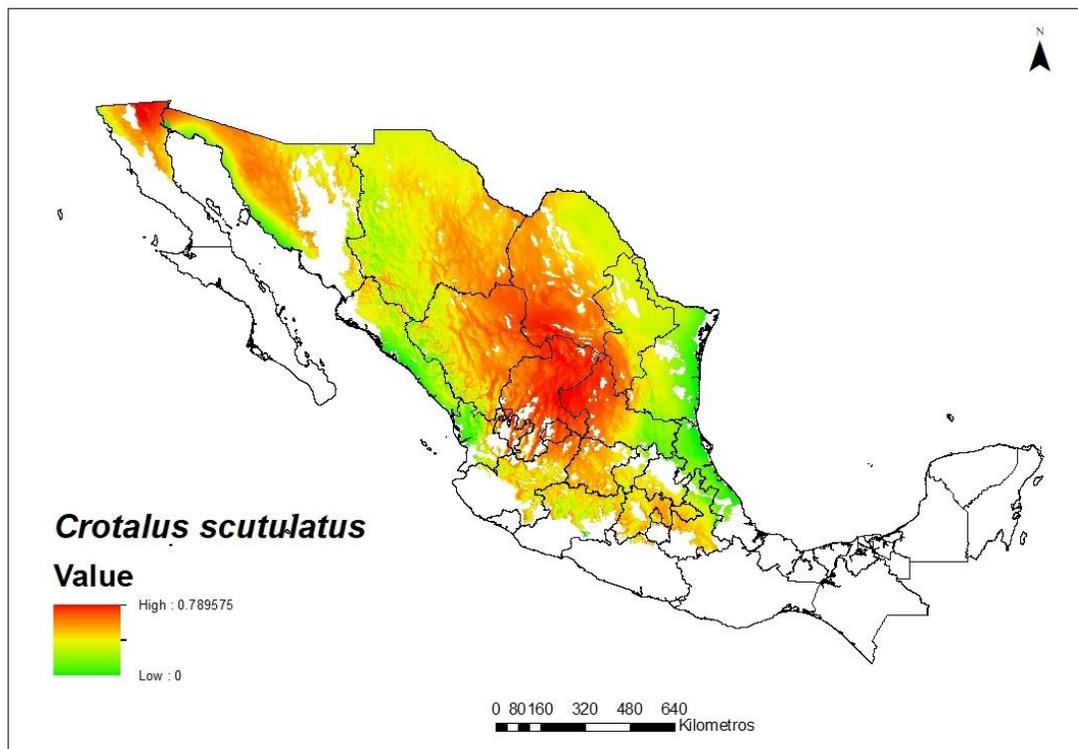


Figura 15. Modelo de Distribución con idoneidad ambiental de *C. scutulatus*.

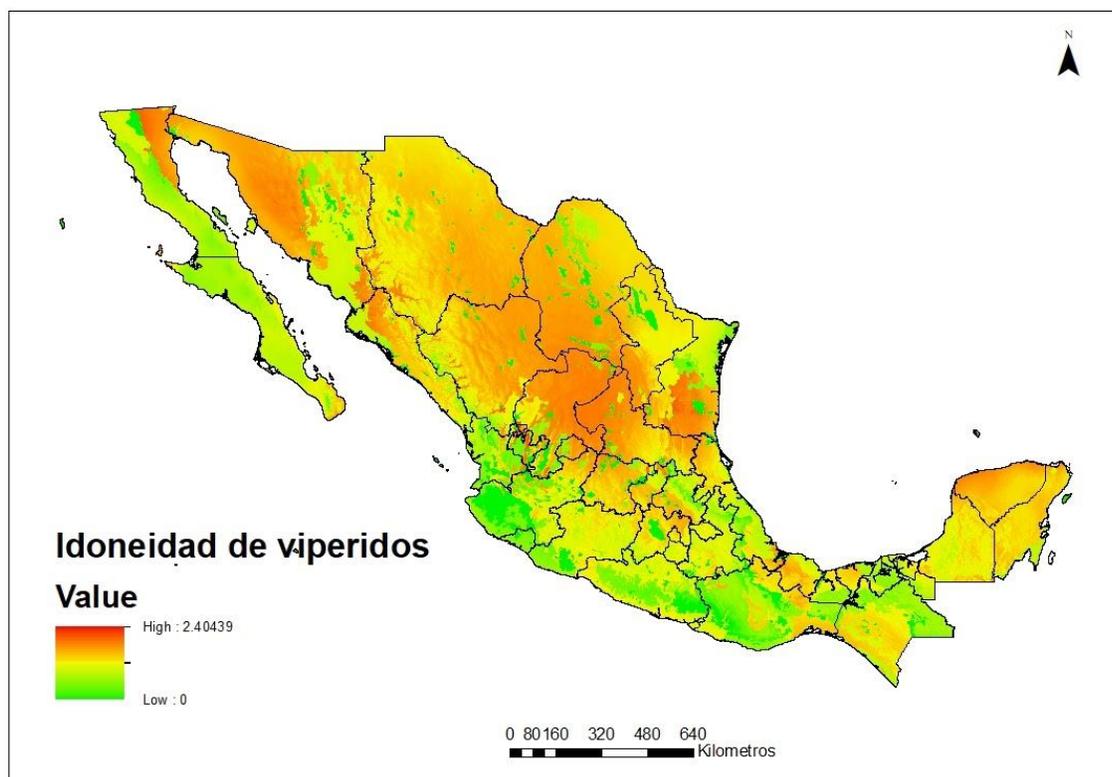


Figura 16. Suma de idoneidad ambiental de vipéridos de importancia médica en México.

Correlaciones

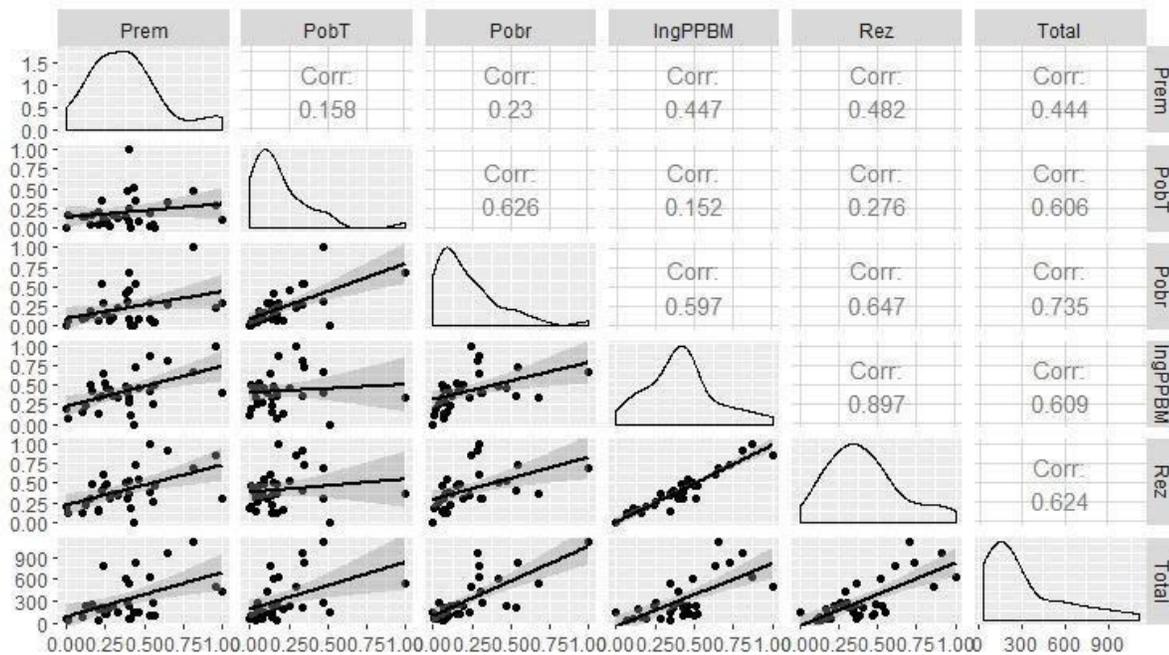


Figura 17. Gráfica de pares con los valores de rho del índice de correlación de Spearman, todas con $P < 0.01$, la densidad de los datos de cada variable en la diagonal y la dispersión de puntos con su respectiva línea de tendencia, de las variables más altamente correlacionadas con el Total de casos. Clave de las variables: precipitación promedio anual = Prem, población total = PobT, población rural = Pobr, ingreso bajo línea de bienestar por persona = IngPPBM, índice de rezago social = Rez, total de casos = Total.

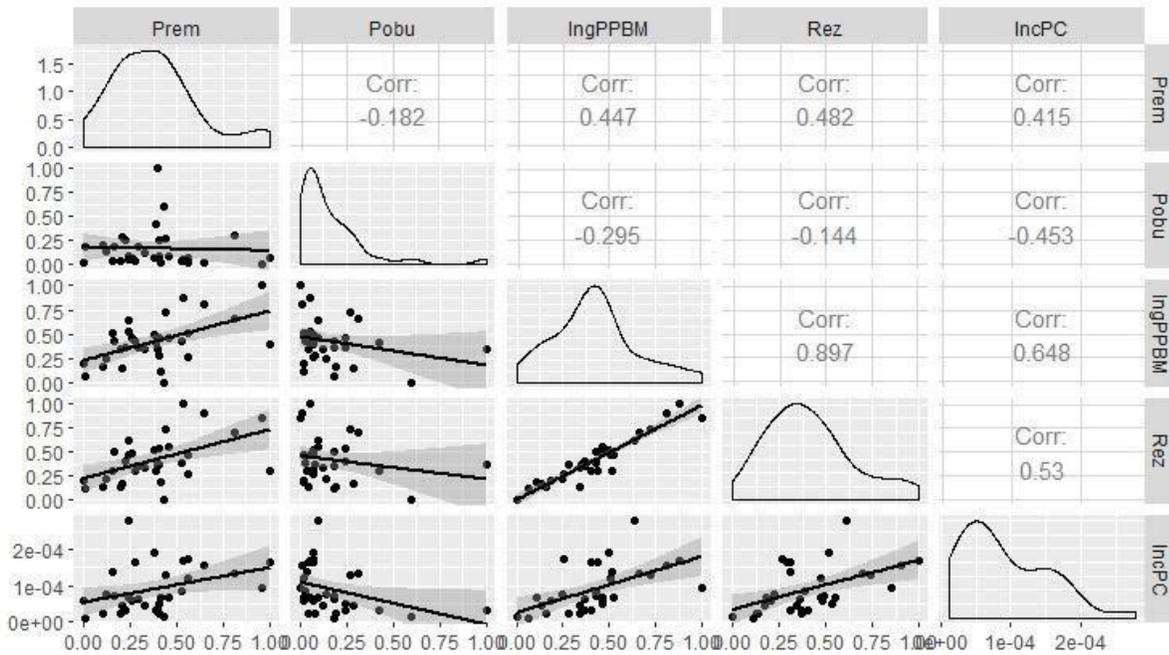


Figura 18. Gráficas de dispersión por pares de las variables que se correlacionaron significativamente ($P < 0.01$) con la incidencia de mordeduras por serpiente en México a escala estatal (2016-2018). Se muestran los valores de ρ (correlación de Spearman), la densidad de los datos de cada variable en la diagonal y la dispersión de puntos con su respectiva línea de tendencia. Clave de las variables: precipitación promedio anual = Prem, población urbana = Pobu, ingreso bajo línea de bienestar por persona=IngPPBM, índice de rezago social=Rez, incidencia per cápita=IncPC.

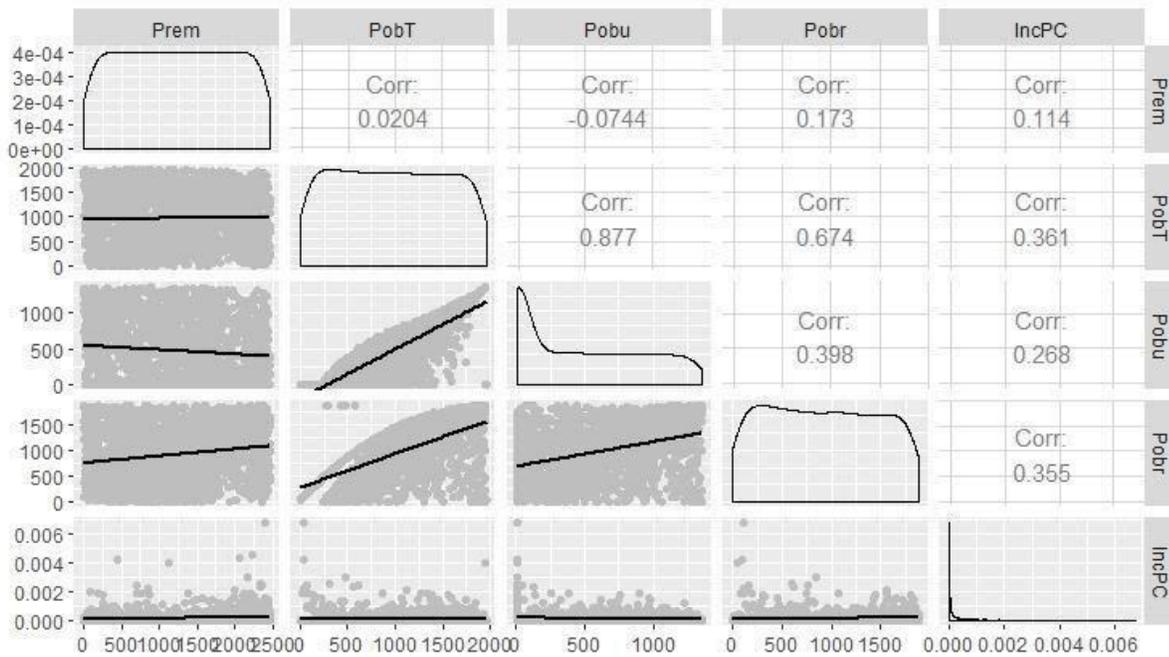


Figura 19. Gráfica exploratoria de pares donde se muestran las variables de precipitación promedio anual, población total, población urbana y población rural, las cuales son las que mejor se correlacionan con la incidencia per cápita a nivel municipal en México en el periodo transcurrido en los años 2016-2018. En esta se muestran los valores de rho del índice de correlación de Spearman, todas con $P < 1.526e-08$, la densidad de los datos de cada variable en la diagonal y la dispersión de puntos con su respectiva línea de tendencia. Clave de las variables: precipitación promedio anual = Prem, población total= PobT, población urbana = Pobu, población rural = Pobr, incidencia per cápita=IncPC.

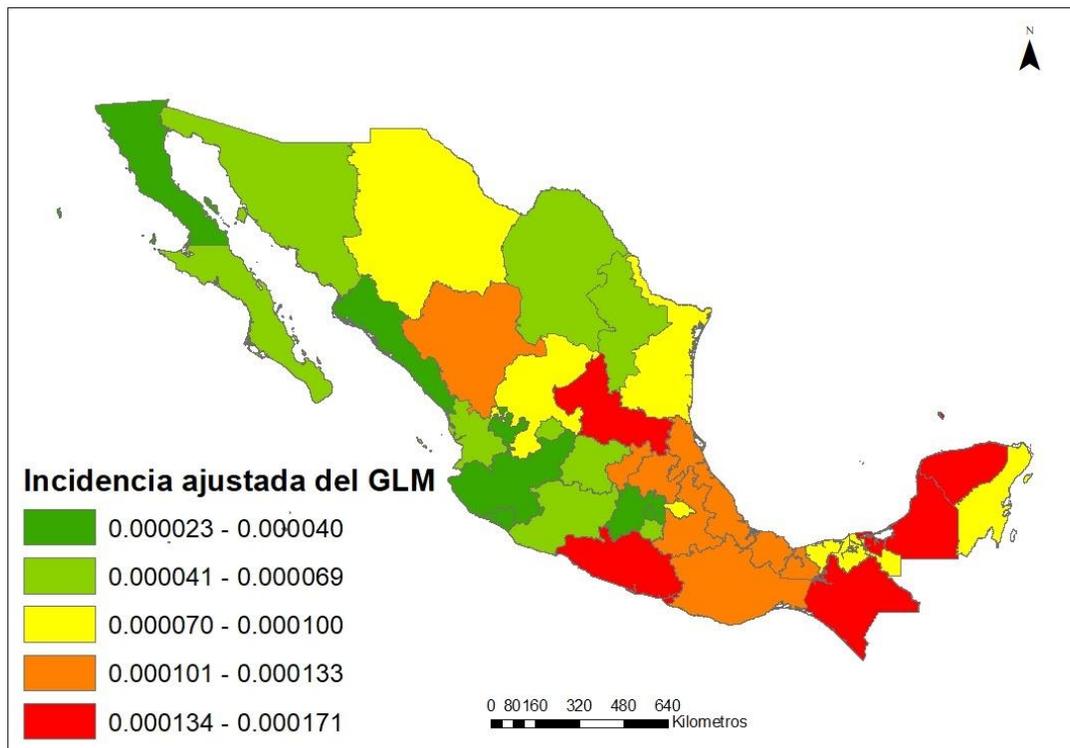


Figura 20. Mapa de incidencia predicha por el modelo lineal generalizado.

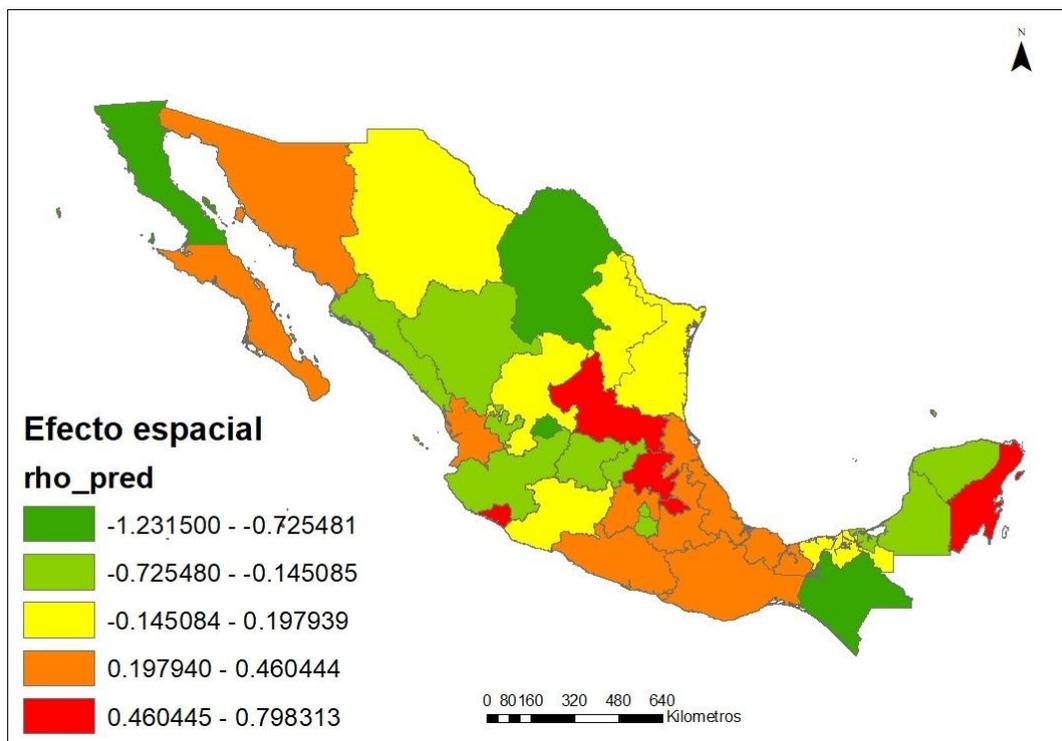


Figura 21. Mapa de predicción de incidencia dado el efecto espacial aleatorio (rho) correspondiente al modelo hSDM.binomial.iCAR.