

**INSTITUTO NACIONAL DE SALUD PÚBLICA**  
**ESCUELA DE SALUD PÚBLICA DE MÉXICO**

**CENTRO REGIONAL DE INVESTIGACIÓN EN SALUD PÚBLICA**

MAESTRÍA EN CIENCIAS DE LA SALUD CON ÁREA DE CONCENTRACIÓN EN  
ENFERMEDADES TRANSMITIDAS POR VECTOR

**IMPACTO DE CAMBIO CLIMÁTICO EN LA PROYECCIÓN  
GEOGRÁFICA DE TRIATOMINAE DE NORTEAMÉRICA**

TESIS

REQUISITO PARCIAL PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

MAESTRO EN CIENCIAS DE LA SALUD CON ÁREA DE CONCENTRACIÓN EN  
ENFERMEDADES TRANSMITIDAS POR VECTOR

PRESENTADO POR:

**BIOL. OSCAR CARMONA CASTRO**

oscar.carmona@espm.insp.mx

COMITÉ DE TESIS

**DIRECTORA:** DRA. JANINE M. RAMSEY WILLOQUET

**ASESORES:** DR. CARLOS N. IBARRA CERDEÑA  
M. EN C. DAVID A. MOO LLANES

TAPACHULA, CHIAPAS, AGOSTO DE 2014

ARTÍCULO SOMETIDO DE ACUERDO A LOS REQUERIMIENTOS DEL INSTITUTO  
NACIONAL DE SALUD PÚBLICA PARA OBTENER EL GRADO DE MAESTRO  
EN CIENCIAS DE LA SALUD CON ÁREA DE CONCENTRACIÓN  
EN ENFERMEDADES TRANSMITIDAS POR VECTOR

El presente estudio forma parte del proyecto FONSEC/Salud 161405 “El análisis integral de riesgos para la transmisión de la enfermedad de Chagas en México”, con financiamiento del CONACyT, número interno INSP 50-6766, dirigido por la Dra. Janine M. Ramsey Willoquet, del Centro Regional de Investigación en Salud Pública, quien es ICM “F” en el Instituto Nacional de Salud Pública, con sede en la Cd. de Tapachula, Chiapas, México.

## INDICE

AGRADECIMIENTOS	1
RESUMEN	2
INTRODUCCIÓN	4
MÉTODOS	8
RESULTADOS	14
DISCUSIÓN	19
REFERENCIAS	26
MATERIAL SUPLEMENTARIO	35

## AGRADECIMIENTOS

Este trabajo y toda la alegría impresa en él, es mi mejor forma de regresar un poco de lo mucho que ustedes han traído a mis días, mis viejos y mejores amigos: **Socorro Castro Espinosa** (madre), **Joaquín Carmona Domínguez** (padre), **Chucho, Cintucha y César** (carnales). Gracias por ser mi motor y gran ejemplo de vida.

A toda la familia, los **Castro** y los **Carmonitas**, porque siempre serán tan largos los días estando lejos de ustedes.

Con dedicatoria especial a los que se fueron, pero que nunca murieron: abue **Nachita Domínguez Herrera**, tío **Toño Díaz Alarcón**, **Toño** (Gato). **Cintucha**, por que la caminata es fuerte sin tener tu abrazo, hermanita.

A la **Dra. Janine M. Ramsey Willoquet**, mi respeto y admiración por su calidad luchona e incansable como investigadora y persona. Y a mis asesores y sinodales, **Dr. Carlos N. Ibarra Cerdeña** y **Dr. Eduardo A. Rebollar Téllez** por su valiosa y siempre entusiasta participación para empujar a los que venimos con ganas de seguir en el camino de la ciencia. Los comentarios de los tres acerca del trabajo y de la vida siempre fueron un aliciente para mejorar cada día. Gracias por dejarme ser parte de este gran equipo.

A mi compa de trabajo, gran asesor y maestro de los trucos de talacha, de la buena vibra cuando las cosas se pusieron complicadas, **M. en C. David Moo Llanes**, por que ha sido muy agradable compartir, entre carcajadas e ideas, como la mejor herramienta para la búsqueda de soluciones. Gracias por tu paciencia, por tu entusiasmo y por tu fuerte colaboración, mano a mano hasta el último día.

A todos los que nos conocimos en Chiapas, me llevo sus sonrisas y conservaré nuestras anécdotas: **Albita, Adriana, Angy, Anita, Chelo, el rudo Arthur, Carlos y Sury**.

A mis carnalosos: **Daysi, Chava, Daniel, Saúl, David y Rulo**. Por los tantos años que llevamos de andar en la misma rueda de la fortuna.

...**Delfino, Luis, Sleidher**, se nos acabó la maestría, pero espero nunca la amistad. Gracias hermanos.

## RESUMEN

El cambio climático (CC) y la modificación del paisaje pueden influir en la proyección geográfica del nicho ecológico de cualquier especie. Asimismo, las interacciones bióticas fundamentales para la transmisión de un patógeno también pueden ser afectados, si estos cambios alteran la dinámica poblacional de un vector o de las comunidades de hospederos. Existen 40 especies y subespecies de triatominos (Reduviidae: Hemiptera) incluidas en seis géneros (*Triatoma*, *Paratriatoma*, *Panstrongylus*, *Dipetalogaster*, *Belminus* y *Eratyrus*) reportados para México y Estados Unidos de América (EUA), y reconocidos como vectores de *Trypanosoma cruzi*, agente etiológico de la enfermedad de Chagas.

Debido a la heterogeneidad del registro de ocurrencias de las especies de triatominos, los modelos de nicho ecológico (MNE) son de gran utilidad para proyectar sus distribuciones geográficas potenciales o futuras, sus asociaciones con el uso de suelo y cobertura vegetal, y con la población humana. Estas proyecciones, en combinación con las del patógeno pueden emplearse para el diseño de vigilancia epidemiológica y estrategias de prevención o control de acuerdo a evidencias o indicadores de peligro por exposición de la población humana a la presencia de vectores infectados.

Un sistema de información geográfica (SIG) fue construido, incluyendo la capa de ocurrencias actualizada de triatominos y *T. cruzi* en Norteamérica (NA), y el programa Genetic Algorithm for Rule-set Prediction (GARP) fue usado con el modelo climático de circulación general ECHAM6 en dos escenarios contrastantes de CC (RCP 4.5 y RCP 8.5) y dos periodos de tiempo 2050 y 2070, para proyectar cambios futuros. Se analizaron los cambios en la amplitud, elevación y centroide de la proyección geográfica del nicho ecológico de los Triatominae y de *T. cruzi* en México y EUA, estimando: 1) la proyección actual de la exposición al vector y su asociación con el uso de suelo y la distribución poblacional humana y 2) los cambios territoriales y poblacionales del riesgo por exposición a la transmisión, en ambos escenarios de CC. La proyección geográfica de la mayoría de los MNE fueron significativos ( $AUC \geq 0.90$ ) y su calidad predictiva ideal para la caracterización del nicho ecológico de las especies en tiempo actual y futuro. No

se encontraron cambios significativos entre RCP 4.5 o RCP 8.5, por lo que no se espera cambios en el potencial de dispersión de especies en el futuro; sin embargo las especies *T. barberi*, *T. longipennis*, *T. mazzottii*, *T. mexicana*, *T. phyllosoma*, *T. dimidiata* hg 2, *T. gerstaeckeri*, *T. protracta*, *T. rubida* y *T. sanguisuga* podrían extender su distribución a toda el área accesible (M) de su MNE por movimiento asistido por personas o de productos y bienes. La amplitud, centroide y elevación fueron diferentes según la región biogeográfica de los MNE (Neártica, Neotropical y especies con extensión a la región Neártica), destacando su asociación con áreas conservadas para la región Neártica. El aumento de la población rural y urbana expuesta al MNE de transmisión en ambos escenarios de CC resalta el peligro que según la vulnerabilidad de la población de México y de la región sur de EUA, puede resultar en un riesgo importante y creciente para la transmisión vectorial de *T. cruzi* con el tiempo.

**Palabras clave:** *Nicho ecológico, cambio climático, Triatominae, Trypanosoma cruzi.*

## INTRODUCCIÓN

La enfermedad de Chagas es la enfermedad transmitida por vector de mayor importancia en México (Hotez et al. 2012; Ramsey et al. 2014) con riesgo directo de transmisión vectorial a 70% de la población mexicana (Ramsey et al. 2003). El problema de transmisión de *Trypanosoma cruzi* por transfusión sanguínea en los Estados Unidos de América (EUA) ha sido ampliamente analizado en las últimas décadas (Leiby et al. 1997; Leiby et al. 2002) y la reciente infestación de vivienda por vectores, así como la transmisión autóctona vectorial del patógeno a la población humana en la región sur de ese país está reconocida (Beard et al. 2003; Lambert et al. 2008). En Norteamérica (NA) todas las especies de Triatominae (32 especies), con la excepción de cuatro especies cripticas (*Belminus costaricensis*, *Triatoma bassolsae*, *Triatoma bolivari* y *Triatoma gomeznuñezi*), han sido confirmadas portadores de *T. cruzi*. México tiene 19 especies de triatominos de la región Neotropical, tres de las cuales se extienden a la región Neártica del país, todas de importancia epidemiológica, y ambos países comparten una mayor proporción de las 13 especies (y 8 subespecies) de la región Neártica.

Los modelos de nicho ecológico (MNE) son herramientas informáticas útiles para inferir las áreas geográficas propicias para la distribución de cualquier especie (Guisan & Zimmermann 2000; Peterson 2001; Soberón 2010). El uso y aplicación de MNE ha sido extendido a las áreas de sistemática, conservación y salud pública, debido al conjunto de requerimientos ecológicos y ambientales que permiten identificar la permanencia de especies de vectores, reservorios y de patógenos en espacios geográficos delimitados (Peterson 2006a,b; Soberón 2007). Los MNE han sido empleados para definir las zonas potenciales de ocurrencia de algunos mamíferos reservorios de *T. cruzi* en México (Peterson et al. 2002a) y algunos triatominos vectores de *T. cruzi* en Brasil, México y EUA (Costa et al. 2002; Beard et al. 2003; López-Cárdenas et al. 2005; Sandoval-Ruiz et al. 2008; Ibarra-Cerdeña et al. 2009; Batista & Gurgel-Goncalves 2009; Gurgel-Goncalves et al. 2012; Sandoval-Ruiz et al. 2012; Benítez-Alva et al. 2012). La ventaja del uso de los MNE para identificar el rango de distribución de un vector es su alto valor predictivo, lo que permite desarrollar información básica para

identificar potenciales áreas de peligro de exposición en el paisaje y la infestación en el domicilio humano, y así estratificar y planear la vigilancia, control y prevención de la enfermedad de Chagas.

El análisis de riqueza de Triatominae de NA es variable dependiendo del autor que se consulte, sin embargo el enfoque sistemático en la mayoría de los casos se ajusta a la revisión todavía más completa disponible de Triatominae (Reduviidae: Hemiptera), a pesar de un incremento importante en la descripción de nuevas especies y de estudios de sistemática molecular desde 1980 (Lent & Wygodzinsky 1979). En términos generales, los triatominos reportados y autóctonos para México y EUA están representados por seis géneros: *Triatoma*, *Paratriatoma*, *Panstrongylus*, *Dipetalogaster*, *Belminus* y *Eratyrus*. El vector *Rhodnius prolixus* y *Panstrongylus geniculatus* (un ejemplar) están consideradas “especies invasoras” ocasionales. De las 40 especies y subespecies de triatominos autóctonos reportados de ambos países (Lent & Wygodzinsky 1979; Ibarra-Cerdeña et al. 2009), una especie y una subespecie son exclusivas de EUA, 20 exclusivas de México, y 18 están compartidos entre ambos países.

El rango de distribución geográfica de las distintas especies de Triatominae y su asociación con la distribución de localidades rurales y urbanas, ha propiciado el contacto de la población humana principalmente con especies de los cinco complejos de *Triatoma* (*dimidiata*, *leticularia*, *phyllosoma*, *protracta* y *rubida*), que son vectores de *T. cruzi* en México (Ibarra-Cerdeña et al. 2009). Aunque las especies del complejo *dimidiata* y la mayoría de las especies del complejo *phyllosoma* se distribuyen en la región Neotropical, algunas de este último y una del complejo *protracta* se extienden también a la región Neártica. Asimismo, las demás especies del complejo *protracta*, así como del *leticularia* y *rubida*, solamente se encuentran en la región Neártica, distribuidos entre ambos países. Las condiciones ecológico-ambientales que permiten la sobrevivencia de las poblaciones de distintas especies de Triatominae se mantienen a través del tiempo, lo que permite usar la robustez de los MNE para analizar potenciales cambios en la distribución geográfica de las especies por efecto de las

modificaciones climáticas, ambientales y las migraciones poblacionales esperadas en escenarios futuros.

El cambio y variaciones climáticas afectan los patrones del ciclo de vida, abundancia y distribución geográfica del nicho ecológico de patógenos, vectores, reservorios y hospederos, modificando significativamente los patrones epidemiológicos de las enfermedades, lo que pudiera representar un aumento o descenso en el peligro de exposición para la población humana (Githeko et al. 2000; Gubler et al. 2001; Ramsey et al. 2003; Ramsey & Schofield 2003; López-Vélez & Molina-Romero 2005; Pearman et al. 2007; Gage et al. 2008). La relación entre algunos factores climáticos y los triatomíneos ya ha sido estudiada junto con las primeras descripciones parasitológicas, clínicas y epidemiológicas de la enfermedad de Chagas (Lambert et al. 2008). El efecto de los cambios térmicos sobre el ciclo de vida de algunos triatomíneos (Carcavallo & Martínez 1972; Silva 1986; Silva & Silva 1986), el tiempo generacional intraespecífico comparando zonas cálidas y templadas (Hack 1955) y el tiempo de eclosión de los huevos (Zeledón et al. 1970) han sido demostrados. Por lo anterior, el análisis del impacto del cambio climático (CC) sobre los componentes bióticos de la transmisión de una ETV requiere ser analizado para delimitar geo-espacialmente las áreas de peligro de interacción en tiempo actual, así como realizar una comparación multidimensional estimando los cambios en amplitud, elevación y orientación del área de distribución a través del tiempo (Lambert et al. 2008; Moo-Llanes et al. 2013; Garza et al. 2014).

Las variaciones naturales han constituido fenómenos de presión sobre las poblaciones de las especies a lo largo de su historia. Sin embargo, en los últimos 100 años el crecimiento demográfico y migraciones de la población humana, y la transformación de regiones conservadas han ocasionado la modificación acelerada del paisaje (cambios de uso de suelo; contaminación de agua, suelo y aire; fragmentación del hábitat; y cambios en la biodiversidad ecológica) y de las condiciones atmosféricas (cambios de temperatura, humedad y precipitación), a causa del incremento en la producción de gases de efecto invernadero (GEI). Debido a la relevancia de los efectos producidos por el CC, el Intergovernmental

Program on Climate Change (IPCC) propuso una serie de escenarios como tendencias basados en las emisiones de GEI para el futuro, a partir del análisis comparativo de escenarios de forzamientos antropógenos. El IPCC ahora establece cuatro escenarios en base a las trayectorias de concentración representativas (RCP): RCP 2.6, RCP 4.5, RCP 6 y RCP 8.5 (IPCC 2013).

La importancia y alcance de la carga de enfermedad de Chagas esta apenas permeando para cambios en las políticas de la salud pública en México. Sin embargo, existe una carencia importante de evidencia robusta sobre la distribución de los vectores, sus distribuciones potenciales en base a MNE, y ningún estudio sobre el impacto del CC ha sido realizado para las especies involucradas en la transmisión vectorial de *T. cruzi* en México, a pesar de tener la mayor diversidad de vectores triatominos en NA. Para construir un modelo robusto de riesgo para la transmisión vectorial de *T. cruzi*, se requiere entender no solo donde existe un peligro de exposición de la población, sino donde potencialmente podría ser expuesto, considerando la movilidad importante de la población y de organismos, así como los impactos de cambios antropogénicos a mediano plazo. ¿Existen diferencias según la región biogeográfica en el alcance de las especies de triatominos actualmente? ¿Cómo afectarán los cambios climáticos esperados en el potencial de dispersión de las especies? Asumiendo como para otras especies una abundancia menor según distancia del centroide del nicho ecológico ¿se podría orientar la investigación operativa para estratificar el peligro de exposición? ¿La ampliación geográfica del nicho afectara el rango de elevación actualmente reconocido? El presente estudio utiliza datos de ocurrencias actualizada de triatominos de México y EUA, para obtener modelos robustos de nicho ecológico para todas las especies con suficientes registros. Se analizaron las características geo-espaciales (amplitud, elevación, centroide y uso de suelo) del nicho ecológico de los Triatominae y los cambios en la exposición potencial de la población mexicana en el tiempo actual y futuro. El presente estudio representa la primera evidencia predictiva del efecto del CC sobre la distribución geográfica de las especies epidemiológicamente relevantes de Triatominae de México y EUA.

## MÉTODOS

**INFORMACIÓN DE ESPECIES.** El área de estudio incluye los países de México y EUA, con una superficie territorial de 10,069,567 píxeles con una resolución espacial de 30 arc-segundos (~1 km<sup>2</sup>) de longitud y latitud. Se construyeron dos bases de datos, la primera de Triatominae mediante la búsqueda exhaustiva de registros únicos de ocurrencia reportados en literatura de acceso libre (búsqueda completa de datos en PubMed, 1979-2013), colecciones entomológicas (Instituto de Biología, UNAM; National Museum of American History, Smithsonian Institute) y colectas propias del grupo de trabajo (CRISP/INSP). La base de datos incluyó 2,663 puntos de ocurrencia de 32 especies de Triatominae, incluidas en los géneros *Belminus* (1 especie), *Dipetalogaster* (1 especie), *Eratyrus* (1 especie), *Panstrongylus* (1 especie), *Paratriatoma* (1 especie) y *Triatoma* (27 especies). Los registros de ocurrencia de 5 subespecies fueron agrupados para *T. protracta*, 5 subespecies para *T. rubida* y se incluyen 3 haplogrupos (Hg) para *T. dimidiata* (Tabla 1). La segunda base corresponde a *Trypanosoma cruzi* usando los reportes de infección en humanos, reservorios y triatominos como puntos de ocurrencia confirmados por el InDRE, CENAPRECE, de literatura y de colectas personales; esta base incluye registros desde 1936 hasta septiembre de 2013 con un total de 669 registros únicos.

Las especies se agruparon según su región biogeográfica en tres categorías: Neotropical (con distribución restringida para esta región, N=16 especies), Neártica (con distribución restringida solo en esta región, N=12 especies) y región extendida Neotropical/Neártica (con distribución en ambas regiones, N=4 especies) (Olson et al. 2001) (Tabla 1). Se analizó si las condiciones ambientales (E) de las especies se distribuyeron en la periferia de la región biogeográfica del área accesible (M) (Owens et al. 2013), lo cual podría sesgar la interpretación de los resultados del modelo. La mayoría de las especies no fueron afectadas por este supuesto, a excepción de ocho: *T. brailovskyi*, *T. dimidiata* Hg 2, *T. gerstaeckeri*, *T. mazzottii*, *T. pallidipennis*, *T. picturata*, *T. recurva*, y *T. rubida*. Para estos casos, los puntos de ocurrencia que se encontraban a ≤100 km de la periferia fueron empleados para la ampliación del espacio geográfico de M sobre

la región biogeográfica. Utilizando Analysis Tools y Geoprocessing de ArcGIS versión 10.0 se complementó el área M en la región Neártica o Neotropical, construyendo un buffer de 100 km de radio en cada registro único seleccionado previamente.

**MODELOS DE NICHOS ECOLÓGICOS.** Se emplearon dos conjuntos de variables para la construcción de los modelos de nicho ecológico (MNE): topográficas y bioclimáticas. Las variables topográficas fueron cuatro: elevación, pendiente, aspecto e índice topográfico obtenidas de Hydro 1K (U.S. Geological Survey USGS: última consulta 2014). Las variables bioclimáticas utilizadas fueron Advanced Very High Resolution Radiometer (AVHRR: última consulta 2014) y WorldClim-Global climate data (última consulta 2014). El primer conjunto (AVHRR) incluye doce variables bioclimáticas mensuales (*Enero-Diciembre*). El segundo conjunto (WorldClim) incluye nueve variables (*temperatura media anual, estacionalidad de la temperatura, temperatura máxima del mes más cálido, temperatura mínima del mes más frío, rango de temperatura anual, precipitación anual, precipitación del mes más lluvioso, precipitación trimestral, estacionalidad de precipitación*). Estas variables fueron seleccionadas de 19, por ser significativas para establecer la hipótesis más robusta de predicción de distribución de especies después de ser evaluado mediante un análisis de multicolinealidad en una matriz de correlación ( $r < 0,75$ ) (Moo-Llanes et al. 2013). Todas las variables topográficas y climáticas tienen una resolución de 30 arc-segundos ( $\sim 1 \text{ km}^2$ ).

Se empleó el algoritmo GARP (Genetic Algorithm for Rule Set Prediction; Stockwell & Peters 1999) para la construcción de los MNE de 21 especies con  $\geq 10$  registros de ocurrencia incluyendo a *T. cruzi* (Tabla 2). No se construyó el MNE de *Triatoma neotomae* debido a la proyección geográfica aislada de sus registros de ocurrencia. Posteriormente para evaluar el desempeño del software se usaron tres versiones : “DesktopGARP” (plataforma convencional de GARP), “GARP with Best subsets-new openModeller implementation” y “GARP with Best subsets-DesktopGARP implementation”. Las dos últimas son versiones de OpenModeller Desktop 1.1.0 (de Souza et al. 2009). El algoritmo dividió aleatoriamente los

puntos de ocurrencia de cada especie de Triatominae y patógeno en datos de entrenamiento (70%) y datos de prueba (30%) para la obtención de los modelos predictivos, generando 100 réplicas de modelos por especie, con umbral de omisión bajo (20%) (Anderson et al 2003). Finalmente, se obtuvo un mapa con una escala de 0-100%, siendo el 100% la mayor probabilidad del nicho ecológico de la especie. Para evaluar la calidad del MNE, se crearon mapas binarios (presencia/ausencia) utilizando como criterio un umbral mínimo de presencia del 95% de los puntos de ocurrencia en el modelo (Peterson et al. 2011). Posteriormente, se analizó los mapas binarios mediante una prueba binomial, que evalúa la tasa de clasificación correcta de la presencia de datos comparándola con la probabilidad al azar (Raxworthy et al. 2003) (Tabla 2). Se utilizó el software ArcGIS versión 10.0 para la proyección de los MNE.

La calidad predictiva de los MNE en tiempo actual fue analizada según información actual de otros investigadores y con ayuda del investigador experto de Triatominae y enfermedad de Chagas, Dra. Janine Ramsey Willoquet (CRISP/INSP). Elegimos las variables de WorldClim sobre AVHRR por predecir distribuciones similares del nicho ecológico real de las especies y una reducción de la sobre-predicción de MNE a una escala mayor (NA). Por otro lado, la elección de la mejor versión de DesktopGARP se realizó bajo los siguientes criterios: distribuciones conocidas actuales, carencia de datos de áreas específicas y coincidencia de ausencias fuera del MNE. “DesktopGARP” (plataforma convencional) y “GARP with Best subset-Desktop GARP implementation” (OpenModeller) arrojaron los mejores modelos predictivos, tal como sucedió en Owens et al. 2013. Se consideraron las características de flexibilidad y robustez de la plataforma e interfaz de OpenModeller, así como su capacidad de crear, probar, evaluar y proyectar MNE en escenarios de CC, por lo que fue elegido para la generación de la información restante del presente estudio.

**ESCENARIOS DE CAMBIO CLIMÁTICO (CC).** En el Quinto Informe de evaluación del Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC-2013) se proponen cuatro escenarios nuevos basados en las vías de concentración

representativas (*Representative Concentration Pathway*, RCP) de emisiones de GEI: RCP 2.6, RCP 4.5, RCP 6 y RCP 8.5. Los RCP representan una amplia gama de posibles emisiones de gases de efecto invernadero en función de la variedad de escenarios de desarrollo socioeconómico y tecnológico (IPCC 2013). En el presente estudio, utilizamos los escenarios RCP 4.5 y RCP 8.5, siendo por un lado el que representa tendencias actuales de cambio (RCP 4.5) y por otro lado, tendencias de cambio acelerado (RCP 8.5) de no implementar políticas adecuadas para el control de GEI. Elegimos el modelo de circulación general ECHAM6 (Stevens et al. 2013), en dos periodos de tiempo: 2050 y 2070, siendo el mejor adaptado a las condiciones atmosféricas de México (Conde et al. 2011). Los parámetros de éste modelo derivan de Max Planck Institute Earth System Model en resolución base (MPI-ESM-LR). La técnica de computación de núcleos de radiación son implementados dentro del esquema de transferencia de radiación del componente MPI-ESM-LR, en el modelo de circulación general ECHAM6 (Stevens et al. 2013).

**CARACTERIZACIÓN DEL NICHU ECOLÓGICO.** Se analizaron tres características de las proyecciones del nicho ecológico: amplitud, centroide y elevación. Para la amplitud del nicho ecológico se calculó el porcentaje de pixeles ocupado / el área superficial total (km<sup>2</sup>) de las proyecciones en tiempo actual, 2050 y 2070 para los escenarios RCP 4.5 y RCP 8.5. El centroide geográfico fue calculado para cada MNE actual y futuro en ambos escenarios de CC, según dos atributos: azimut y distancia geográfica (km). El azimut considera el desplazamiento a partir de los centroides en los MNE actuales, midiendo en grados desde el punto cardinal Norte en sentido de las agujas del reloj (Norte, Este, Sur, Oeste). Por último se calculó el promedio y rango de elevación mediante la combinación de un Modelo Digital de Elevación (MDE) con los MNE de cada especie de vector y patógeno, y la posterior extracción de valores en tabla. Para evitar la sobrepredicción del rango mínimo y máximo de elevación se utilizó el 90% de los puntos de ocurrencia de cada especie, excluyendo los valores de elevación por debajo de 5% (límite inferior) y por encima del 95% (límite superior). A partir de los valores restantes se estimó el promedio, y finalmente se

comparó el cambio de elevación (m) entre los modelos actuales y futuros en ambos escenarios de CC (Moo-Llanes et al. 2013).

**RIQUEZA DE ESPECIES.** El análisis de riqueza de Triatominae de México y EUA incluyó la proyección geográfica de las 32 especies descritas en este estudio. Debido a la ausencia de un MNE para las especies con  $\leq 10$  registros (12 especies) (Tabla 1), se construyeron áreas de distribución actuales utilizando los puntos de ocurrencia de cada especie y la capa de Ecoregiones Globales del Fondo Mundial de la Naturaleza (WWF) (Olson et al. 2001). Para las especies *T. bassolsae* (1 registro) *T. gomeznuñezi* (1 registro) y *B. costaricensis* (2 registros) se crearon buffers de 100 km de radio alrededor de los registros de ocurrencia. Un MNE final de riqueza se obtuvo mediante la suma de todas las proyecciones geográficas empleando la herramienta Raster Calculator/Map Algebra/Spatial Analyst Tools del software ArcGIS versión 10.0 (Fig. 1).

**ANÁLISIS DE USO DE SUELO Y VEGETACIÓN RELACIONADO CON LOS MNE EN MÉXICO.** El análisis de proyección de uso de suelo sobre los MNE fue realizado solo para México en tiempo actual por no contar con las proyecciones futuras específicas. El Inventario Nacional Forestal (INF, 2007) (CONABIO-CONAFOR: última consulta 2014) fue empleado para el uso de suelo/vegetación del territorio mexicano. Se reclasificó el INF asignando valores dicotómicos del uso de suelo en dos categorías: conservado y modificado (Tabla 3). Los MNE de todas las especies de triatominos fueron sobrepuestos con el INF reclasificado para calcular las proporciones de uso del suelo de cada especie en tiempo actual.

**RIESGO DE EXPOSICIÓN HUMANA A LA TRANSMISIÓN DE LA ENFERMEDAD DE CHAGAS EN MÉXICO.** El MNE de *T. cruzi* fue proyectado para tiempo actual y futuro, y combinado con cada MNE del vector, generando un modelo combinado de transmisión de la enfermedad de Chagas para México solamente. La tasa de crecimiento de la población humana en base al censo INEGI 2010 y a los modelos de crecimiento poblacional propuestos por el Consejo Nacional de Población (CONAPO: última consulta 2014) fueron proyectados para el territorio mexicano y se calculó la población expuesta en el modelo combinado

(vector/patógeno) de acuerdo a los MNE para diferentes tiempos y escenarios. La población expuesta fue clasificada según su agrupación poblacional: rural (<10,000 habitantes) y urbana (>10,000 habitantes) (Moo-Llanes et al. 2013).

**ANÁLISIS ESTADÍSTICO.** Los patrones de cambio de amplitud, elevación y población humana expuesta se compararon de dos formas: 1) entre escenarios de CC para todas las especies, y 2) entre regiones biogeográficas formando cinco grupos de especies de acuerdo a las diferencias de amplitud de nicho descritas en la Tabla 2 (región Neártica menor = 1; región Neotropical menor = 2; región Neotropical mayor = 3; región extendida Neártica = 4; y región Neártica mayor = 5). Se realizaron las siguientes pruebas estadísticas utilizando el Software R versión i386 2.15.1.

- A) El análisis de amplitud entre escenarios se evaluó con las pruebas no-paramétricas Kruskal-Wallis y prueba de Dunn; y la comparación entre regiones fue evaluada con la prueba ANOVA de un factor y comparación de medias de Tukey, para tiempo actual y futuro.
- B) Los cambios de elevación fueron evaluados con dos pruebas paramétricas, ANOVA de un factor y comparación de medias de Tukey para ambos casos (entre escenarios y entre regiones).
- C) Únicamente se analizaron los datos de cobertura de uso de suelo / vegetación por regiones (tiempo actual) con la prueba ANOVA de un factor y comparación de medias de Tukey.
- D) Un primer análisis fue realizado para comparar la población rural vs la población urbana en diferentes tiempos (actual, 2050 y 2070) mediante una prueba t para muestras independientes. Posteriormente la población humana fue comparada entre escenarios y regiones, considerando análisis independientes de población rural y urbana. La población expuesta entre escenarios se analizó con las pruebas no-paramétricas Kruskal-Wallis y prueba de Dunn; y la comparación entre regiones mediante la prueba ANOVA de un factor y la comparación de medias de Tukey.

## RESULTADOS

**MODELOS DE NICHOS ECOLÓGICOS.** La proyección geográfica de los MNE de 17/20 especies de Triatominae de México y EUA fueron altamente significativos, con un rango de AUC de la prueba de entrenamiento entre 0.86 y 1.00 (17 con un  $AUC \geq 0.90$ ) y rango de AUC de la prueba de evaluación entre 0.60 y 1.00 (12 con un valor  $\geq 0.90$ ). Los valores más bajos de la prueba binomial fueron de *T. brailovskyi* (11 registros), *T. leticularia* (30 registros) y *P. hirsuta* (56 registros). La proyección del MNE de *T. cruzi* también fue altamente significativo y con valores altos de AUC para ambas pruebas (Tabla 2). La proyección geográfica de los MNE y mapas de puntos de ocurrencia utilizados para la construcción de los modelos de Triatominae se encuentran de la Fig. 10-29, y el MNE de *T. cruzi* en la Fig. 30. También se incluyen los mapas de puntos de ocurrencias de las especies con  $\leq 10$  registros (Fig. 31-32).

**CARACTERIZACIÓN DEL NICHOS ECOLÓGICOS.** Los MNE de mayor amplitud fueron de la región Neártica (N=7 especies). Sin embargo, hay una especie de esta región, *T. peninsularis*, cuya proyección geográfica es la más reducida de todas las especies ya que está restringida a la península de Baja California. La amplitud de las tres especies que trascienden de la región Neotropical a la región Neártica, tienen la segunda más grande amplitud, cercano al grupo de mayor amplitud de la región Neotropical (N=5 especies). Las especies que tienen su MNE en la región Neotropical se dividen en dos grupos, según la amplitud geográfica del nicho (Fig. 2).

El promedio de elevación de los MNE de las 20 especies varía entre 44 y 1,750 m, con un rango de elevación entre 0 y 2,321 m (Tabla 4). Según la región biogeográfica, y a diferencia de la mayor amplitud para especies Neárticas, el promedio de elevación fue superior para las especies con extensión a la región Neártica (1,491 m), siendo significativamente más alta que los dos grupos de especies Neotropicales (Neotropical menor, 654 m; Neotropical mayor, 784 m) y quedando con el promedio más bajo de elevación las especies de la región

Neártica (586 m) y *T. peninsularis* (Neártica menor, 241 m) (df=4, F-value=4.82,  $p=1.06E^{-02}$ ) (Tabla 6).

La suma de la proyección geográfica de las 32 especies de Triatominae abarca el 52% de todo el territorio (México y EUA), donde 31.8% corresponde para México y 68.2% para EUA. Sin embargo, México tiene el 83.6% del área de mayor riqueza, mientras que tan solo 16.4% se encuentra en el territorio de EUA (Fig. 1). La riqueza de especies de Triatominae es mayor en la región Neotropical (N=16) que en la región Neártica (N=12) y la región extendida Neártica (N=4). El área de mayor riqueza de especies está incluida en las provincias biogeográficas de Chiapas, Costa del Pacífico Mexicano, Sierra Madre del Sur, Cuenca del Balsas, Eje Volcánico Transmexicano (Eje Neovolcánico Transversal), Sierra Madre Oriental, región centro-oeste de Tamaulipas, región norte del Altiplano Mexicano, región norte de Sonora, región sur-oeste de Texas, región centro-sur de Arizona y la región noroeste de California.

**CAMBIOS DE AMPLITUD DE NICHOS EN ESCENARIOS DE CC.** Los cambios en amplitud de nicho son variables para las regiones biogeográficas y las especies de Triatominae en ambos escenarios de CC (RCP 4.5 y RCP 8.5). En general, la mayoría de las especies no incrementaron o redujeron significativamente en ningún RCP o tiempo futuro ( $p \geq 0.05$ ) (Fig. 3). Para siete especies (*T. dimidiata* Hg 2, *T. mazzottii*, *P. hirsuta*, *T. protracta*, *T. sanguisuga*, *T. pallidipennis* y *T. phyllosoma*) el rango de cobertura entre 18 y 60% del territorio, se mantiene constante en ambos escenarios de CC a través del tiempo (años 2050 y 2070). El vector *T. sanguisuga* tuvo el incremento de nicho mayor, similar al de *T. dimidiata* Hg2, sostenidos en ambos RCP y tiempo, mientras que *T. phyllosoma* tuvo un incremento menor en ambos RCP, y mantenido en 2070 en RCP 8.5. Dos especies (*P. hirsuta* y *T. protracta*) redujeron el territorio de distribución de los MNE en RCP 4.5 en ambos tiempos, mayor al de RCP 8.5. Del grupo de especies con amplitud de rango menor, *T. recurva* y *T. leticularia* no cambiaron significativamente para 2050, pero incrementaron en ambos RCP para 2070. En contraste, *T. brailovskyi* tuvo la proyección geográfica incrementada en 2050, en

ambos RCP, pero no en 2070. Las diferencias según la región biogeográfica son significativas (Tabla 6), siendo el conjunto de especies que pertenecen a la región Neártica (excepto *T. peninsularis*) las que tiene los mayores valores de amplitud en tiempo actual y futuro.

**DESPLAZAMIENTO DEL CENTROIDE EN ESCENARIOS DE CC.** El centroide del nicho ecológico representa el punto en el cual las condiciones del espacio son óptimas, y la abundancia de una especie es mayor. Según el escenario y modelo de CC, la proyección geográfica del centroide podría modificarse, con o sin una ampliación de su rango. Para el caso de las 20 especies de Triatominae de NA, no hubo una relación entre la amplitud de nicho y la distancia de desplazamiento o su orientación de cambio dominante del centroide, aunque si una tendencia relacionado con la región biogeográfica (Tabla 5). El cambio de distancia del centroide fue muy variable (3 - 418 km), dependiendo de la especie y escenario de CC, en ambos periodos de tiempo. Generalmente, en 2050 el desplazamiento del centroide de especies en RCP 4.5 de la región Neotropical fue al Noroeste, mientras de la región Neártica fue al Sureste, y para las especies con extensión a la región Neártica fue predominantemente al Noreste en RCP 8.5. A pesar de tendencias variables para la mayoría de especies, *T. barberi* desplaza solamente al sureste, mientras *P. hirsuta* y *T. sanguisuga* proyecta desplazarse al noroeste, con orientación similar del azimut (grados) en ambos escenarios de CC para las tres especies. Para el año 2070, en RCP 4.5, hubo un incremento adicional en el desplazamiento del centroide solamente en las especies Neárticas, 20% mayor al de 2050, pero ese fue en dirección oeste, norte o sur. En contraste, el desplazamiento del centroide de las especies totalmente o mayoritariamente presentes en la región Neotropical fue del 12% - 46% en la mayoría de las especies, menor en 2070 en comparación al 2050. *Triatoma dimidiata* Hg 1 tuvo los menores cambios de distancia en el centroide (< 8 km), mientras que *T. leticularia*, *P. hirsuta* y *T. sanguisuga* tienen los mayores valores de cambio (250-420 km). *Trypanosoma cruzi* tiene un patrón de orientación consistente hacia el suroeste en ambos escenarios de CC, con una variación mínima en la distancia (103 - 194 km) y diferencia en el azimut, aumentando en tiempo y según RCP.

**CAMBIO DE ELEVACIÓN EN ESCENARIOS DE CC.** No hubo cambio significativo en el promedio de elevación de los MNE de la mayoría de las especies de triatomíneos de NA para 2050 o 2070, para el escenario RCP 4.5 o RCP 8.5 ( $p \geq 0.05$ ). En el escenario RCP 4.5 los vectores *T. brailovskyi*, *E. cuspidatus* y *P. hirsuta* fueron las únicas especies con un incremento en el promedio de elevación en 2050, manteniendo este aumento en 2070 (21.3%, 17.3% y 20.7%, respectivamente) (Tabla 4; Fig. 4). *Triatoma leticularia*, *T. recurva*, *T. gerstaeckeri* y *T. picturata* tuvieron las reducciones en promedio de elevación mayores para 2050, entre el 7% - 21.4%, pero estos mismos incrementaron para 2070, quedando con 10.0%, 7.2%, 3.8% y 0.4%, respectivamente (Tabla 4; Fig. 36). El promedio de elevación fue menor en RCP 8.5 que en RCP 4.5 en 2050 para *T. brailovskyi* (-16.7%), *P. hirsuta* (-10.4%), *T. peninsularis* (-37.1%) y *E. cuspidatus* (-11.7%), mientras los incrementos mayores fueron en *T. leticularia* (38.2%) y *T. picturata* (24.1%) (Tabla 4; Fig. 5). Los cambios en promedio de elevación fueron significativos según región biogeográfica (Tabla 6). Las elevaciones promedio más altas fueron encontradas en las tres especies cuyos MNE fueron ampliados de la región Neártica (*T. mexicana*, *T. longipennis*, *T. barberi*), seguidos de las especies Neotropicales *T. dimidiata* Hg 2, *T. mazzottii*, *T. pallidipennis* y *T. phyllosoma*, lo que se mantiene a través del tiempo (2050 y 2070), y en ambos escenarios de CC (Tabla 4 y Tabla 6).

**ANÁLISIS DE USO DE SUELO Y VEGETACIÓN RELACIONADO CON LOS MNE EN MEXICO.** En general, la proyección geográfica de las 32 especies de Triatominae obtenida del análisis de riqueza exclusivo para México, tienen una cobertura predominante en áreas conservadas (71.5%), en comparación con áreas modificadas (28.5%) (Fig. 6). Sin embargo, la cobertura de los MNE en áreas modificadas (42%) no es muy diferente al de áreas conservadas (58%) en la región Neotropical; contrario a la región Neártica donde se tiene una proporción mayor de los MNE en áreas conservadas (79%) en comparación con áreas modificadas (21%). Se debe recordar que el norte de México tiene regiones áridas y semiáridas que no han sido aptas para el desarrollo humano, y por ende tiene más territorio sin modificación para urbanización o agricultura. Únicamente las

especies de la región Neártica mayor (*P. hirsuta*, *T. protracta*, *T. rubida*, *T. gerstaeckeri*, *T. recurva* y *T. leticularia*) tienen proyecciones de amplitud sobre áreas conservadas (~80%), en relación al área total proyectada de su distribución actual (df=3, F-value=5.46, p-value=9.71E<sup>-03</sup>) (Tabla 6).

Las especies con extensión a la región Neártica ocupan el segundo lugar de cobertura tanto en áreas conservadas y modificadas, y son similares a las especies Neotropicales con mayor amplitud de nicho actual (*T. phyllosoma*, *T. pallidipennis*, *T. mazzottii* y *T. dimidiata* Hg 2 (Tabla 6). Por otro lado, las especies de la región Neotropical menor (*T. brailovskyi*, *T. picturata*, *T. dimidiata* Hg 3, *E. cuspidatus* y *T. dimidiata* Hg 1), tienen un rango de ocupación sobre áreas modificadas y conservadas menor en comparación con las demás especies (Tabla 6; Fig. 7). Sin embargo, *T. peninsularis* y *T. sanguisuga* son las especies de menor cobertura, debido su ubicación restringida en la península de Yucatán para la primera, y por la cobertura del nicho ecológico extendido principalmente en EUA y no en México para el caso de *T. sanguisuga* (Tabla 6; Fig. 7).

**ANÁLISIS DE RIESGO DE EXPOSICIÓN HUMANA A LA TRANSMISIÓN DE LA ENFERMEDAD DE CHAGAS EN MÉXICO.** En México, un total de 99,911,867 (88.9%) de la población mexicana está expuesta al peligro de la transmisión vectorial de la enfermedad de Chagas. El peligro por exposición afecta de igual manera a la población rural (88.1%) que a la población urbana (89.4%), aunque la estimación en número de personas que habita en zonas rurales (33,891,811 habitantes) es menor que la cantidad de personas que habita en zonas urbanas (66,020,056 habitantes). Este patrón no cambia a través del tiempo o según el escenario de CC (Tabla 7). La mayor población humana rural y urbana expuesta al peligro combinado vector-patógeno corresponde a las especies *T. longipennis*, *T. mexicana*, *T. mazzottii* y *T. barberi*, y por el contrario, la menor exposición es por *T. peninsularis*, *T. brailovskyi* y *E. cuspidatus*, en el tiempo actual. La población expuesta (rural y urbana) al 60% de las especies, incrementa a través del tiempo en ambos escenarios de CC, mientras la población expuesta a nueve especies (*T. leticularia*, *P. hirsuta*, *T. sanguisuga*, *T. phyllosoma*, *T. picturata*, *E. cuspidatus*, *T.*

*brailovskyi* y *T. peninsularis*) no tienen un patrón de incremento constante (Fig. 8 - 41). El grupo de especies con extensión a la región Neártica tienen los valores mayores de población expuesta (> 50%), similar al grupo de especies Neotropicales con mayor amplitud de nicho en México (*T. mazzottii*, *T. dimidiata* Hg. 2, *T. pallidipennis* y *T. phyllosoma*), y al de las especies Neárticas, para el caso de la población rural (Tabla 6; Fig. 8). En el caso de la población urbana, las especies Neárticas ocupan el segundo lugar después de las especies con extensión a la región Neártica (Tabla 6, Fig. 9).

## DISCUSIÓN

La biogeografía de 32 especies de triatomos vectores de la enfermedad de Chagas en México y EUA fue analizado en este estudio, incluyendo la descripción más completa de los patrones potenciales de distribución geográfica de las especies de NA, después de lo reportado por Lent y Wygodzinsky (1979), Bern y colaboradores (2011), y Zeledón y colaboradores (2012) para el caso de EUA, y Zárate y Zárate (1985) para el caso de México. Solamente un trabajo ha sido realizado acerca de la proyección geográfica actual de triatomos de NA según agrupación taxonómica por complejo (Ibarra-Cerdeña et al. 2009), y algunos estudios han reportado los MNE para especies de pocos estados de México, entre ellos Guanajuato (López-Cárdenas et al. 2005), Puebla (Sandoval-Ruiz et al. 2008), Veracruz (Sandoval-Ruiz et al. 2012), Aguascalientes, Chiapas, Guerrero, Jalisco, Michoacán y Oaxaca (Benítez-Alva et al. 2012) aunque sin usar las ocurrencias completas para asegurar un modelaje adecuado a nivel de especie.

El riesgo epidemiológico de transmisión de *T. cruzi* es mayor en México que en EUA (Ramsey et al. 2003; Bern et al. 2011; Hotez et al. 2012), donde hay mayor número de especies de triatomos y una vulnerabilidad social importante. Sin embargo, la presencia de *T. cruzi* y algunas especies de Triatominae en ambos países y el flujo migratorio humano resaltan dos consideraciones importantes: 1) existen condiciones ecológico-ambientales similares en algunas regiones de México y de EUA, y 2) la distribución actual de las especies se relaciona directamente con la disponibilidad de estos recursos (Grinnell 1917; Elton 1946;

Soberón 2007), y no está condicionada por límites geo-políticos. Por lo anterior, en este estudio, los modelos para las especies de la región Neártica en México incluyeron todos los registros de las especies presentes, aunque fueran de EUA, lo cual permite un modelaje más robusto (un sesgo puede ser causado por omisión de muestreos en zonas focalizadas) e incrementa la precisión de la caracterización del nicho ecológico de todas las especies, y la calidad predictiva de su proyección en el espacio geográfico (Peterson et al. 2011). Las especies presentes únicamente en EUA también fueron modelados para obtener el análisis amplio del potencial impacto epidemiológico que existe en NA.

Este estudio planteó varias preguntas relacionadas con el potencial de distribución de especies según la región biogeográfica, encontrando diferencias de la amplitud de nicho entre regiones biogeográficas, donde las de mayor cobertura se registraron en la región Neártica. Este incremento en amplitud, sin embargo, está inversamente relacionado con el número de especies, que es mayor en la región Neotropical. El análisis de riqueza confirma que México tiene la mayor diversidad de Triatominae de NA, al igual que lo reportado por Ibarra-Cerdeña y colaboradores (2009), según un análisis por complejos. Esta riqueza de especies puede explicarse por la ubicación espacial del territorio mexicano en ambas regiones biogeográficas: Neotropical y Neártica (Olson et al. 2001; Morrone 2005). Ambas regiones tienen características diferentes de fisiografía, tipos de vegetación y variabilidad climática (Rzedowski 1978), que interactúan formando una heterogeneidad y variedad de paisajes adecuados para distintas especies de triatomíneos, como para distintas especies de mamíferos reservorios de *T. cruzi* (Ceballos et al. 2002; Peterson et al. 2002a,b). Por ello, en este estudio incluimos el análisis de especies agrupadas según su región biogeográfica de distribución, y priorizamos las estimaciones de peligro de transmisión vectorial para México por su situación epidemiológica. El MNE de riqueza es una herramienta fina de estratificación (1 km<sup>2</sup>) de áreas potenciales de peligro por la presencia de una o más especies de vectores triatomíneos, que en términos de la vigilancia y la logística del control vectorial de la enfermedad de Chagas, debe ser considerado para estrategias costo-eficaces.

La proyección de los MNE usando WorldClim para las 20 especies más abundantes y de importancia epidemiológica en NA, ha generado un nuevo mapeo de distribución potencial, incluyendo el potencial por dispersión asistida humana, y una proyección de potencial del peligro de exposición, mediante infestación a nivel comunitario en México (Ramsey et al., en prensa). El estudio previo de Ibarra-Cerdeña y colaboradores (2009) proyectó los MNE según el uso de suelo y tipo de vegetación agrupando especies, para los cinco complejos de *Triatoma* en México. Hubo mayor amplitud de MNE en pastizales arbolados para la mayoría de las especies, y bosques asociados con especies del complejo *phyllosoma* y *dimidiata*. El presente estudio usa una clasificación amplia de uso de suelo (modificado o conservado), independientemente del tipo de vegetación, para analizar la proyección de las especies más abundantes e implicados en la transmisión vectorial de *T. cruzi* en México. Las especies más asociadas con los paisajes conservados son las de la región Neártica, donde especies del complejo *phyllosoma* (*Triatoma gerstaeckeri* y *Triatoma recurva*), del complejo *protracta* (*Triatoma protracta*) y otras como *P. hirsuta*, han sido reportadas con interacciones y alta especificidad con diferentes especies silvestres del género *Neotoma*, reservorios de *T. cruzi* (Peterson et al. 2002a). Esta relación ecológica adquiere mayor importancia por la condición de anidación de los vectores triatomínicos con sus hospederos, donde se mantienen activos los patrones de transmisión en zonas silvestres o ecotopos silvestres que son susceptibles a cambios hacia patrones de transmisión doméstica de *T. cruzi* (casas de la población humana) (Ramsey & Schofield 2003). Las tendencias de modificación del paisaje y ocupación humana han sido aceleradas en áreas que anteriormente fueron conservadas, como el caso de la clara domesticación de *T. gerstaeckeri* que ya representa un peligro para el 11% de la población en algunas comunidades humanas de Nuevo León, Tamaulipas y San Luis Potosí (Ramsey et al. 2003).

El análisis de uso de suelo según la riqueza de especies confirma los análisis anteriores, con el área predominante asociada a los MNE de Triatominae correspondiente a zonas todavía conservadas en el inventario forestal de 2007 (71.5 %). En México, el sector salud prioriza el control de vectores principalmente

en áreas urbanas por la importancia asignada al dengue, lo que implica un sesgo de presencia y actividades para la vigilancia de triatominos en comunidades humanas. Si no hay una re-orientación y cambio en las políticas y estrategias usadas para el programa preventivo de enfermedades transmitidas por vectores, el sector de atención primaria seguirá con un sub-registro y rezago de atención de los pacientes y de la prevención de la enfermedad de Chagas. Asimismo, la detección de infestación y la aplicación de medidas de control vectorial debe ser realizado tanto en zonas antropizadas (urbanas o rurales), así como en zonas peri-comunitarias, según evidencias de contacto entre poblaciones de triatominos y humanos, lo que no está incluido en las estrategias de intervenciones anti-vectoriales actuales (Ruiz-Piña & Cruz Reyes 2002; Bosseno et al. 2006; Ramsey et al. 2012). Debido a la importancia de roedores como plagas agrícolas, y las evidencias de importancia de estos reservorios como fuente de *T. cruzi*, el sector salud tendría que desarrollar programas conjuntamente con los del sector agrícola, lo cual tampoco es una práctica actual en estrategias de control vectorial (Ramsey & Schofield 2003; Ramsey et al. 2012).

Los patrones de cambio por efecto de CC en amplitud, elevación y centroide permiten analizar su variación entre especies y según su región biogeográfica, así como permitir su uso en el análisis de peligro de exposición (Moo-Llanes et al. 2013). Los cambios observados de ellos entre escenarios RCP 4.5 y RCP 8.5 de CC permiten analizar el impacto de la antropización en la proyección geográfica del MNE (Garza et al. 2014). No se detectaron diferencias significativas de amplitud en escenarios para 2050 o 2070, para ninguna especie de Triatominae, y entonces no se espera cambios en el potencial de dispersión de las especies. Sin embargo, algunos vectores como *T. sanguisuga* tienen un incremento mayor de amplitud de nicho proyectado para el futuro en ambos escenarios de CC, lo que resulta similar a los resultados de Garza y colaboradores (2014), usando modelos climáticos de circulación diferentes (CCCMA, CSIRO y HADCM3) en escenarios anteriormente definidos (A2 y B2), aunque la dirección de cambio del centroide es distinta entre los dos estudios. Garza et al. (2014) reportan un cambio al noreste, aunque es al noroeste para el estudio presente. *T. sanguisuga* también fue la

única especie de mayor cobertura de nicho ecológico y mayor desplazamiento del centroide en el estudio presente (distancia promedio de 215.7 km). *Triatoma gerstaeckeri* proyecta un cambio de amplitud y desplazamiento de centroide hacia el norte de EUA en Garza y colaboradores (2014), a diferencia del desplazamiento no significativo hacia el sur reportado aquí. Las diferencias entre los patrones de amplitud y desplazamiento del centroide entre ambos estudios, probablemente se deba a una selección metodológica distinta del área accesible (M), siendo más fina en el presente estudio, por considerar el límite potencial de distribución de ambas especies en base a su región biogeográfica y al registro de ocurrencias. Ambos componentes fueron mayor para la construcción de MNE en este estudio, tanto para *T. sanguisuga* (59 registros más) como para *T. gerstaeckeri* (80 registros más).

*Triatoma dimidiata* Hg 2 también tiene un incremento en la amplitud de nicho mantenido en ambos escenarios de CC, sin embargo, los cambios de elevación no son significativos, y el desplazamiento del centroide (orientación y distancia) no tienen un patrón definido a través del tiempo. Por otro lado, *P. hirsuta* y *T. protracta* fueron las especies con una reducción mayor de cobertura de nicho en ambos escenarios de CC, con patrones de orientación hacia el noroeste y sur, respectivamente, y mayor distancia promedio de desplazamiento del centroide en comparación con la mayoría de las especies (*P. hirsuta* = 315.4 km; *T. protracta* = 132.3 km). De estas dos especies, solo *P. hirsuta* mantuvo un incremento en el cambio de elevación (20.7%) en ambos RCP y años 2050 y 2070. De acuerdo a los patrones de cambio calculados y analizados en este estudio, no existe relación entre el cambio de amplitud y elevación, o amplitud y desplazamiento del centroide para el caso de los Triatominae, a diferencia de los reportado por Moo-Llanes y colaboradores (2013) para los flebotominos de NA.

A pesar de no existir cambios importantes para la mayoría de las especies en relación a la cobertura de su nicho ecológico, podemos inferir que el peligro por exposición a la presencia de triatominos en la actualidad, es elevado para todo el territorio de México y para la parte sur de EUA (Ibarra-Cerdeña et al. 2009, Bern et

al. 2011). Asimismo, se mantendrá ese nivel de no realizar actividades para reducir el peligro de exposición o la vulnerabilidad (Valdez-Tah et al., en prensa).

A pesar de las variaciones en la distancia de desplazamiento del centroide en todos los MNE de Triatominae, el patrón de orientación para RCP 4.5 de las especies Neotropicales fue hacia el noroeste y para las Neárticas fue hacia el sureste. El cambio para las especies de la región Neártica en RCP 8.5, sin embargo, fue hacia el noreste, lo que debería considerarse con precaución debido a que representa una reversión del periodo anterior. No habido estudios en vectores demostrando que la abundancia de una especie disminuye en función de la distancia al centroide del nicho ecológico proyectado geográficamente, tal como en otra taxa (Martínez-Meyer et al. 2012). Los modelos actuales permitirán poner a prueba esta hipótesis con un estudio de terreno, lo que permitirá su inclusión para mejorar un modelo de peligro y riesgo de transmisión vectorial a futuro.

En escenarios futuros de CC, no se espera para el conjunto de especies, un cambio significativo del amplitud de distribución o en el promedio de elevación, con excepción de algunas especies (*T. sanguisuga* y *P. hirsuta* con mayor cobertura en EUA, y *T. dimidiata* Hg 2, *T. phyllosoma*, *T. pallidipennis*, *T. brailovskyi* y *E. cuspidatus*, con mayor cobertura en México). Sin embargo, el transporte pasivo por migraciones humanas o movimiento de productos y bienes, podría ampliar la distribución actual de poblaciones de cada especie, en caso de ocupar en el futuro, la mayor proporción del nicho potencial proyectado y apto del MNE (según accesibilidad), y de acuerdo a la información actual de ocurrencia de especies, particularmente para especies como *T. barberi*, *T. longipennis*, *T. mazzottii*, *T. mexicana*, *T. phyllosoma*, *T. dimidiata* Hg 2, *T. gerstaeckeri*, *T. protracta*, *T. rubida* y *T. sanguisuga*, que ocupan solo una fracción menor de su MNE actual. Por otro lado, el movimiento poblacional humano sur-norte (y a menor grado norte-sur) por motivos de migración o labores temporales, podría provocar desplazamiento de poblaciones de especies hacia hábitats domésticos o silvestres, con establecimiento en ambos si la especie se encuentra dentro de su MNE, o solo en los hábitats domésticos humanos, como fueron los casos de *T.*

*infestans* y *Rhodnius prolixus*, si el desplazamiento asistido esta fuera de su MNE (Schofield et al. 1999).

El MNE de *T. cruzi* fue construido usando las ocurrencias del parásito tanto en vectores, humanos y reservorios. A pesar de haber encontrado a todas las especies más abundantes de mamíferos pequeños y medianos terrestres o voladores infectados con *T. cruzi*, hasta la fecha en México hay un vacío de información sobre la infección en fauna silvestre en la mayoría de las regiones y ecotopos, así como en carnívoros. Igualmente, animales domesticados en cría dentro o fuera de las comunidades humanas, así como mascotas están siendo identificados como especies altamente infectados (Salazar-Schettino et al.1997; Brown et al. 2010; Teney et al. 2014).

El modelo de MNE del parásito indica una alta amplitud en casi todas las ecoregiones de México y del sur de EUA, sin embargo su patrón de orientación y desplazamiento del centroide es evidente hacia el suroeste en ambos escenarios de CC, lo que reduce la posibilidad de cambios importantes del nicho de transmisión en EUA, aun cuando los MNE de vectores son proyectados con amplitud para la región norte de este país, en escenarios futuros. De este modo, el MNE combinado de cada especie de triatmino y *T. cruzi*, permite enfocar el análisis de peligro de exposición al vector infectado, y así desarrollar un nicho de transmisión potencial con mayor precisión. A diferencia de los datos estimados anteriormente (Ramsey et al. 2003), la proporción de la población en peligro de transmisión vectorial es 20.0% mayor en la actualidad, siendo la población urbana la mayormente afectada (66,020,056 habitantes) en comparación con la población rural (33,891,811 habitantes), y se proyecta un incremento de la población en peligro para todas las especies en escenarios futuros. La vulnerabilidad de la población mexicana para infección con *T. cruzi* es alta por distintos factores sociales, económicos, culturales, y ambientales, así como el desconocimiento de la enfermedad por la población y por personal de salud pública y de atención médica. Aunque la falta de conocimiento sobre el rol de los triatominos en la transmisión del parásito y la enfermedad que causa es mayor en zonas rurales, la

intensificación de actividades antrópicas, como el comercio y el movimiento de productos agrícolas, o la acelerada fragmentación del paisaje, contribuyen de manera importante a componentes de peligro mediante intercambio e introducción de especies de Triatominae a lugares con condiciones ecológico-ambientales óptimas (Ramsey et al. 2012).

Este estudio es la evaluación más completa de la distribución geográfica de Triatominae de México y EUA, donde se demuestran cambios para pocas especies en la proyección geográfica del MNE. Más allá de la ampliación real de distribuciones dentro de los MNE, los MNE de transmisión de *T. cruzi* en la población humana si proyectan cambios, debido a la movilidad y los cambios en la demografía y actividades humanas. La remarcada vulnerabilidad de la población de México y de la región Sur de EUA debe incitar a la formulación e implementación de estrategias, fundamentadas en evidencias ecológicas, donde el alcance de la estratificación y categorización del territorio por orden de importancia epidemiológica permita un control más eficiente y sustentable para la enfermedad de Chagas.

## REFERENCIAS

- Hotez PJ, Dumontiel E, Woc-Colburn L, Serpa JA, Bezek S, Edwards MS, Hallmark CJ, Musselwhite LW, Flink BJ, Bottazzi ME. Chagas Disease: “The New HIV/AIDS of the Americas”. PLoS Neglected Tropical Diseases 2012;6(5):e1498. Doi: 10.1371/journal.pntd.0001498.
- Ramsey JM, Elizondo-Cano M, Sanchez-Gonzalez G, Peña-Nieves A, Figueroa-Lara A. Opportunity cost for early treatment of Chagas Disease in Mexico. PLoS Neglected Tropical Diseases 2014;8(4):e2776 doi: 10.1371/journal.pntd.0002776.
- Ramsey JM, Tello A, Pohls JL. Iniciativa para la vigilancia y el control de la enfermedad de Chagas en la República Mexicana. México: Instituto Nacional de Salud Pública, 2003:214 pp.

- Leiby DA, Read EJ, Lenés BA, Yund AJ, Stumpf RJ, Kirchhoff LV, Dodd RY. Seroepidemiology of *Trypanosoma cruzi*, etiologic agent of Chagas' disease, in US blood donors. *The Journal of infectious diseases* 1997;176(4):1047–52.
- Leiby DA, Herron RM, Read EJ, Lenés BA, Stumpf RJ. *Trypanosoma cruzi* in Los Angeles and Miami blood donors: impact of evolving donor demographics on seroprevalence and implications for transfusion transmission. *TRANSFUSION* 2002;42:549–55.
- Beard CB, Pye G, Steurer FJ, Rodriguez R, Campman R, Peterson AT, Ramsey J, Wirtz RA, Robinson LE. Chagas disease in a domestic transmission cycle, Southern Texas, USA. *Emerging Infectious Diseases* 2003;9(1):103–105.
- Lambert RC, Kolivras KN, Resler LM, Brewster CC, Paulson SL. The potential for emergence of chagas disease in the United States. *Geospatial Health* 2008; 2(2):227–239.
- Guisan A, Zimmermann NE. Predictive habitat distribution models in ecology. *Ecological Modelling* 2000;135(2-3):147–186.
- Peterson AT. Predicting species geographic distributions based on ecological niche modeling. *The Condor* 2001;103:599–560.
- Soberón JM. Niche and area of distribution modeling: a population ecology perspective. *Ecography* 2010;33(1):159–167.
- Peterson AT. Uses and requirements of ecological niche models and related distributional models. *Biodiversity Informatics* 2006a; 3:59-72.
- Peterson AT. Ecologic niche modeling and spatial patterns of disease transmission. *Emerging Infectious Diseases* 2006b;12(12):1822–1826.
- Soberón JM. Grinnellian and Eltonian niche and geographic distribution of species. *Ecology Letters* 2007;10:1-9.

Peterson AT, Sánchez-Cordero V, Beard CB, Ramsey JM. Ecologic niche modeling and potential reservoirs for Chagas disease, Mexico. *Emerging infectious diseases* 2002a;8(7):662-667.

Costa J, Peterson AT, Beard CB. Ecologic niche modeling and differentiation of populations of *Triatoma brasiliensis* neiva, 1911, the most important Chagas disease vector in northeastern Brazil (Hemiptera, Reduviidae, Triatominae). *The American Journal of Tropical Medicine and Hygiene* 2002;67(5):516–520.

López-Cárdenas J, González-Bravo FE, Salazar-Schettino PM, Gallaga-Solorzano JC, Ramírez-Barba E, Martínez-Méndez J, Sánchez-Cordero V, Peterson AT, Ramsey JM. Fine-scale predictions of distributions of Chagas Disease vectors in the state of Guanajuato, México. *Journal of Medical Entomology* 2005;(42):1068-1081.

Sandoval-Ruiz CA, Zumaquero-Ríos, JL, Rojas-Soto OR. Predicting geographic and ecological distributions of Triatomine species in the Southern Mexican State of Puebla using ecological niche modeling. *Journal of Medical Entomology* 2008;45(3):540-546.

Ibarra-Cerdeña CN, Sánchez-Cordero V, Peterson AT, Ramsey JM. Ecology of North American Triatominae. *Acta Tropica* 2009;110:178–186.

Batista TA, Gurgel-Goncalves R. Ecological niche modelling and differentiation between *Rhodnius neglectus* Lent, 1954 and *Rhodnius nasutus* Stal, 1859 (Hemiptera: Reduviidae: Triatominae) in Brazil. *Memórias Instituto Oswaldo Cruz* 2009;104(8):1165–1170.

Gurgel-Goncalves R, Galvao C, Costa J, Peterson AT. Geographic distribution of chagas disease vectors in Brazil based on ecological niche modeling. *Journal of Tropical Medicine* 2012;2012:705326.

Sandoval-Ruiz CA, Cervantes-Peredo L, Mendoza-Palmero FS, Ibáñez-Bernal. The Triatominae (Hemiptera: Heteroptera: Reduviidae) of Veracruz, Mexico:

geographic distribution, taxonomic redescrptions, and a key. *Zootaxa* 2012;3487:1–23.

Benítez-Alva JI, Huerta H, Téllez-Rendón JL. Distribución de triatominos (Heteroptera: Reduviidae) asociados a la vivienda humana y posibles zonas de riesgo en seis estados de la República Mexicana. *BIOCYT, FES Iztacala, UNAM* 2012; 5(17):327-240

Lent H, Wygodzinsky P. Revision of the Triatominae (Hemiptera, Reduviidae), and their significance as vectors of Chagas' disease. *Bulletin of the American Museum of Natural History*. New York 1979;(163):123-520.

Githeko AK, Lindsay SW, Confalonieri UE, Patz JA. Climate change and vector-borne diseases: a regional analysis. *Bulletin of the World Health Organization* 2000;78(9):1136–1147.

Gubler DJ, Reiter P, Ebi KL, Yap W, Nasci R, Patz JA. Climate variability and change in the United States: potential impacts on vector- and rodent-borne diseases. *Environmental Health Perspectives* 2001;109(2):223–233.

Ramsey JM, Schofield CJ. Control of Chagas disease vectors. *Salud Publica Mex* 2003;45:123-128.

López-Vélez R, Molina-Moreno R. Cambio climático en España y riesgo de enfermedades infecciosas y parasitarias transmitidas por artrópodos y roedores. *Revista Española de Salud Pública* 2005;(79):177-190.

Pearman PB, Guisan A, Broennimann O, Randin CF. Niche dynamics in space and time. *Trends in Ecology and Evolution* 2007;(23):149-158.

Gage KL, Burkot TR, Eisen RJ, Hayes EB. Climate and vectorborne diseases. *American Journal of Preventive Medicine* 2008;35(5):436–50.

Carcavallo RU, Martínez A. Life cycles of some species of *Triatoma* (Hemiptera, Reduviidae). *The Canadian Entomologist* 1972;104:699-704.

- Silva IG. Influencia da temperatura na biologia de Triatomíneos. XIII. *Triatoma matogrossensis* Lent & Barbosa, 1953 (Hemiptera, Reduviidae). Memórias Instituto Oswaldo Cruz 1986;81(Suppl.):163.
- Silva IG, Silva HHG. Influencia da temperatura na biologia de Triatomíneos. V. *Rhodnius riasutus* Stal, 1859 (Hemiptera, Reduviidae). Memórias Instituto Oswaldo Cruz 1986;81(Suppl.):163.
- Hack W. Estudios sobre biología del *Triatoma infestans* (Klug, 1834) (Hemiptera, Reduviidae). Anales del Instituto de Medicina Regional 1955;4:125-147.
- Zeledón R, Guardia VM, Zuniga AM, Swartzwelder JC. Biology and ethology of *Triatoma dimidiata* (Latreille 1811). I. life cycle, amount of blood ingested, resistance to starvation and size of adults. Journal of Medical Entomology 1970;7:313-319.
- Moo-Llanes D, Ibarra-Cerdeña CN, Rebollar-Téllez EA, Ibáñez-Bernal S, González C, Ramsey JM. Current and future niche of North and Central American sand flies (Diptera: Psychodidae) in climate change scenarios. PLoS Neglected Tropical Diseases 2013;7(9):e2421.
- Garza M, Feria TP, Casillas EA, Sanchez-Cordero V, Rivaldi CL, Sarkar S. Projected Future Distributions of Vectors of *Trypanosoma cruzi* in North America under Climate Change Scenarios. PLoS Neglected Tropical Diseases 2014;8(5):e2818.
- Inter-governmental Program on Climate Change (IPCC). Climate change 2013: The physical science basis. Contribution of Working group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA 2013;1535pp.
- Olson DM, Dinerstein E, Wikramanayake DE, Burgess ND, Powell GVN et al. Terrestrial ecoregions of the world: a new map of life on earth. BioScience 2001; (51):933-938.

- Owens H, Campbell L, Dornak L, Saupe E, Barve N, Soberón J, Ingenloff K, Lira-Noriega A, Hensz C, Myers C, Peterson AT. Constraints on interpretation of ecological niche models by limited environmental ranges on calibration areas. *Ecological Modelling* 2013;(263):10–18
- U.S. Geological Survey (USGS). Science for a Changing World. [Consultado desde agosto de 2013]. Disponible en: <http://www.usgs.gov/>
- Advanced Very High Resolution Radiometer (AVHRR) [Consultado desde agosto de 2013]. Disponible en: <http://noaasis.noaa.gov/NOAASIS/ml/avhrr.html>
- WorldClim-Global Climate Data [Consultado desde agosto de 2013]. Disponible en: <http://www.worldclim.org/>
- Stockwell D, Peters D. The GARP modelling systems: Problems and solutions to automated spatial prediction. *Int J Geogr Inf Syst* 1999;(13):143-158.
- de Souza M, de Giovanni R, Ferreira M, Sutton T, Brewer P, Scachetti P, Lange C, Perez C. openModeller: a generic approach to specie's potential distribution modelling. *Geoinformatica* 2009;(15):111-135.
- Anderson R, Lew D, Peterson AT. Evaluating predictive models of specie's distributions: Criteria for selecting optimal models. *Ecological Modelling* 2003;162:211–232.
- Peterson AT, Soberón J, Pearson RG, Anderson RP, Martínez-Meyer E et al. *Ecological niches and geographic distributions*. Princeton University Press 2011;328 pp.
- Raxworthy CJ, Martinez-Meyer E, Horning N, Nussbaum RA, Schneider GE, Ortega-Huerta MA, Peterson AT. Predicting distributions of known and unknown reptile species in Madagascar. *Nature* 2003;426:837-841.
- Stevens B, Giorgetta M, Esch M, Mauritsen T, Crueger T, Rast S, Salzmann M, Schmidt H, Bader J, Block K, Brokopf R, Fast I, Kinne S, Kornblueh L, Lohmann U, Pincus R, Reichler T, Roeckner E. Atmospheric component of the MPI-M

- Earth System Model: ECHAM 6. Journal of advances in Modeling Earth Systems 2013;(5):1-27. Doi:10.1002/jame.20015.
- Conde C, Estrada F, Martínez B, Sánchez O, Gay C. Regional climate change scenarios for México. *Atmósfera* 2011; 24(1):125-140.
- Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (CONABIO). [Consultado desde agosto de 2013]. Disponible en: <http://www.conabio.gob.mx/>
- Comisión Nacional Forestal (CONAFOR) [Consultado desde agosto de 2013]. Disponible en: <http://www.conafor.gob.mx/web/>
- Consejo Nacional de Población (CONAPO). [Consultado desde agosto de 2013]. Disponible en: <http://www.conapo.gob.mx/>
- Bern C, Kjos S, Yabsley MJ, Montgomery SP. *Trypanosoma cruzi* and Chagas Disease in the United States. *Clinical microbiology reviews* 2011; p. 655–681.
- Zeledón R, Beard C, Pinto-Dias JC, Leiby A, Dorn P, Coura JR. An appraisal of the status of Chagas disease in the United States. Elsevier Science Publishing Co Inc. 2012; p. 5-32.
- Zárate LG, Zárate RJ. A checklist of the Triatominae (Hemiptera: Reduviidae) of México. *International Journal of Entomology* 1985;27(1-2):102-127.
- Grinnell J. The niche-relationships of the California Thrasher. *The Auk*. 1917; 34:427-433.
- Elton C. Competition and the structure of ecological communities. *Journal of Animal Ecology* 1946;15(1):54-68.
- Morrone JJ. Hacia una síntesis biogeográfica de México. *Revista Mexicana de Biodiversidad* 2005;76(2):207-252.
- Rzedowski, J. *Vegetación de México*, Ed. Limusa. México, D.F. 1978;432 pp.

- Ceballos G, Arroyo-Cabrales, Medellín RA. Mamíferos de México. Diversidad y Conservación de los Mamíferos Neotropicales. CONABIO-UNAM. México, D.F. 2002; p 377- 413.
- Peterson AT, Ortega-Huerta MA, Bartley J, Soberón J, Sánchez V, Stockwell DRB. Future projections for Mexican faunas under global climate change scenarios. *Nature* 2002b;416:626-629.
- Ramsey JM, Peterson AT, Carmona-Castro O, Moo-Llanes D, Ibarra-Cerdeña CN. Atlas of North American Triatominae. MOIC (en prensa).
- Ruiz-Piña & Cruz-Reyes. The opossum *Didelphis virginiana* as a synanthropic reservoir of *Trypanosoma cruzi* in Dzidzilché, Yucatán, México. *Mem Inst Oswaldo Cruz, Rio de Janeiro*, 2002;Vol. 97(5): 613-620.
- Bosseno MF, García LS, Baunaure F, Gastelúm EM, Gutierrez MS, Kasten FL, Dumonteil E, Breniere SF. Short report: identification in triatomino vectors of feeding sources and *Trypanosoma cruzi* variants by heteroduplex assay and a multiplex miniexon polymerase chain reaction. *Am. J. Trop. Med. Hyg* 2006;74(2), pp. 303–305.
- Ramsey JM, Gutiérrez-Cabrera AE, Salgado Ramírez L, Peterson AT, Sánchez-Cordero V, Ibarra-Cerdeña CN. Ecological connectivity of *Trypanosoma cruzi* reservoirs and *Triatoma pallidipennis* hosts in an anthropogenic landscape with endemic Chagas disease. *PLoS ONE* 2012;7(9): e46013.  
doi:10.1371/journal.pone.0046013
- Valdez-Tah AR, Huicochea-Gómez L, Nazar-Beutelspacher A, Ortega-Canto J. Ramsey JM. La vulnerabilidad humana a la transmisión vectorial de *Trypanosoma cruzi* mediante los procesos de salud-enfermedad y la apropiación social del territorio. *Salud Colectiva* 2014 (en prensa).
- Martínez-Meyer E, Díaz-Porras D, Peterson AT, Yáñez-Arenas C. Ecological niche structure and rangewide abundance patterns of species. *Biology letters* 2012;20120637. <http://dx.doi.org/10.1098/rsbl.2012.0637>.

- Schofield CJ, Diotaiuti L, Dujardin JP. The process of domestication in Triatominae. Mem Inst Oswaldo Cruz 1999;Vol. 94, Suppl. I: 375-378
- Salazar-Schettino PM, Bucio MI, Cabrera M, Bautista J. First Case of Natural Infection in Pigs. Review of *Trypanosoma cruzi* reservoirs in Mexico. Mem Inst Oswaldo Cruz 1997;Vol. 92(4):499-502.
- Brown E, Roellig D, Gompper M, Monello R, Wenning K, Gabriel M, Yabsley M. Seroprevalence of *Trypanosoma cruzi* Among Eleven Potential Reservoir Species from Six States Across the Southern United States. Vector-borne and zoonotic diseases 2010;10(8).
- Tenney TD, Curtis-Robles R, Snowden KF, Hamer SA. Shelter Dogs as sentinels for *Trypanosoma cruzi* transmission across Texas, USA. Emerging Infectious Diseases 2014;(20):8.

## MATERIAL SUPLEMENTARIO

**Tabla 1. Registros de ocurrencia de Triatominae de México y EUA.**

**Tabla 2. Resultados de evaluación de modelos de Triatominae y *Trypanosoma cruzi* de México y EUA.**

**Tabla 3. Clasificación del uso de suelo / vegetación en base al Inventario Nacional Forestal (INF 2007).**

**Tabla 4. Efecto de cambio climático sobre la elevación de los MNE de Triatominae, para RCP 4.5 y RCP 8.5.**

**Tabla 5. Efectos de cambio climático sobre el centroide de los MNE de Triatominae, para RCP 4.5 y RCP 8.5.**

**Tabla 6. Resultados de evaluación de cambios en amplitud, elevación, población humana expuesta, y uso de suelo / vegetación, entre regiones biogeográficas.** Las columnas indican 5 categorías de comparación: (1) región Neártica menor; (2) región Neotropical menor; (3) región Neotropical mayor; (4) región extendida Neártica; y (5) región Neártica mayor. Letras diferentes indican cambios significativos entre grupos de especies por región biogeográfica.

**Tabla 7. Comparación entre la población humana rural y urbana para México, en tres periodos de tiempo (actual, 2050, 2070) y dos escenarios de CC (RCP 4.5 y RCP 8.5).**

**Fig. 1. Proyección geográfica de la riqueza de Triatominae de NA en base a la predicción del nicho ecológico actual de 32 especies, modelado con DesktopGarp.** A) La proyección de los MNE´s indica las áreas de mayor probabilidad de ocurrencia de especies en orden ascendente de acuerdo a cinco categorías: 0 especies (color blanco), 1 – 3 especies (color verde), 4 – 6 especies (color amarillo), 7 – 9 especies (color naranja) y 10 – 12 especies (color rojo). B) Los registros de ocurrencia de Triatominae se muestran en puntos color negro.

**Fig. 2. Amplitud del nicho ecológico de triatominos y *T. cruzi* en tiempo actual.** La distribución geográfica predicha por los MNE de las especies Neárticas es mayor que para las otras especies de triatominos (excepto *T. peninsularis*). *Trypanosoma cruzi* también tiene un nicho ecológico amplio proyectado (28.38% del territorio de México y EUA). Las barras indican los valores absolutos de la cobertura del nicho ecológico predicho (1 pixel = 1 km<sup>2</sup>).

**Fig. 3. Patrones de cambio de amplitud de nicho ecológico de Triatominae de Norteamérica en dos escenarios climático.** El color de los puntos representa las regiones biogeográficas de las especies: rojo= especies Neotropicales, negro= especies Neárticas y verde= especies con extensión a región Neártica. El recuadro con líneas discontinuas tiene siete especies con rango de amplitud de 18 al 60% en relación a su área accesible (M), en ambos escenarios (RCP 4,5 y RCP 8,5). Las especies enumeradas son: 1) *T. recurva*, 2) *T. leticularia* y 3) *T. brailovskyi*.

**Fig. 4. Cambios en el promedio de elevación de los MNE en el escenario RCP 4.5 en tres periodos de tiempo.** La variación en el promedio de elevación es significativamente diferente entre especies agrupadas por regiones biogeográficas ( $p < 0.05$ ) y es mayor para las especies con extensión a la región Neártica. Esta diferencia entre regiones se mantiene para el año 2050 y 2070 en RCP 4.5.

**Fig. 5. Cambios en el promedio de elevación en el escenario 2050 para RCP 4.5 y RCP 8.5.** La mayoría de las especies mantienen el mismo promedio en ambos escenarios RCP con respecto a los valores del MNE actual ( $p > 0.05$ ).

**Fig. 6. Proyección geográfica actual y asociación entre de uso de suelo / vegetación y el nicho ecológico de triatominos de México, obtenido de un modelo combinado entre el MNE de riqueza de 32 especies y el Inventario Nacional Forestal (INF).** La distribución del nicho ecológico de la especies tiene una asociación tres veces mayor en áreas conservadas en comparación en áreas modificadas para el tiempo actual.

**Fig. 7. Cobertura del nicho ecológico de triatominos de México en base al uso de suelo / vegetación proyectado sobre el MNE de cada especie.** Se observan dos categorías de uso de suelo / vegetación: conservado (barras negras) y modificado (barras grises). La asociación es mayor en tipo de suelo conservado para todas las especies en tiempo actual (1 pixel = 1 km<sup>2</sup>).

**Fig. 8. Población humana rural expuesta en México al nicho de transmisión para la enfermedad de Chagas en ambos escenarios de CC.** Las especies se agrupan de acuerdo a dos criterios: 1) cantidad de población expuesta por proyección del MNE de cada especie, y 2) por regiones biogeográficas de acuerdo a la amplitud del nicho ecológico de cada especie. El color de las barras indica tres tiempos diferentes: actual (color negro), 2050 (color blanco) y 2070 (color gris).

**Fig. 9. Población humana urbana expuesta en México al nicho de transmisión para la enfermedad de Chagas en ambos escenarios de CC.** Las especies se agrupan de acuerdo a dos criterios: 1) cantidad de población expuesta por proyección del MNE de cada especie, y 2) por regiones biogeográficas de acuerdo a la amplitud del nicho ecológico de cada especie. El color de las barras indica tres tiempos diferentes: actual (color negro), 2050 (color blanco) y 2070 (color gris).

**Fig. 10. Modelo de nicho ecológico de *Eratyrus cuspidatus* (Neotropical).** A) Escenario actual, B) escenario RCP 4.5, 2050, C) escenario RCP 8.5, 2050, D) escenario RCP 4.5, 2070 y E) escenario RCP 8.5, 2070.

**Fig. 11. Modelo de nicho ecológico de *Paratriatoma hirsuta* (Neártica).** A) Escenario actual, B) escenario RCP 4.5, 2050, C) escenario RCP 8.5, 2050, D) escenario RCP 4.5, 2070 y E) escenario RCP 8.5, 2070.

**Fig. 12. Modelo de nicho ecológico de *Triatoma barberi* (Neártica extendida).** A) Escenario actual, B) escenario RCP 4.5, 2050, C) escenario RCP 8.5, 2050, D) escenario RCP 4.5, 2070 y E) escenario RCP 8.5, 2070.

**Fig. 13. Modelo de nicho ecológico de *Triatoma brailovskyi* (Neotropical).** A) Escenario actual, B) escenario RCP 4.5, 2050, C) escenario RCP 8.5, 2050, D) escenario RCP 4.5, 2070 y E) escenario RCP 8.5, 2070.

**Fig. 14. Modelo de nicho ecológico de *Triatoma dimidiata* Hg. 1 (Neotropical).** A) Escenario actual, B) escenario RCP 4.5, 2050, C) escenario RCP 8.5, 2050, D) escenario RCP 4.5, 2070 y E) escenario RCP 8.5, 2070.

**Fig. 15. Modelo de nicho ecológico de *Triatoma dimidiata* Hg. 2 (Neotropical).** A) Escenario actual, B) escenario RCP 4.5, 2050, C) escenario RCP 8.5, 2050, D) escenario RCP 4.5, 2070 y E) escenario RCP 8.5, 2070.

**Fig. 16. Modelo de nicho ecológico de *Triatoma dimidiata* Hg. 3 (Neotropical).** A) Escenario actual, B) escenario RCP 4.5, 2050, C) escenario RCP 8.5, 2050, D) escenario RCP 4.5, 2070 y E) escenario RCP 8.5, 2070.

**Fig. 17. Modelo de nicho ecológico de *Triatoma gerstaeckeri* (Neártica).** A) Escenario actual, B) escenario RCP 4.5, 2050, C) escenario RCP 8.5, 2050, D) escenario RCP 4.5, 2070 y E) escenario RCP 8.5, 2070.

**Fig. 18. Modelo de nicho ecológico de *Triatoma leticularia* (Neártica).** A) Escenario actual, B) escenario RCP 4.5, 2050, C) escenario RCP 8.5, 2050, D) escenario RCP 4.5, 2070 y E) escenario RCP 8.5, 2070.

**Fig. 19. Modelo de nicho ecológico de *Triatoma longipennis* (Neártica extendida).** A) Escenario actual, B) escenario RCP 4.5, 2050, C) escenario RCP 8.5, 2050, D) escenario RCP 4.5, 2070 y E) escenario RCP 8.5, 2070.

**Fig. 20. Modelo de nicho ecológico de *Triatoma mazzottii* (Neotropical).** A) Escenario actual, B) escenario RCP 4.5, 2050, C) escenario RCP 8.5, 2050, D) escenario RCP 4.5, 2070 y E) escenario RCP 8.5, 2070.

**Fig. 21. Modelo de nicho ecológico de *Triatoma mexicana* (Neártica extendida).** A) Escenario actual, B) escenario RCP 4.5, 2050, C) escenario RCP 8.5, 2050, D) escenario RCP 4.5, 2070 y E) escenario RCP 8.5, 2070.

**Fig. 22. Modelo de nicho ecológico de *Triatoma pallidipennis* (Neotropical).**

A) Escenario actual, B) escenario RCP 4.5, 2050, C) escenario RCP 8.5, 2050, D) escenario RCP 4.5, 2070 y E) escenario RCP 8.5, 2070.

**Fig. 23. Modelo de nicho ecológico de *Triatoma peninsularis* (Neártica).**

A) Escenario actual, B) escenario RCP 4.5, 2050, C) escenario RCP 8.5, 2050, D) escenario RCP 4.5, 2070 y E) escenario RCP 8.5, 2070.

**Fig. 24. Modelo de nicho ecológico de *Triatoma phyllosoma* (Neotropical).**

A) Escenario actual, B) escenario RCP 4.5, 2050, C) escenario RCP 8.5, 2050, D) escenario RCP 4.5, 2070 y E) escenario RCP 8.5, 2070.

**Fig. 25. Modelo de nicho ecológico de *Triatoma picturata* (Neotropical).**

A) Escenario actual, B) escenario RCP 4.5, 2050, C) escenario RCP 8.5, 2050, D) escenario RCP 4.5, 2070 y E) escenario RCP 8.5, 2070.

**Fig. 26. Modelo de nicho ecológico de *Triatoma protracta* (Neártica).**

A) Escenario actual, B) escenario RCP 4.5, 2050, C) escenario RCP 8.5, 2050, D) escenario RCP 4.5, 2070 y E) escenario RCP 8.5, 2070.

**Fig. 27. Modelo de nicho ecológico de *Triatoma recurva* (Neártica).**

A) Escenario actual, B) escenario RCP 4.5, 2050, C) escenario RCP 8.5, 2050, D) escenario RCP 4.5, 2070 y E) escenario RCP 8.5, 2070.

**Fig. 28. Modelo de nicho ecológico de *Triatoma rubida* (Neártica).**

A) Escenario actual, B) escenario RCP 4.5, 2050, C) escenario RCP 8.5, 2050, D) escenario RCP 4.5, 2070 y E) escenario RCP 8.5, 2070.

**Fig. 29. Modelo de nicho ecológico de *Triatoma sanguisuga* (Neártica).**

A) Escenario actual, B) escenario RCP 4.5, 2050, C) escenario RCP 8.5, 2050, D) escenario RCP 4.5, 2070 y E) escenario RCP 8.5, 2070.

**Fig. 30. Modelo de nicho ecológico de *Trypanosoma cruzi* (MEX-EUA).**

A) Escenario actual, B) escenario RCP 4.5, 2050, C) escenario RCP 8.5, 2050, D) escenario RCP 4.5, 2070 y E) escenario RCP 8.5, 2070.

**Fig. 31. Mapas de especies con  $\leq 10$  registros de ocurrencia.** *Belminus costaricensis* (Neotropical), *Dipetalogaster maxima* (Neártica), *Panstrongylus rufotuberculatus* (Neotropical), *Triatoma bassolsae* (Neotropical), *Triatoma bolivari* (Neotropical) y *Triatoma hegneri* (Neotropical).

**Fig. 32. Mapas de especies con  $\leq 10$  registros de ocurrencia.** *Triatoma incrassata* (Neártica), *Triatoma indictiva* (Neártica extendida), *Triatoma neotomae* (Neártica), *Triatoma nitida* (Neotropical) y *Triatoma sinaloensis* (Neártica).

**Tabla 1. Registros de ocurrencia de Triatominae de México y EUA.**

<b>Id</b>	<b>Species complex</b>	<b>Species</b>	<b>Subspecies</b>	<b>Region</b>	<b>Data points</b>	
1	-	<i>Belminus costaricensis</i>		NEOTROPICAL	2	
2	-	<i>Dipetalogaster maxima</i>		NEARCTIC	6	
3	-	<i>Eratyrus cuspidatus</i>		NEOTROPICAL	13	
4	-	<i>Panstrongylus rufotuberculatus</i>		NEOTROPICAL	9	
5	-	<i>Paratriatoma hirsuta</i>		NEARCTIC	56	
6	-	<i>Triatoma gomeznuñezi</i>		NEOTROPICAL	1	
7		<i>Triatoma dimidiata</i> Haplogroup 1		NEOTROPICAL	77	
8	Dimidiata	<i>Triatoma dimidiata</i> Haplogroup 2		NEOTROPICAL	485	
9		<i>Triatoma dimidiata</i> Haplogroup 3		NEOTROPICAL	42	
10		<i>Triatoma hegneri</i>		NEOTROPICAL	6	
11		<i>Triatoma incrassata</i>		NEARCTIC	5	
12	Leticularia	<i>Triatoma indictiva</i>		NEOTROPICAL EXTENDED	5	
13		<i>Triatoma leticularia</i>		NEARCTIC	30	
14		<i>Triatoma sanguisuga</i>		NEARCTIC	83	
15		<i>Triatoma bassolsae</i>		NEOTROPICAL	1	
16		<i>Triatoma brailovskyi</i>		NEOTROPICAL	11	
17		<i>Triatoma bolivari</i>		NEOTROPICAL	4	
18		<i>Triatoma gerstaeckeri</i>		NEARCTIC	164	
19		<i>Triatoma longipennis</i>		NEARCTIC EXTENDED	233	
20	Phyllosoma	<i>Triatoma mazzottii</i>		NEOTROPICAL	80	
21		<i>Triatoma mexicana</i>		NEARCTIC EXTENDED	271	
22		<i>Triatoma pallidipennis</i>		NEOTROPICAL	291	
23		<i>Triatoma phyllosoma</i>		NEOTROPICAL	40	
24		<i>Triatoma picturata</i>		NEOTROPICAL	16	
25		<i>Triatoma recurva</i>		NEARCTIC	33	
26		<i>Triatoma barberi</i>		NEARCTIC EXTENDED	369	
27		<i>Triatoma neotomae</i>		NEARCTIC	10	
28		<i>Triatoma nitida</i>		NEOTROPICAL	7	
29		<i>Triatoma peninsularis</i>		NEARCTIC	10	
30	Protracta		<i>T. protracta protracta</i>		177	
31			<i>T. protracta nahuatlae</i>			
32			<i>Triatoma protracta</i>	<i>T. protracta woodi</i>	NEARCTIC	
33				<i>T. protracta zacatecensis</i>		
34				<i>T. protracta navajoensis</i>		
35		<i>Triatoma sinaloensis</i>		NEARCTIC	5	
36			<i>T. rubida cochimiensis</i>		121	
37			<i>T. rubida jaegeri</i>			
38	Rubida	<i>Triatoma rubida</i>	<i>T. rubida rubida</i>	NEARCTIC		
39			<i>T. rubida sonoriana</i>			
40			<i>T. rubida uhleri</i>			
TOTAL					2663	

**Tabla 2. Resultados de evaluación de modelos de Triatominae y *Trypanosoma cruzi* de México y EUA.**

<b>Id</b>	<b>Triatoma species complex</b>	<b>Species</b>	<b>Region</b>	<b>Points</b>	<b>Background</b>	<b>Niche breadth</b>	<b>Internal test AUC</b>	<b>External test AUC</b>	<b>p</b>
1	Protracta	<i>Triatoma peninsularis</i>	NEARCTIC	10	9,230,464	20,892	1	1	1.45 <sup>E-33</sup>
2	Phyllosoma	<i>Triatoma brailovskyi</i>	NEOTROPICAL	11	652,655	28,735	0.99	0.6	6.68 <sup>E-01</sup>
3	Phyllosoma	<i>Triatoma picturata</i>	NEOTROPICAL	16	680,567	39,457	0.98	0.98	2.87 <sup>E-04</sup>
4	Dimidiata	<i>Triatoma dimidiata</i> Hg 3	NEOTROPICAL	42	650,039	55,391	0.91	0.91	2.71 <sup>E-07</sup>
5	-	<i>Eratyrus cuspidatus</i>	NEOTROPICAL	13	650,095	64,912	0.99	0.84	1.44 <sup>E-05</sup>
6	Dimidiata	<i>Triatoma dimidiata</i> Hg 1	NEOTROPICAL	77	650,095	99,969	0.93	0.9	4.78 <sup>E-11</sup>
7	Phyllosoma	<i>Triatoma phyllosoma</i>	NEOTROPICAL	40	650,095	144,082	0.91	0.78	4.11 <sup>E-03</sup>
8	Phyllosoma	<i>Triatoma pallidipennis</i>	NEOTROPICAL	291	690,750	153,414	0.9	0.91	1.79 <sup>E-26</sup>
9	Phyllosoma	<i>Triatoma mazzottii</i>	NEOTROPICAL	80	696,139	321,170	0.86	0.88	9.36 <sup>E-03</sup>
10	Dimidiata	<i>Triatoma dimidiata</i> Hg 2	NEOTROPICAL	485	701,541	344,142	0.95	0.92	6.60 <sup>E-14</sup>
11	Phyllosoma	<i>Triatoma mexicana</i>	NEARCTIC EXTENDED	271	10,069,567	206,127	0.99	0.99	5.96 <sup>E-22</sup>
12	Phyllosoma	<i>Triatoma longipennis</i>	NEARCTIC EXTENDED	233	10,069,567	338,878	0.99	0.99	1.14 <sup>E-14</sup>
13	Protracta	<i>Triatoma barberi</i>	NEARCTIC EXTENDED	369	10,069,567	435,238	0.99	0.99	3.91 <sup>E-21</sup>
14	Leticularia	<i>Triatoma leticularia</i>	NEARCTIC	30	9,230,464	1,056,429	0.96	0.83	6.01 <sup>E-02</sup>
15	Phyllosoma	<i>Triatoma recurva</i>	NEARCTIC	33	9,275,367	1,102,034	0.95	0.9	4.29 <sup>E-08</sup>
16	Phyllosoma	<i>Triatoma gerstaeckeri</i>	NEARCTIC	164	9,270,987	1,262,284	0.95	0.94	1.88 <sup>E-17</sup>
17	Rubida	<i>Triatoma rubida</i>	NEARCTIC	121	9,283,966	1,316,661	0.93	0.93	4.74 <sup>E-24</sup>
18	Leticularia	<i>Triatoma sanguisuga</i>	NEARCTIC	83	9,230,464	2,228,644	0.92	0.88	3.51 <sup>E-05</sup>
19	Protracta	<i>Triatoma protracta</i>	NEARCTIC	177	9,230,464	2,433,840	0.89	0.88	1.63 <sup>E-07</sup>
20	-	<i>Paratriatoma hirsuta</i>	NEARCTIC	56	9,230,464	3,023,185	0.88	0.85	6.69 <sup>E-02</sup>
21	-	<i>Trypanosoma cruzi</i>	MEX-USA	669	10,069,567	2,857,565	0.91	0.91	4.48 <sup>E-50</sup>

**Tabla 3. Clasificación del uso de suelo / vegetación en base al Inventario Nacional Forestal (INF 2007).**

<b>Uso de suelo</b>	<b>Conservado</b>	<b>Modificado</b>
Agricultura (de temporal)		X
Agricultura (riego y humedad)		X
Área sin vegetación aparente		X
Asentamiento humano		X
Caducifolia y sub-caducifolia	X	
Coníferas	X	
Coníferas-latifoliadas	X	
Latifoliadas	X	
Matorral xerófilo	X	
Mesófilo de montana	X	
Mezquital	X	
Otros tipos de vegetación	X	
Pastizal	X	
Perennifolia y sub-perennifolia	X	
Plantación forestal		X
Vegetación hidrófila	X	

**Tabla 4. Efecto de cambio climático sobre la elevación de los MNE de Triatominae, para RCP 4.5 y RCP 8.5.**

Id	Species	Region	Elevation mean (m)					Elevation range (m)
			Current	RCP 4.5 - 2050	RCP 4.5 - 2070	RCP 8.5 - 2052	RCP 8.5 - 2070	(Min - Max)
1	<i>Triatoma peninsularis</i>	NEARCTIC	125	126	100	79	124	(0 - 225)
2	<i>Triatoma brailovskyi</i>	NEOTROPICAL	409	678	496	564	600	(39 - 1041)
3	<i>Triatoma picturata</i>	NEOTROPICAL	1286	1097	1288	1361	1344	(718 - 1731)
4	<i>Triatoma dimidiata</i> Hg 3	NEOTROPICAL	658	597	528	647	534	(88 - 1395)
5	<i>Eratyrus cuspidatus</i>	NEOTROPICAL	877	1073	1029	948	808	(342 - 2289)
6	<i>Triatoma dimidiata</i> Hg 1	NEOTROPICAL	44	46	48	46	46	(1 - 190)
7	<i>Triatoma phyllosoma</i>	NEOTROPICAL	832	760	794	858	753	(18 - 1850)
8	<i>Triatoma pallidipennis</i>	NEOTROPICAL	1210	1203	1207	1202	1209	(622 - 1781)
9	<i>Triatoma mazzottii</i>	NEOTROPICAL	838	884	916	896	867	(22 - 1785)
10	<i>Triatoma dimidiata</i> Hg 2	NEOTROPICAL	259	279	288	281	245	(10 - 1045)
11	<i>Triatoma mexicana</i>	NEARTCTIC EXTENDED	1369	1338	1338	1376	1285	(113 - 2107)
12	<i>Triatoma longipennis</i>	NEARTCTIC EXTENDED	1354	1358	1326	1323	1339	(377 - 2084)
13	<i>Triatoma barberi</i>	NEARTCTIC EXTENDED	1751	1731	1739	1742	1729	(1047 - 2321)
14	<i>Triatoma leticularia</i>	NEARCTIC	436	342	479	473	478	(92 - 975)
15	<i>Triatoma recurva</i>	NEARCTIC	729	678	782	706	778	(14 - 1587)
16	<i>Triatoma gerstaeckeri</i>	NEARCTIC	580	494	602	533	655	(18 - 1598)
17	<i>Triatoma rubida</i>	NEARCTIC	617	587	568	585	606	(1 - 1325)
18	<i>Triatoma sanguisuga</i>	NEARCTIC	182	197	186	192	201	(14 - 490)
19	<i>Triatoma protracta</i>	NEARCTIC	925	981	887	981	953	(28 - 1889)
20	<i>Paratriatoma hirsuta</i>	NEARCTIC	637	777	769	696	718	(48 - 1642)
21	<i>Trypanosoma cruzi</i>	MEX-USA	573	553	540	560	597	(10 - 1900)

**Tabla 5. Efectos de cambio climático sobre el centroide de los MNE de Triatominae, para RCP 4.5 y RCP 8.5.**

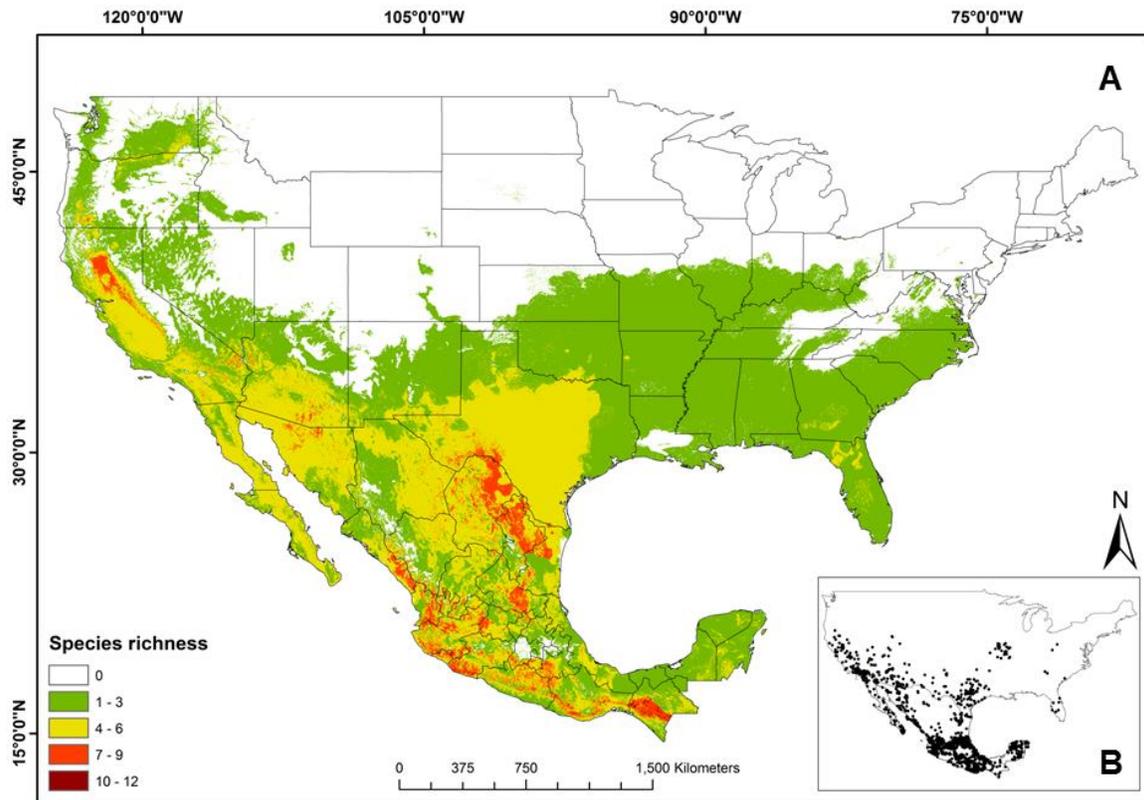
Species	RCP 4.5 - 2050			RCP 4.5 - 2070			RCP 8.5 - 2050			RCP 8.5 - 2070		
	Distance (km)	Azimut		Distance (km)	Azimut		Distance (km)	Azimut		Distance (km)	Azimut	
		Degrees	Orientation									
<i>Triatoma peninsularis</i>	21.8	145	SE	167.3	140	SE	190.1	310	NW	163.8	145	SE
<i>Triatoma brailovskyi</i>	18.4	230	SW	15.8	325	NW	59.7	95	SE	22.0	260	SW
<i>Triatoma picturata</i>	170.5	120	SE	65.3	130	SE	48.5	300	NW	71.4	120	SE
<i>Triatoma dimidiata</i> Hg 3	23.2	300	NW	84.3	300	NW	128.7	280	NW	69.2	40	NE
<i>Eratyrus cuspidatus</i>	58.5	295	NW	48.0	290	NW	57.5	305	NW	64.6	315	NW
<i>Triatoma dimidiata</i> Hg 1	3.7	175	SE	5.3	95	SE	21.2	225	SW	7.4	75	NE
<i>Triatoma phyllosoma</i>	93.2	20	NE	76.9	315	NW	103.1	305	NW	137.2	60	NE
<i>Triatoma pallidipennis</i>	21.5	320	NW	19.5	25	NE	20.0	330	NW	34.8	340	NW
<i>Triatoma mazzottii</i>	21.4	255	SW	39.5	195	SW	60.9	275	NW	30.6	130	SE
<i>Triatoma dimidiata</i> Hg 2	113.4	280	NW	81.8	270	SW	52.1	265	SW	48.7	80	NE
<i>Triatoma mexicana</i>	60.7	55	NE	29.8	345	NW	43.8	295	NW	57.3	30	NE
<i>Triatoma longipennis</i>	44.0	135	SE	45.7	150	SE	3.2	205	SW	18.9	275	NW
<i>Triatoma barberi</i>	80.9	140	SE	38.9	155	SE	64.5	140	SE	37.4	140	SE
<i>Triatoma leticularia</i>	226.1	115	SE	418.0	270	SW	149.0	260	SW	320.6	275	NW
<i>Triatoma recurva</i>	53.3	110	SE	204.1	355	NW	42.1	55	NE	217.3	355	NW
<i>Triatoma gerstaeckeri</i>	139.8	130	SE	182.1	240	SW	74.3	315	NW	157.2	205	SW
<i>Triatoma rubida</i>	84.3	80	NE	78.4	95	SE	40.2	280	NW	16.5	325	NW
<i>Triatoma sanguisuga</i>	297.5	280	NW	176.2	280	NW	250.3	285	NW	138.8	340	NW
<i>Triatoma protracta</i>	108.8	270	SW	121.8	175	SE	118.3	265	SW	180.4	235	SW
<i>Paratriatoma hirsuta</i>	417.4	275	NW	410.7	275	NW	169.6	285	NW	263.9	285	NW
<i>Trypanosoma cruzi</i>	102.5	235	SW	193.3	225	SW	187.5	215	SW	146.0	220	SW

**Tabla 6. Resultados de evaluación de cambios en amplitud, elevación, población humana expuesta, y uso de suelo / vegetación, entre regiones biogeográficas.** Las columnas indican 5 categorías de comparación: (1) región Neártica menor; (2) región Neotropical menor; (3) región Neotropical mayor; (4) región extendida Neártica; y (5) región Neártica mayor. Letras diferentes indican cambios significativos entre grupos de especies por región biogeográfica.

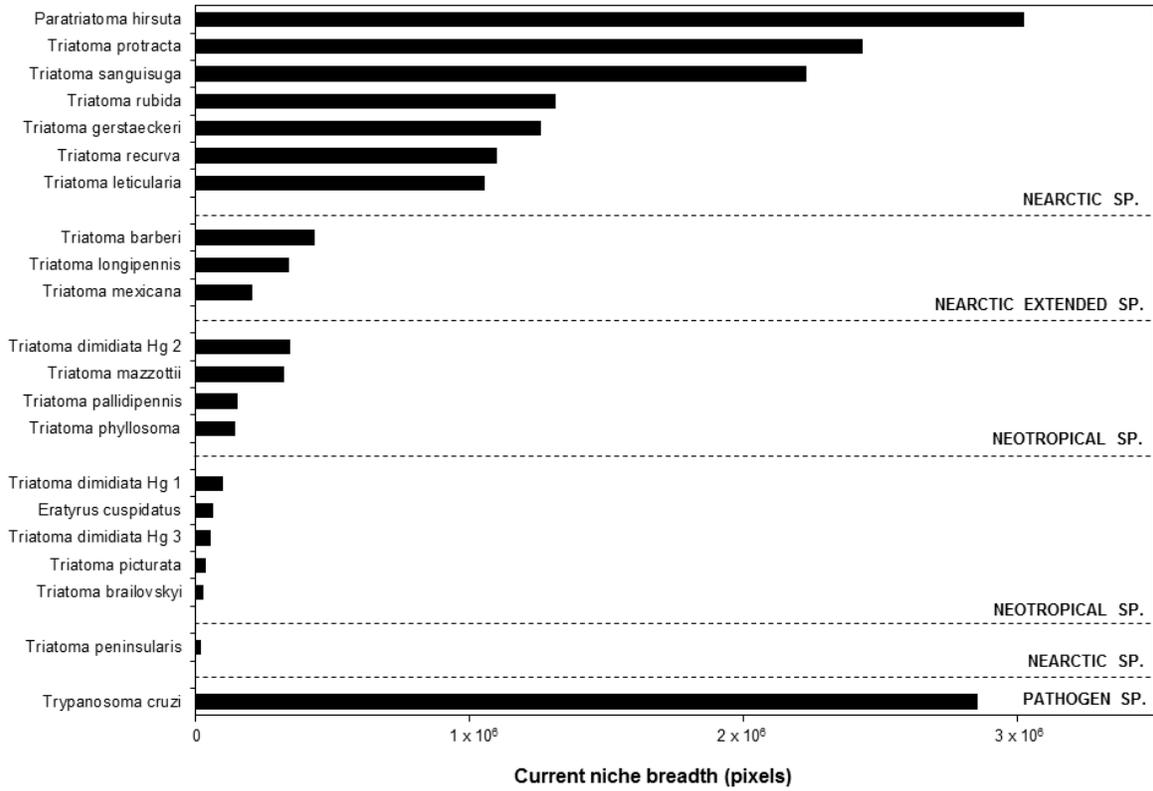
Scenario	Biogeographical region comparison					df	F-value	p
	Nearctic (1)	Neotropical (2)	Neotropical (3)	Extended Nearctic (4)	Nearctic (5)			
<b>Niche breadth</b>								
Current	a	a	a	a	b	4	12	1.42E <sup>-04</sup>
RCP 4.5 - 2050	ab	a	a	a	b	4	8.18	1.04E <sup>-03</sup>
RCP 4.5 - 2070	a	a	a	a	b	4	29.85	5.52E <sup>-07</sup>
RCP 8.5 - 2050	ab	a	a	a	b	4	8.6	8.16E <sup>-04</sup>
RCP 8.5 - 2070	a	a	a	a	b	4	20.33	6.42E <sup>-06</sup>
<b>Mean elevation</b>								
Current	b	b	ab	a	b	4	4.82	1.06E <sup>-02</sup>
RCP 4.5 - 2050	b	b	ab	a	b	4	4.84	1.04E <sup>-02</sup>
RCP 4.5 - 2070	b	b	ab	a	b	4	4.37	1.53E <sup>-02</sup>
RCP 8.5 - 2050	b	ab	ab	a	b	4	4.52	1.35E <sup>-02</sup>
RCP 8.5 - 2070	b	b	ab	a	b	4	4.11	1.90E <sup>-02</sup>
<b>Rural population</b>								
Current	b	b	c	a	bc	3	21.02	1.25E <sup>-05</sup>
RCP 4.5 - 2050	b	b	c	a	c	3	28.78	1.81E <sup>-06</sup>
RCP 4.5 - 2070	b	b	c	a	bc	3	16.62	4.92E <sup>-05</sup>
RCP 8.5 - 2050	b	b	c	a	bc	3	22.31	8.75E <sup>-06</sup>
RCP 8.5 - 2070	b	b	b	a	b	3	12.58	2.25E <sup>-04</sup>
<b>Urban population</b>								
Current	b	b	c	a	c	3	48.91	5.59E <sup>-08</sup>
RCP 4.5 - 2050	b	b	c	a	c	3	54.83	2.57E <sup>-08</sup>
RCP 4.5 - 2070	b	b	bc	a	c	3	22.34	8.69E <sup>-06</sup>
RCP 8.5 - 2050	b	b	c	a	c	3	53.74	2.95E <sup>-08</sup>
RCP 8.5 - 2070	b	b	bc	a	c	3	17.86	3.26E <sup>-05</sup>
<b>Land cover use</b>								
Conserved area	b	b	ab	ab	a	3	5.46	9.71E <sup>-03</sup>
Modified area	b	b	ab	a	a	3	4.8	1.53E <sup>-02</sup>

**Tabla 7. Comparación entre la población humana rural y urbana para México, en tres periodos de tiempo (actual, 2050, 2070) y dos escenarios de CC (RCP 4.5 y RCP 8.5).**

<b>Scenario</b>	<b>Rural population (mean)</b>	<b>Urban population (mean)</b>	<b>df</b>	<b>t-value</b>	<b><i>p</i></b>
Current	10,278,317	20,404,038	38	-2.45	1.86E <sup>-02</sup>
RCP 4.5 - 2050	16,387,013	29,210,602	38	-2.28	2.82E <sup>-02</sup>
RCP 4.5 - 2070	14,892,057	27,100,156	38	-2.15	3.72E <sup>-02</sup>
RCP 8.5 - 2050	14,953,427	28,027,040	38	-2.32	2.57E <sup>-02</sup>
RCP 8.5 - 2070	14,735,438	27,469,058	38	-2.34	2.45E <sup>-02</sup>



**Fig. 1.**



**Fig. 2.**

### RCP 4.5 SCENARIO

### RCP 8.5 SCENARIO

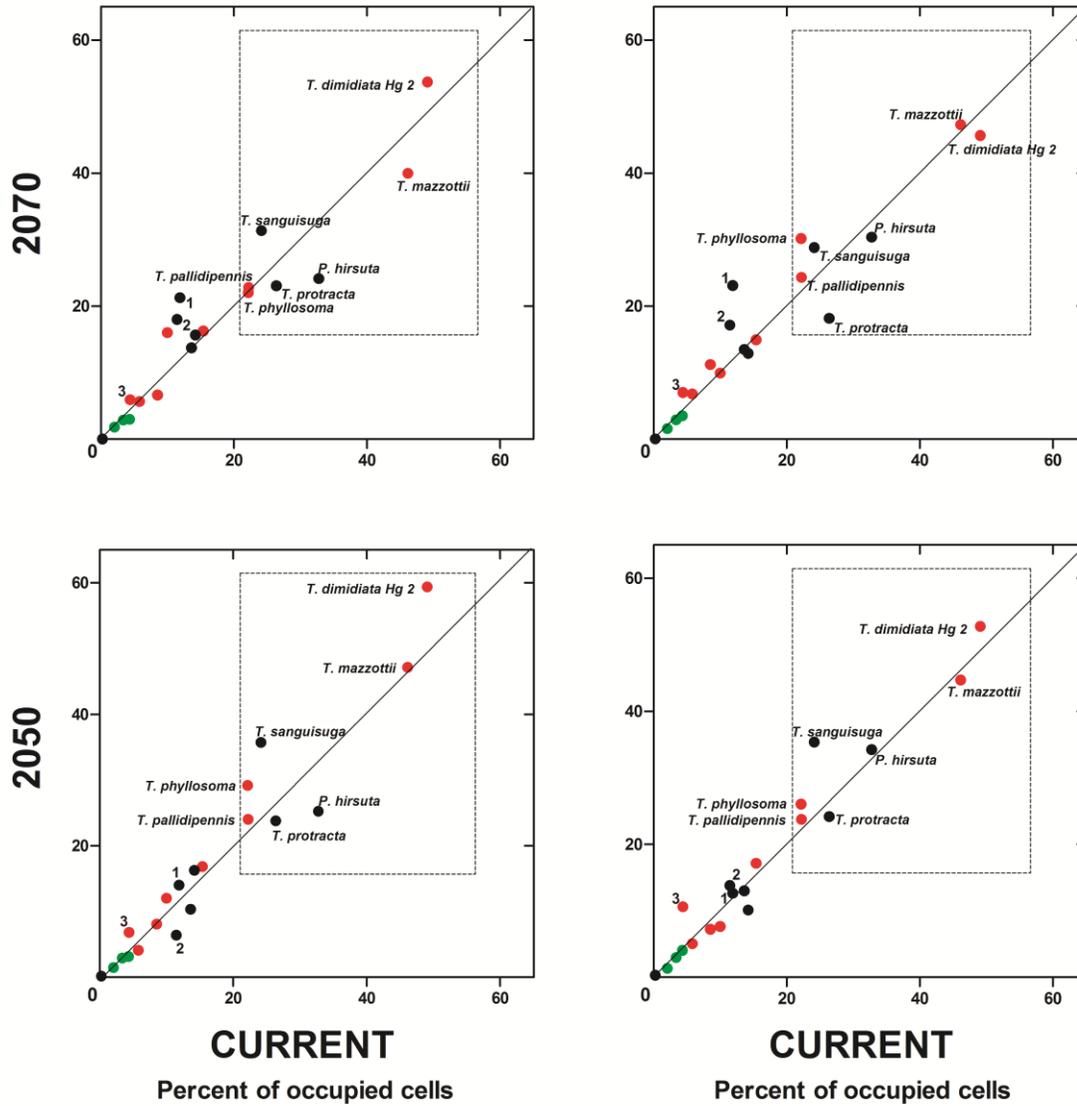


Fig. 3.

RCP 4.5 SCENARIO

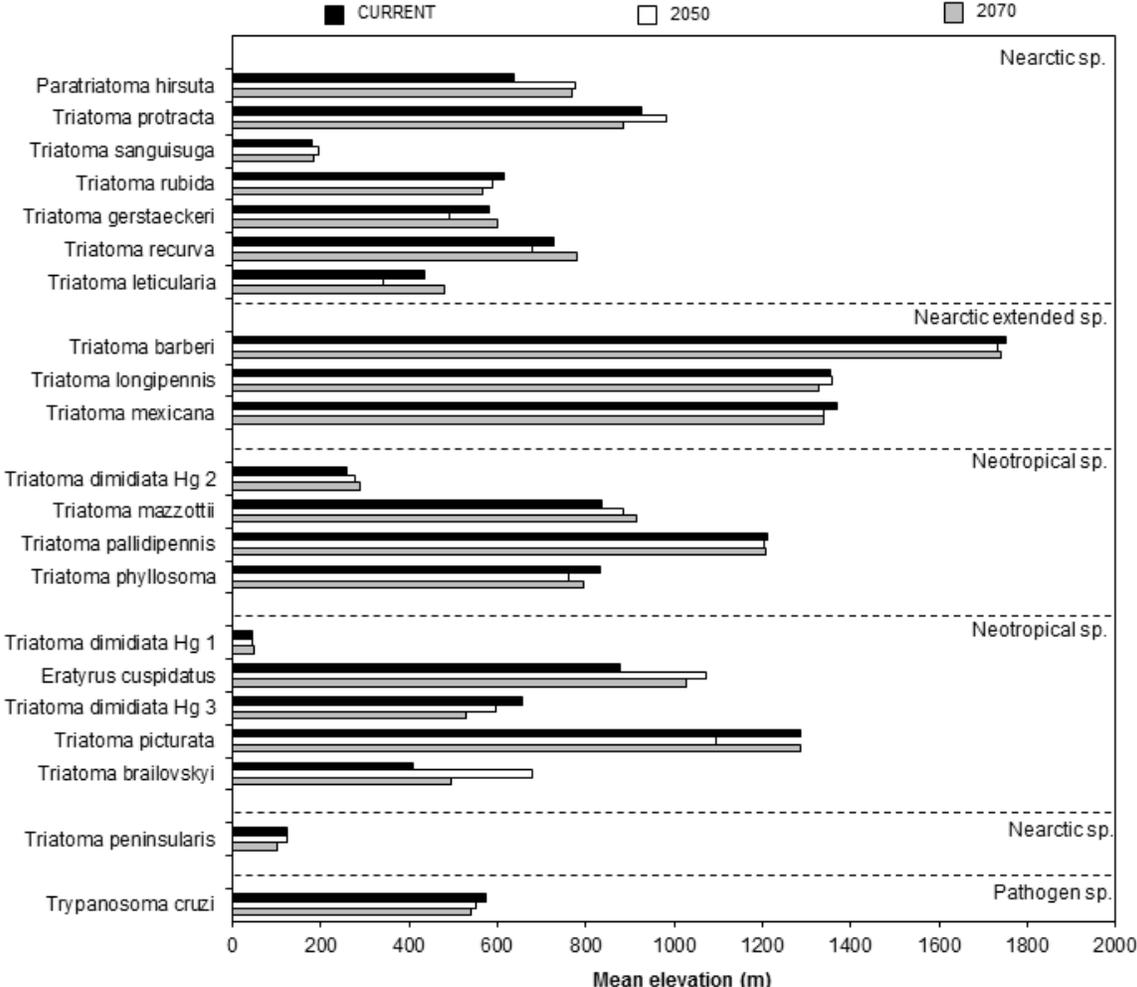


Fig. 4.

## 2050 SCENARIO

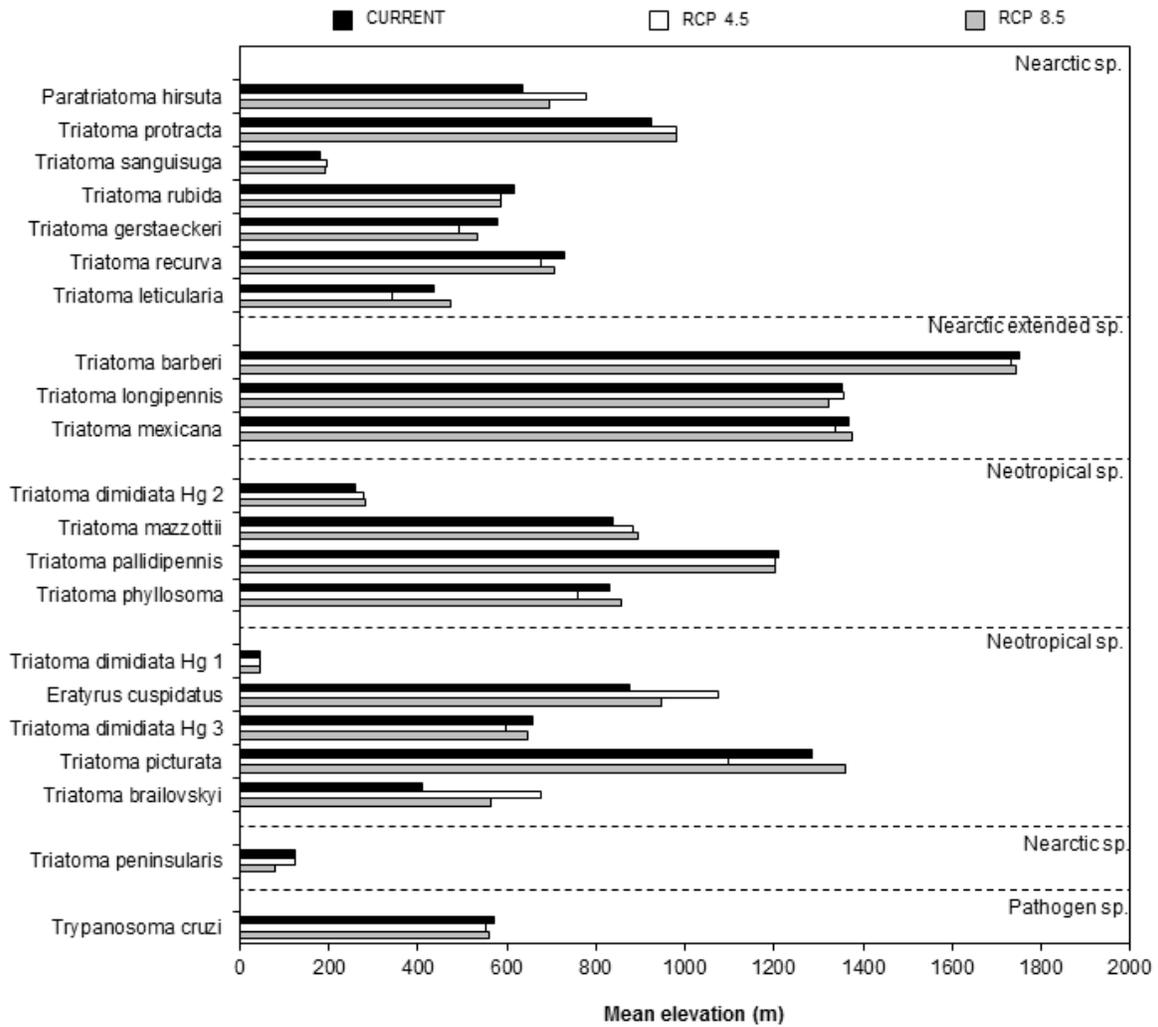


Fig. 5.

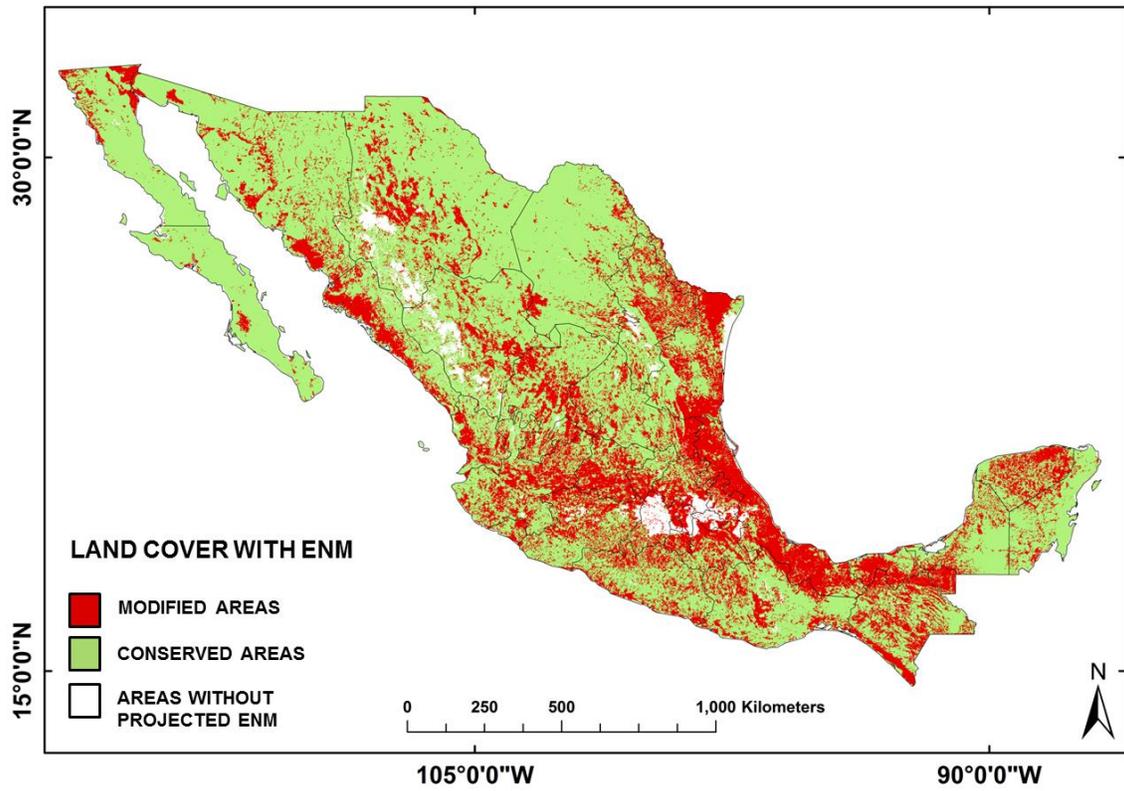


Fig. 6.

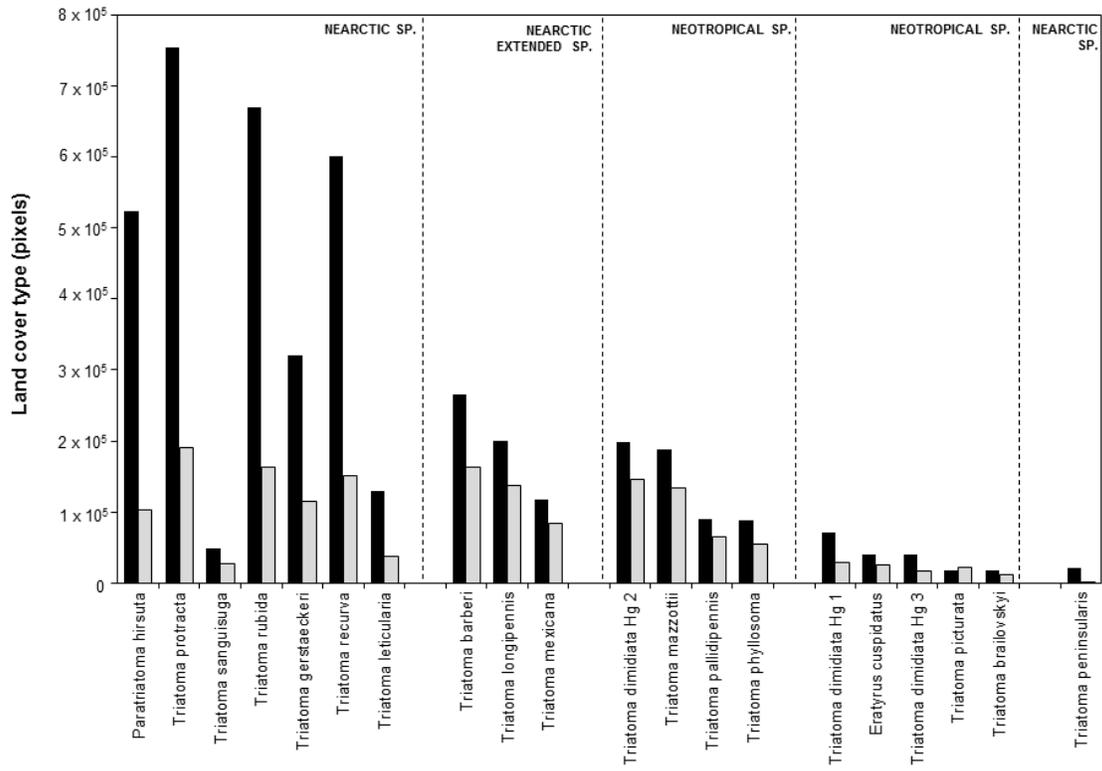
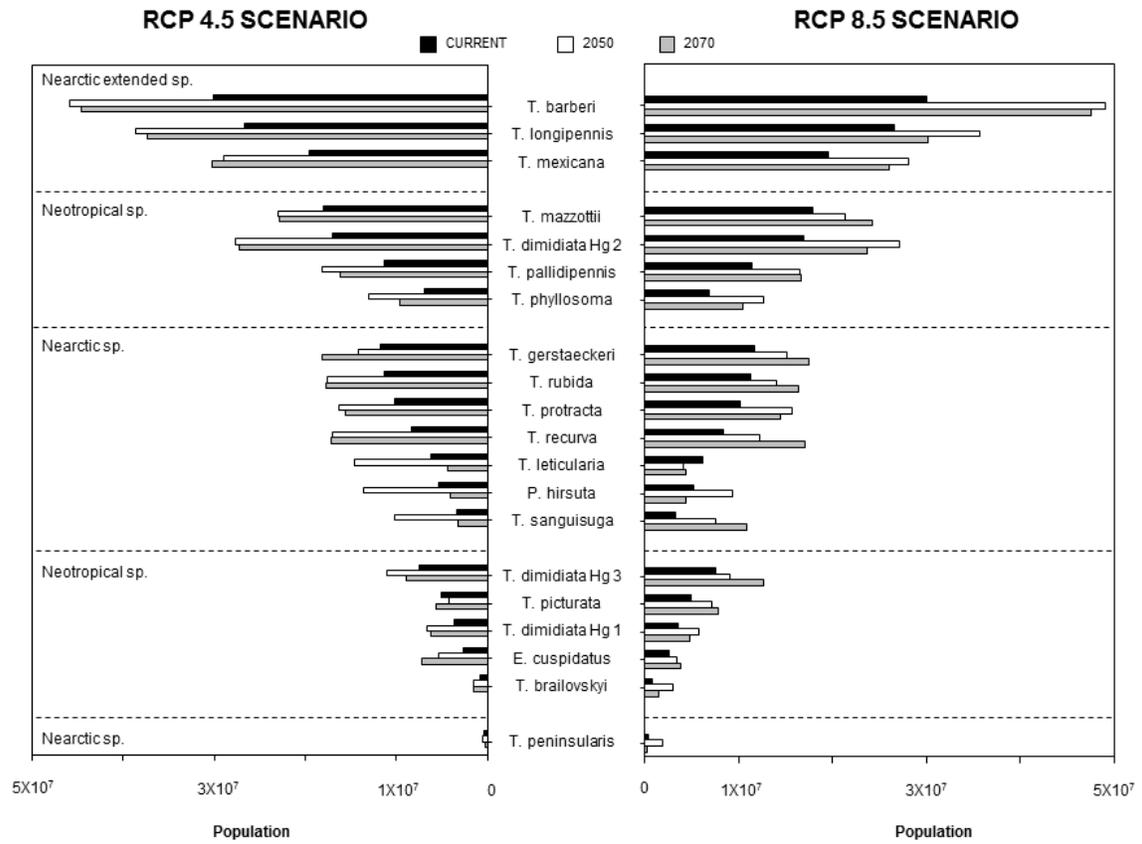
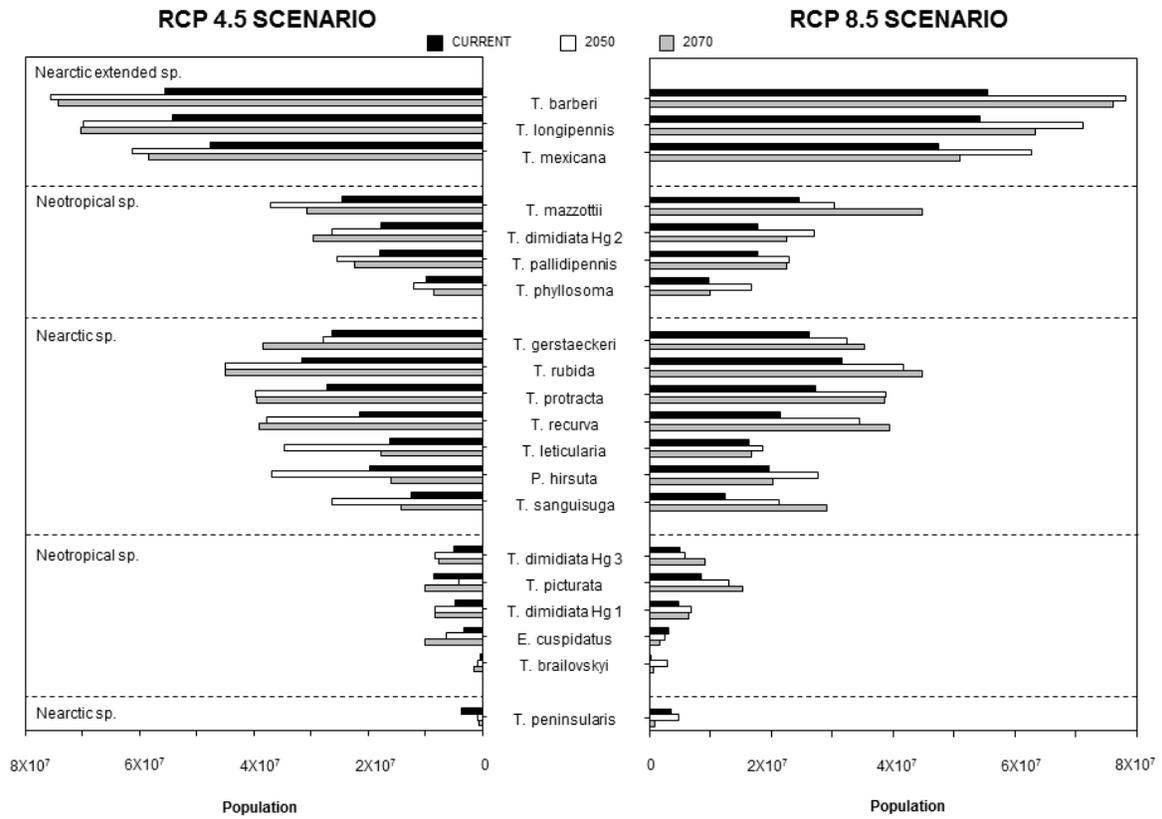


Fig. 7.

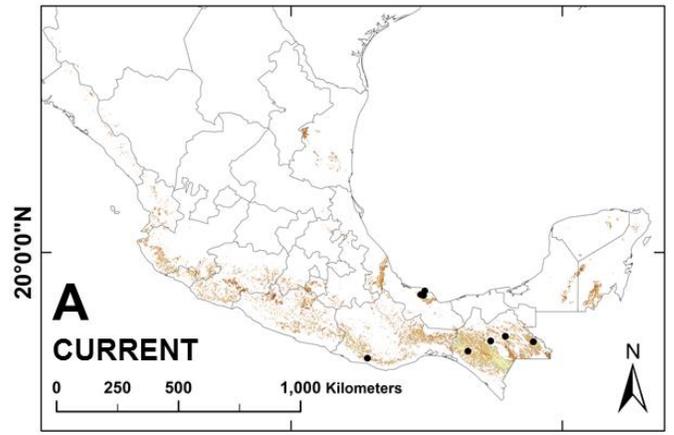
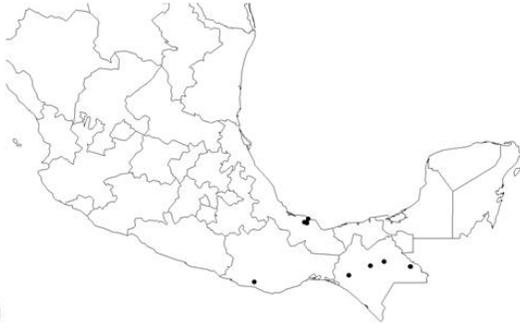
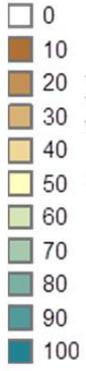


**Fig. 8.**

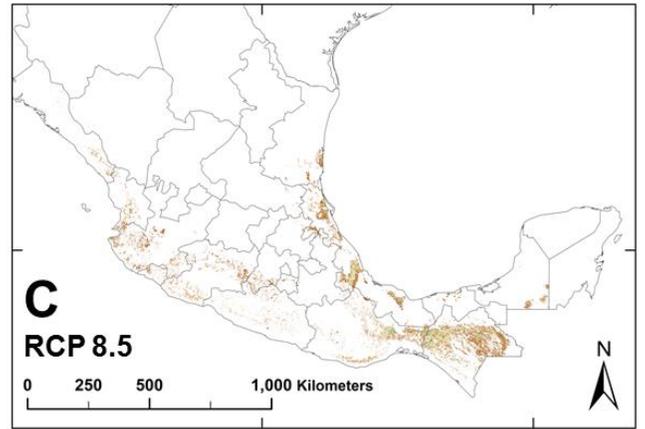
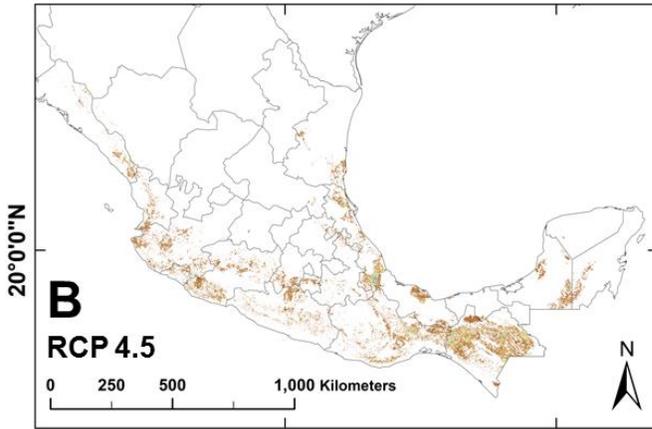


**Fig. 9.**

*Eratyrus cuspidatus*



2050



2070

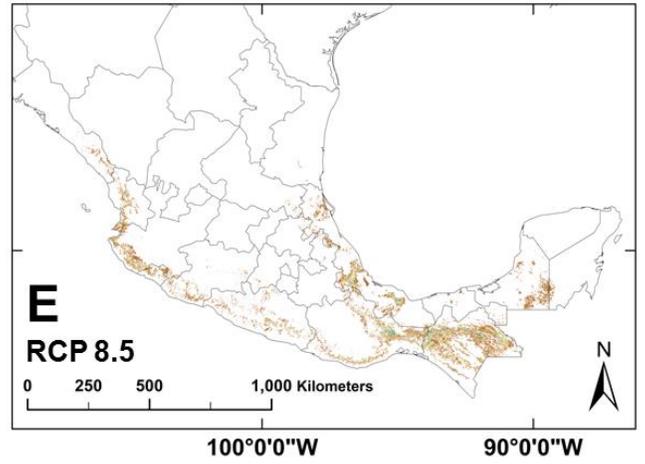
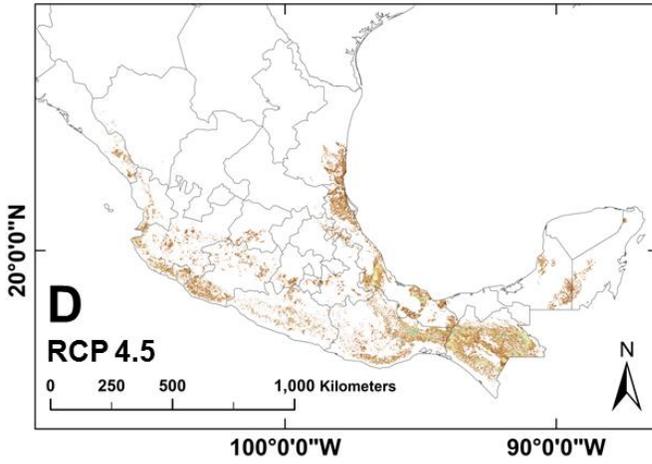
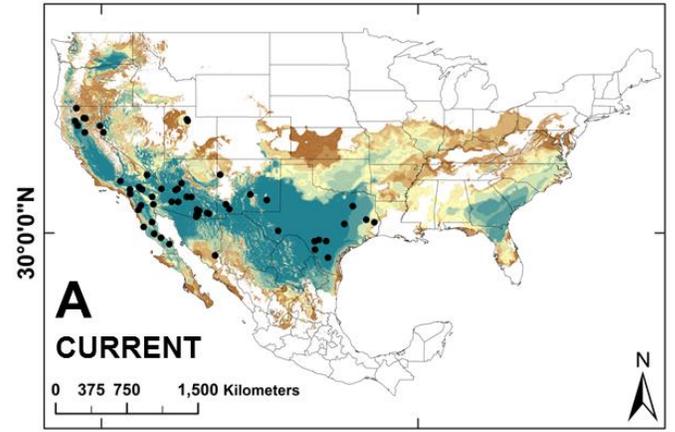
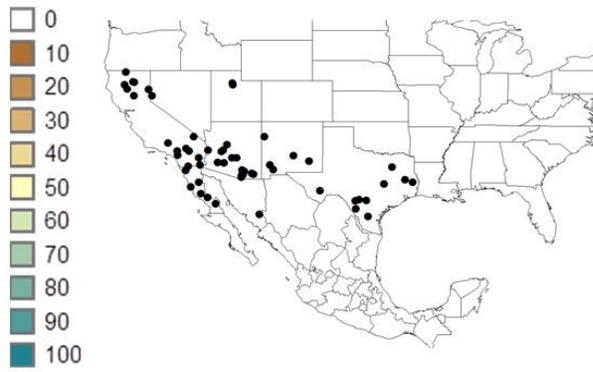
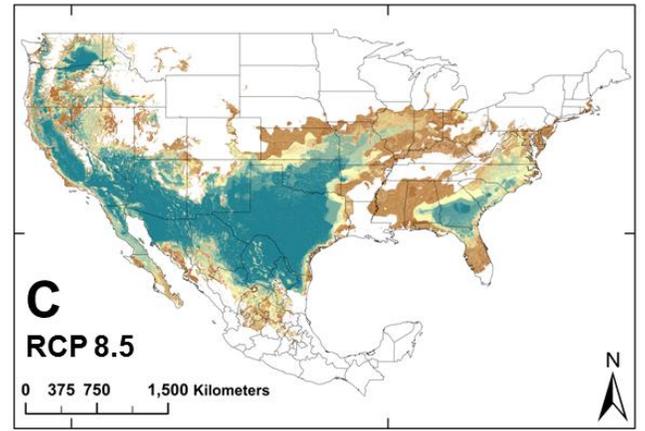
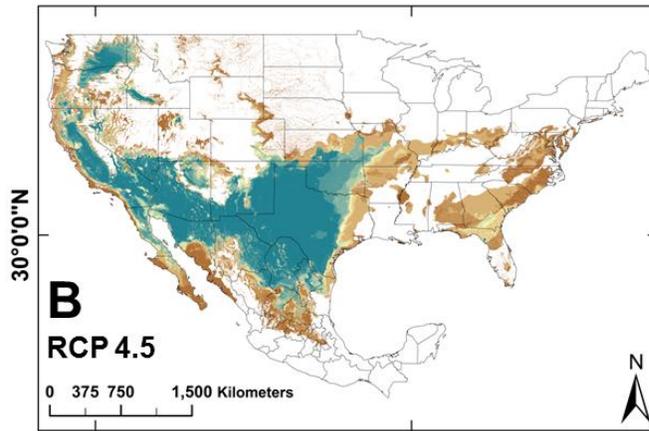


Fig. 10.

*Paratriatoma hirsuta*



2050



2070

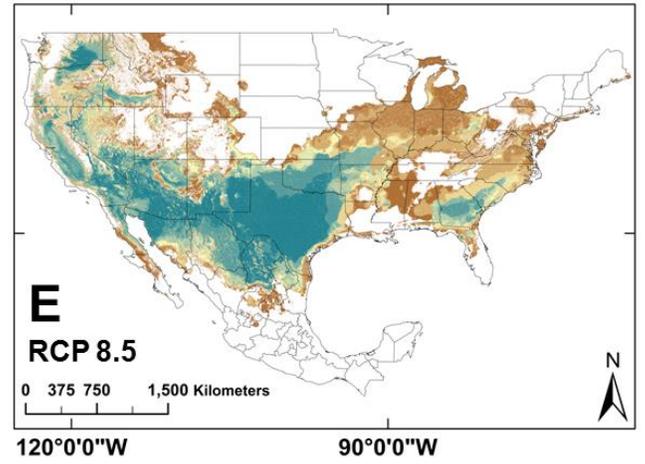
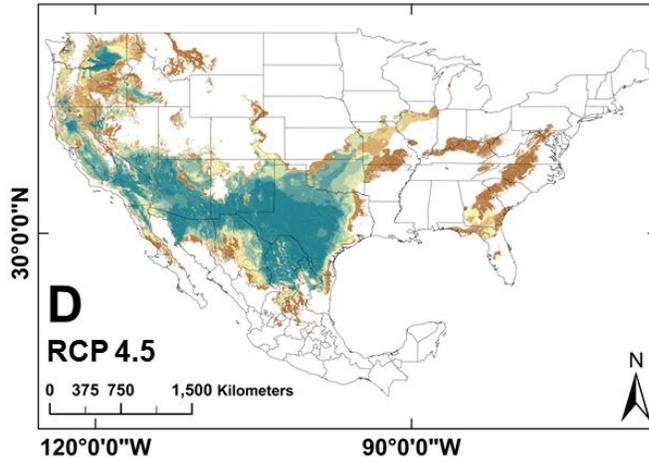
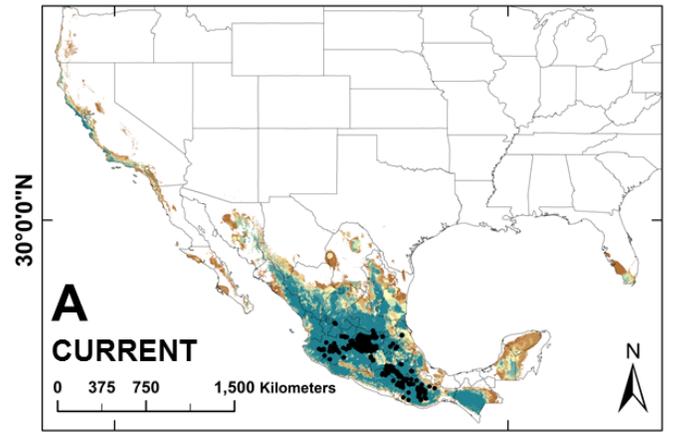
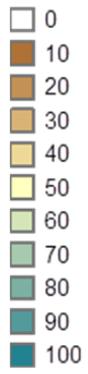
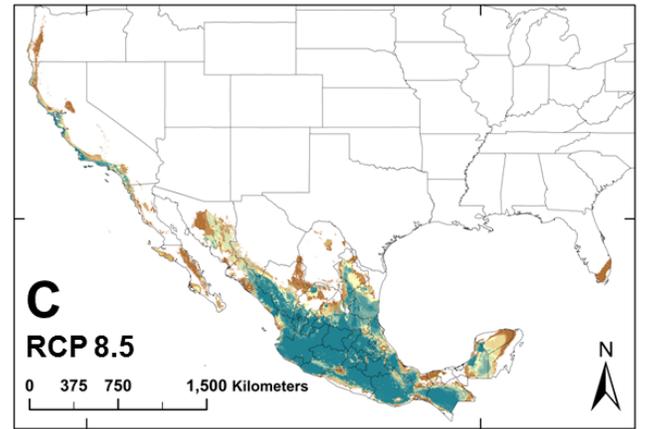
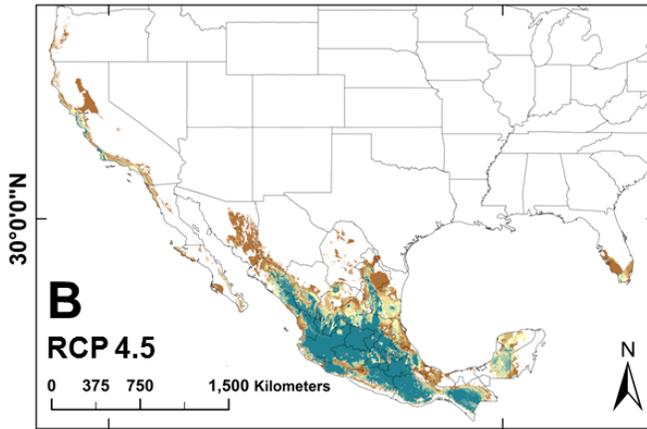


Fig. 11.

*Triatoma barberi*



2050



2070

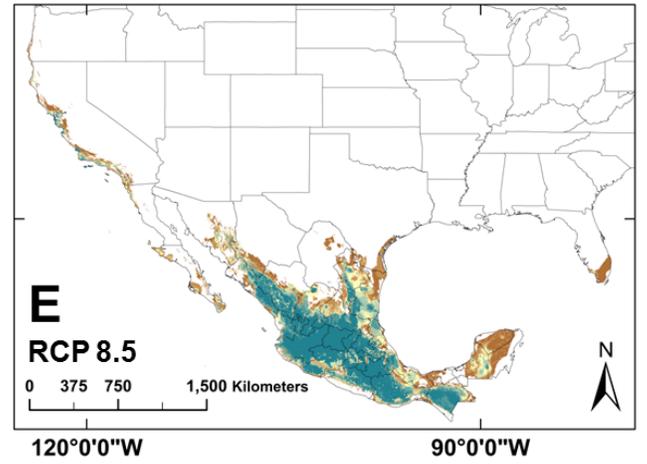
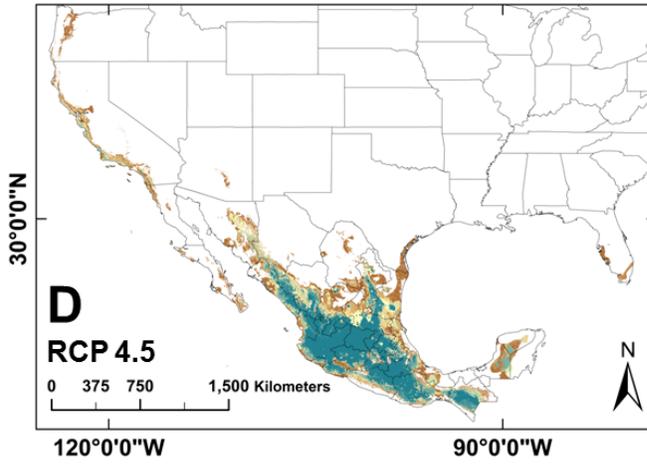
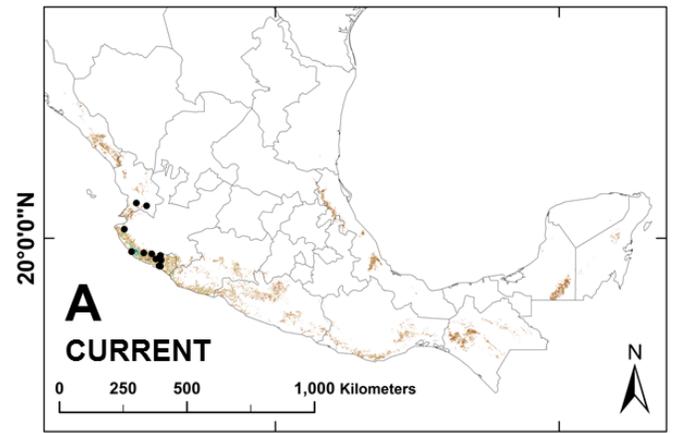
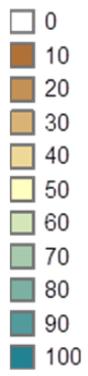
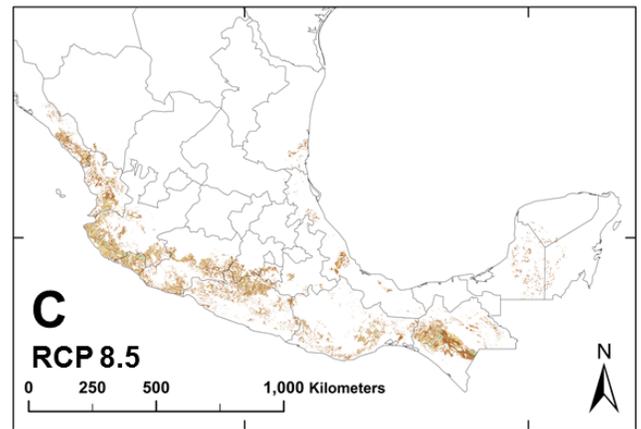
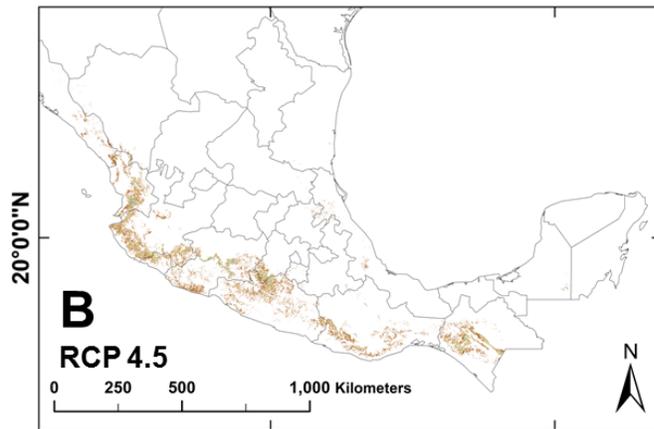


Fig. 12.

*Triatoma brailovskyi*



2050



2070

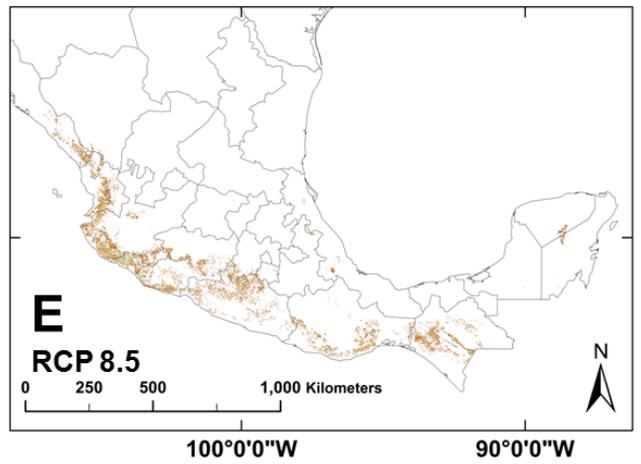
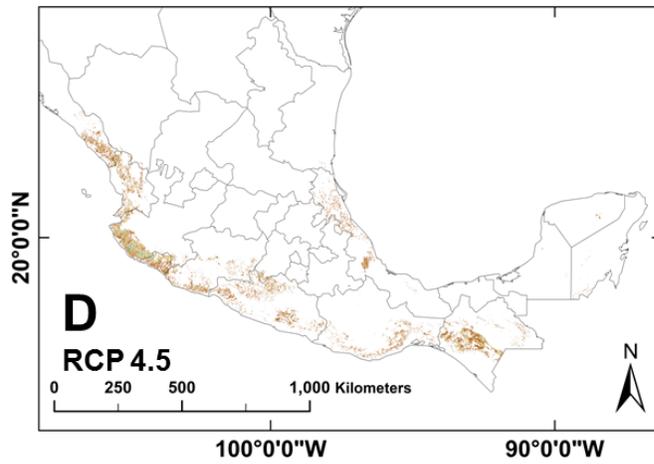
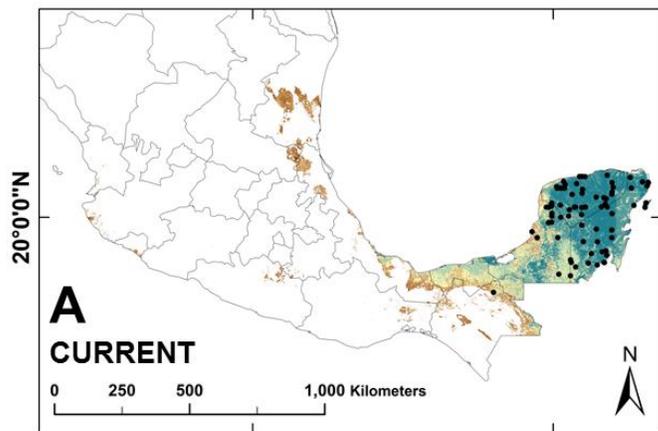
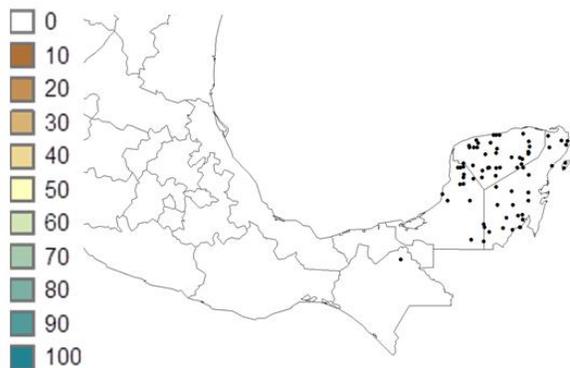
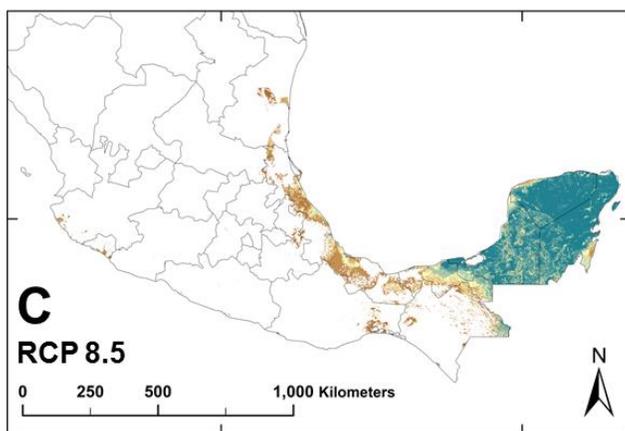
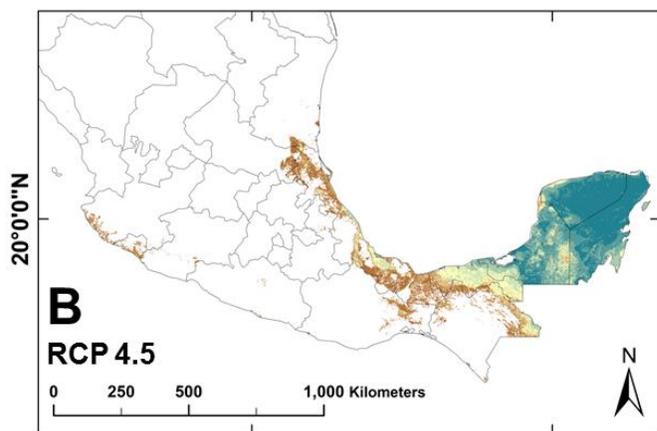


Fig. 13.

*Triatoma dimidiata* Haplogroup 1



2050



2070

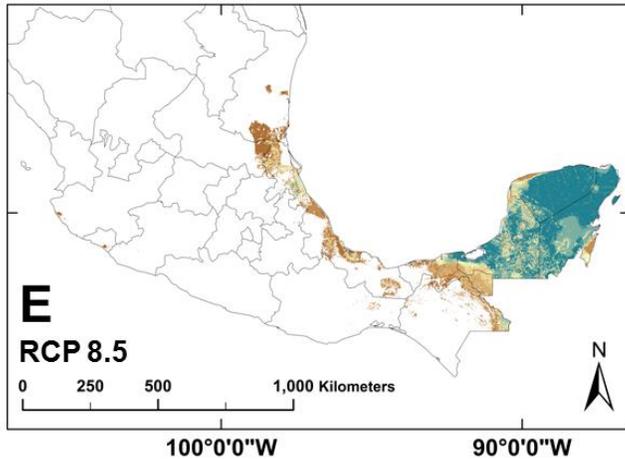
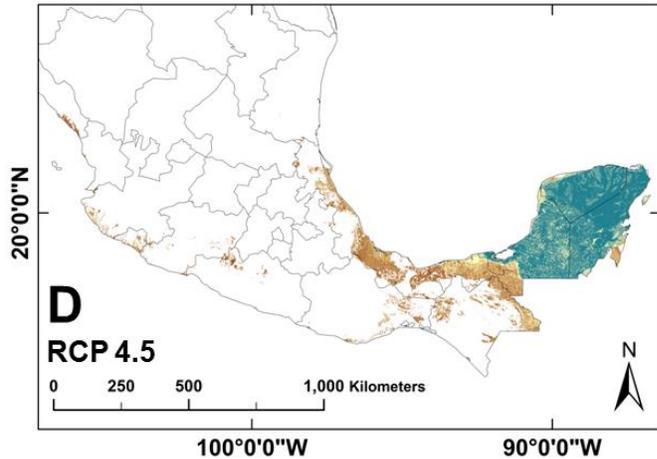
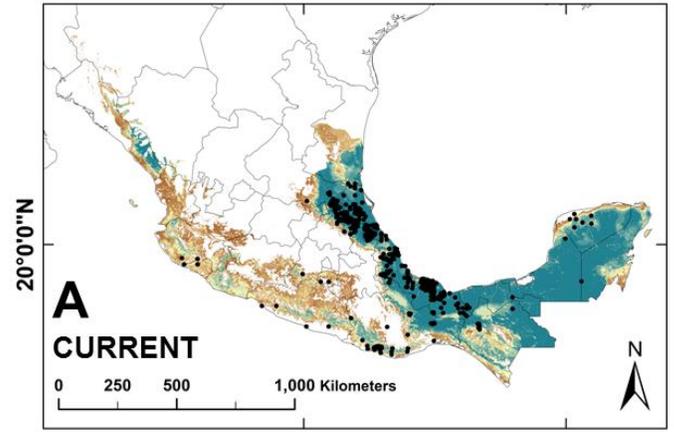
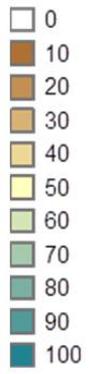
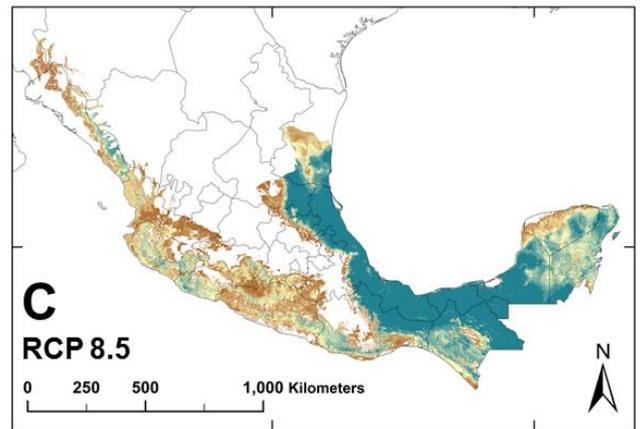
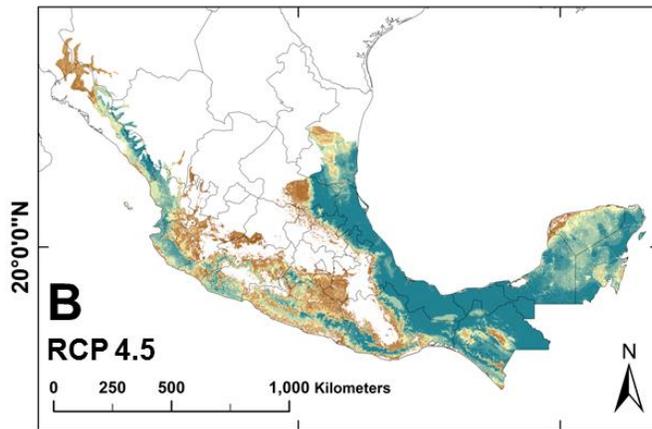


Fig. 14.

*Triatoma dimidiata* Haplogroup 2



2050



2070

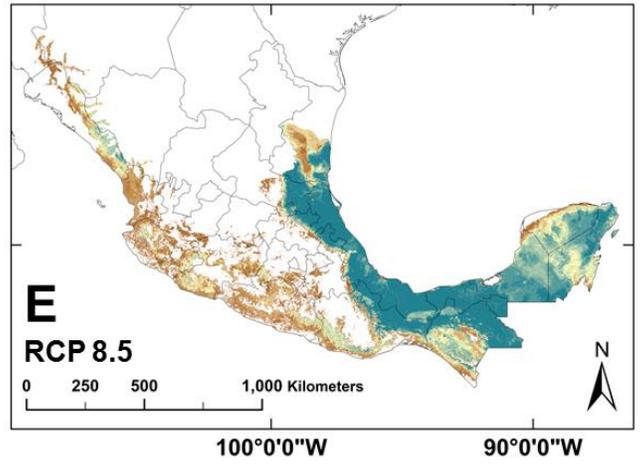
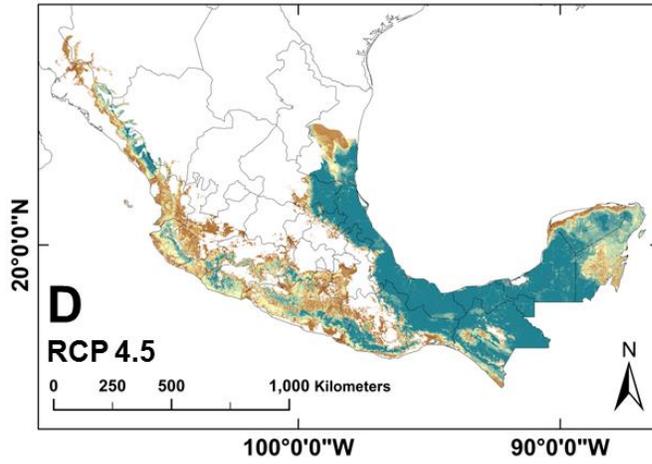
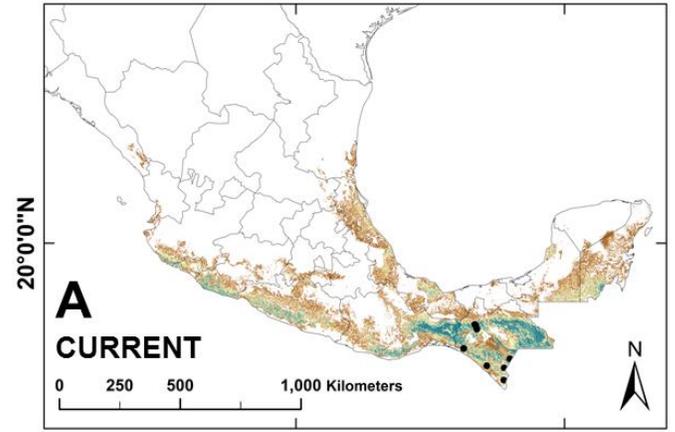
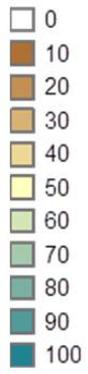
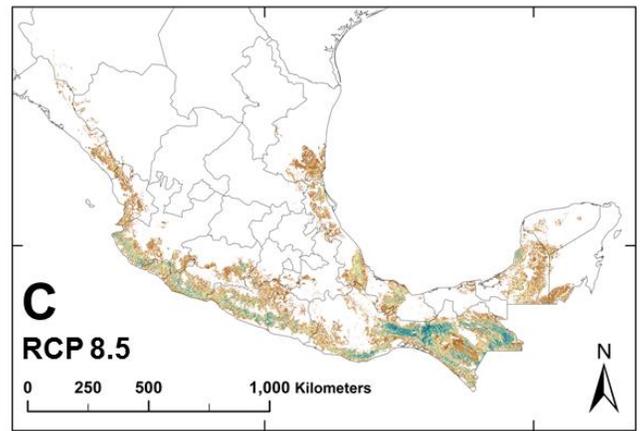
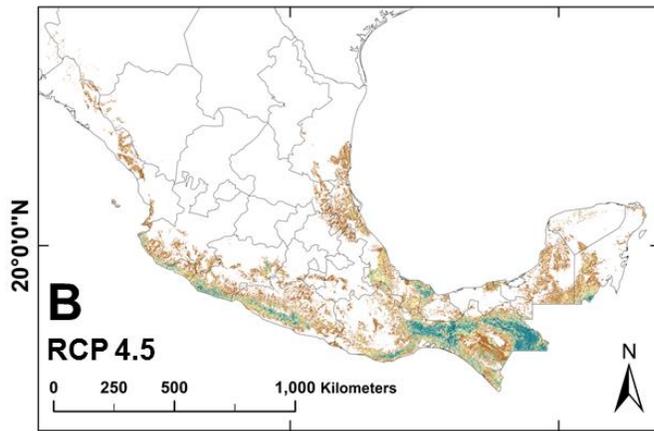


Fig. 15.

*Triatoma dimidiata* Haplogroup 3



2050



2070

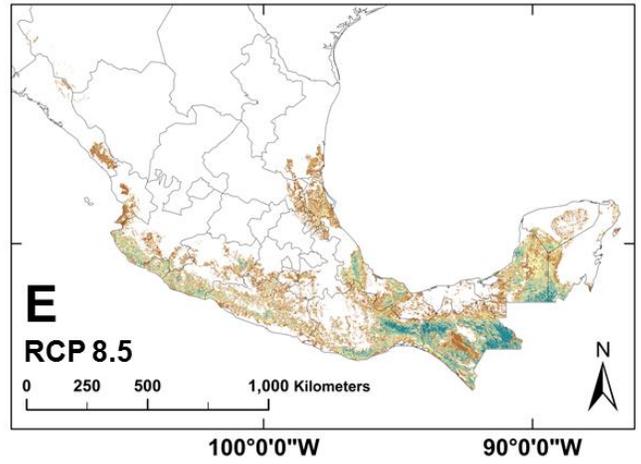
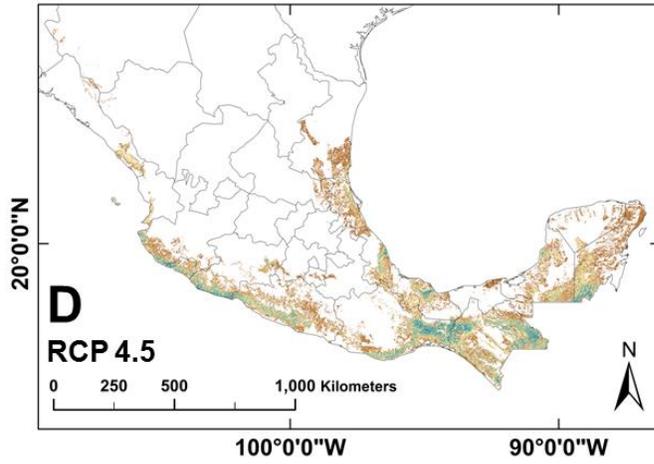
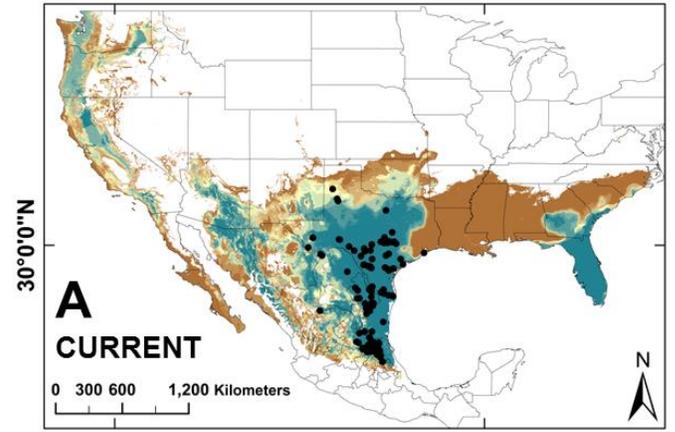
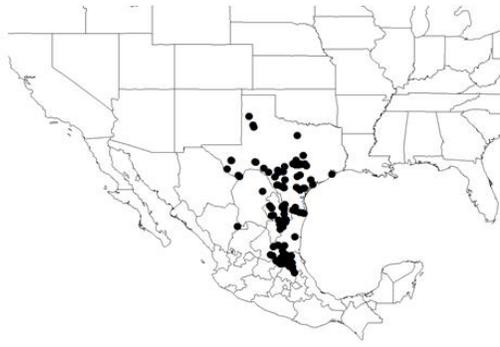
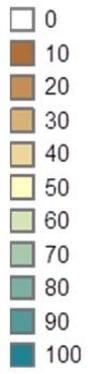
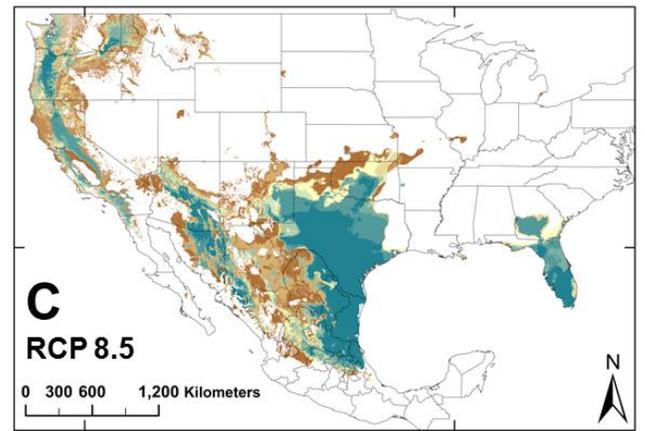
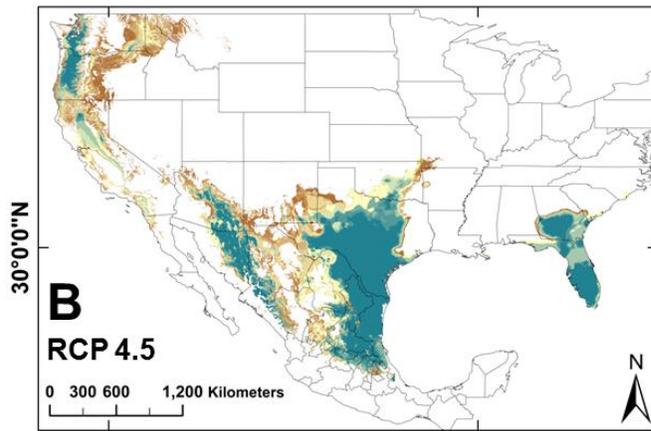


Fig. 16.

*Triatoma gerstaeckeri*



2050



2070

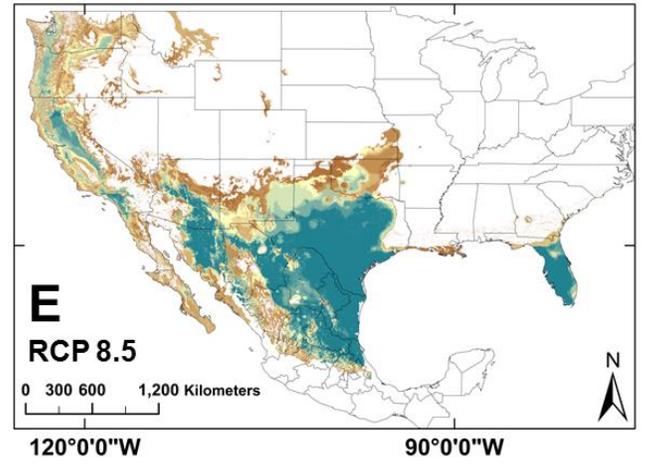
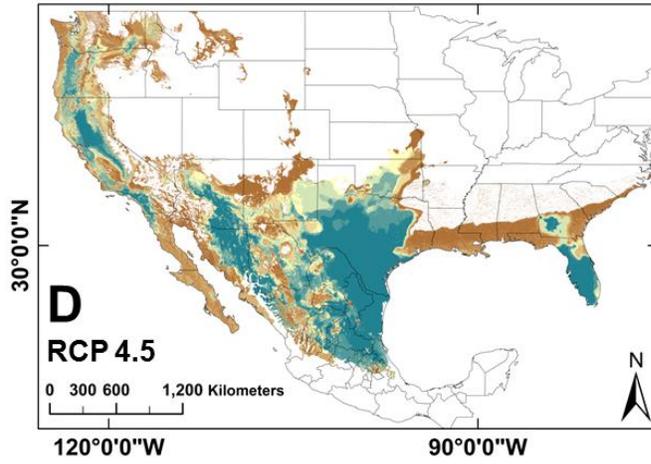
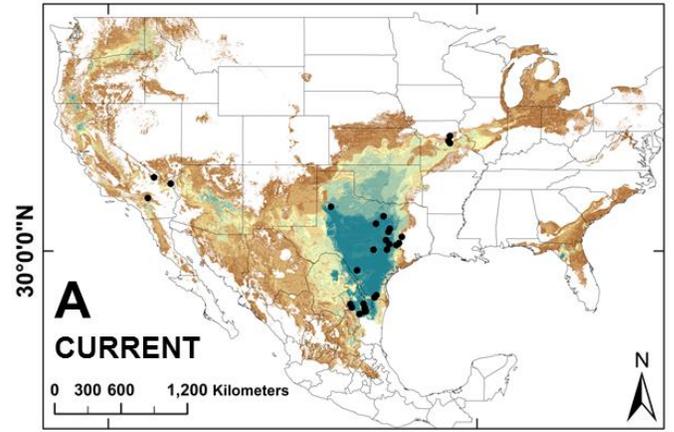
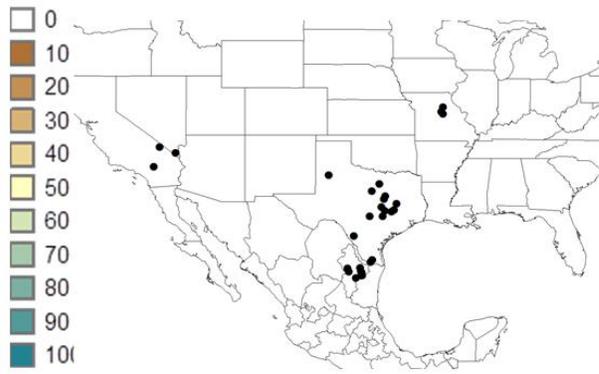
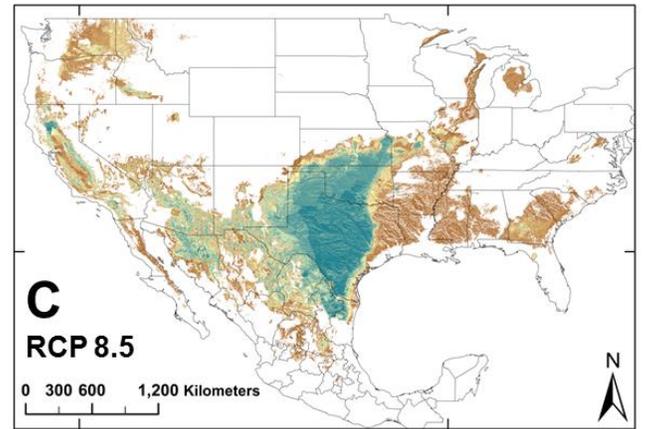
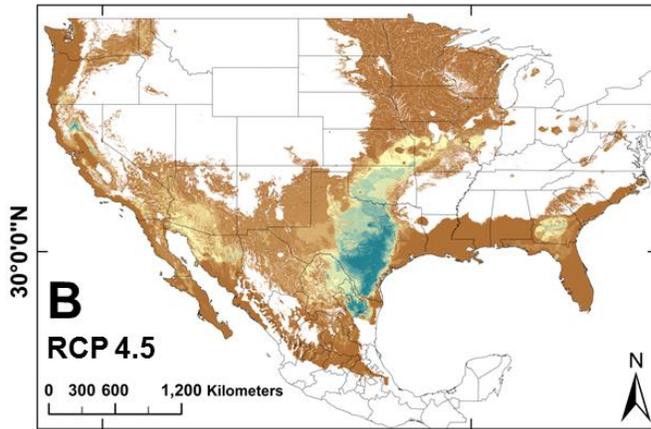


Fig. 17.

*Triatoma leticularia*



2050



2070

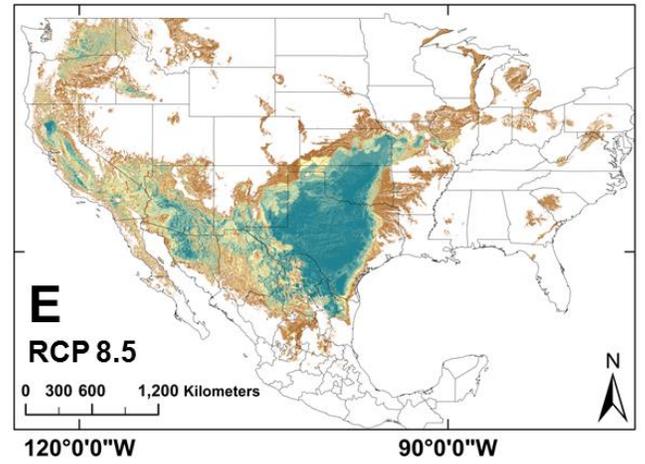
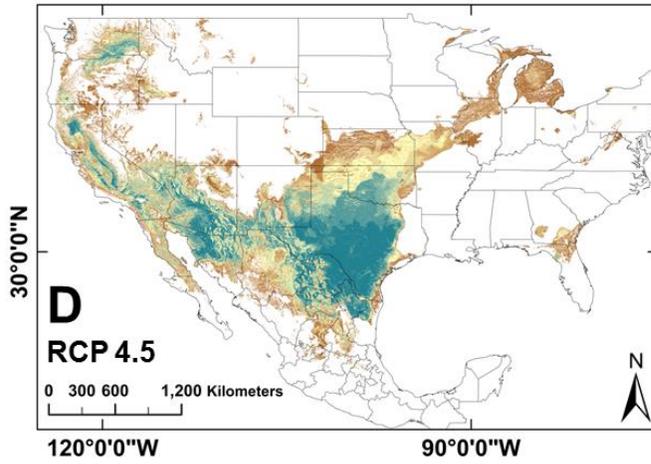
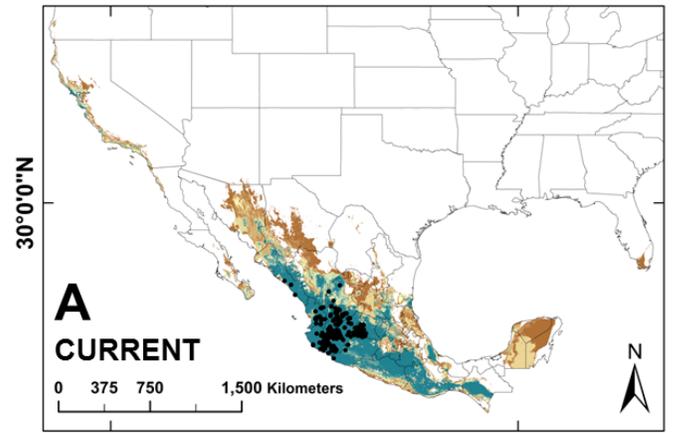
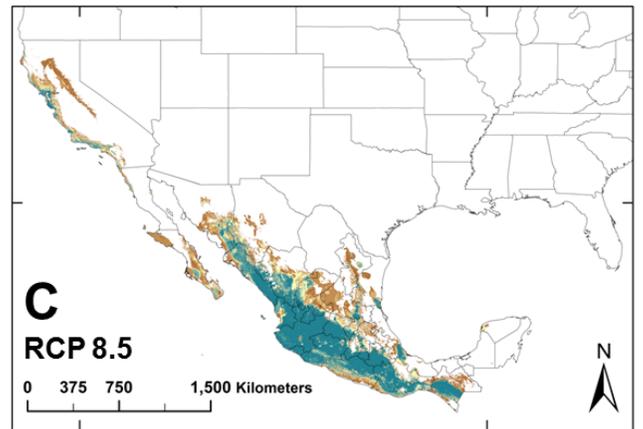
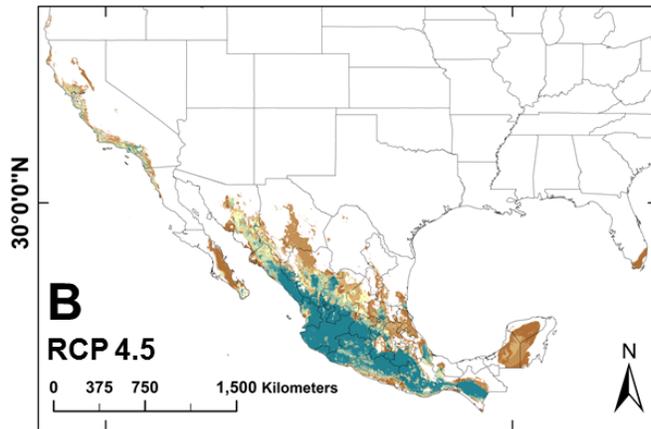


Fig. 18.

*Triatoma longipennis*



2050



2070

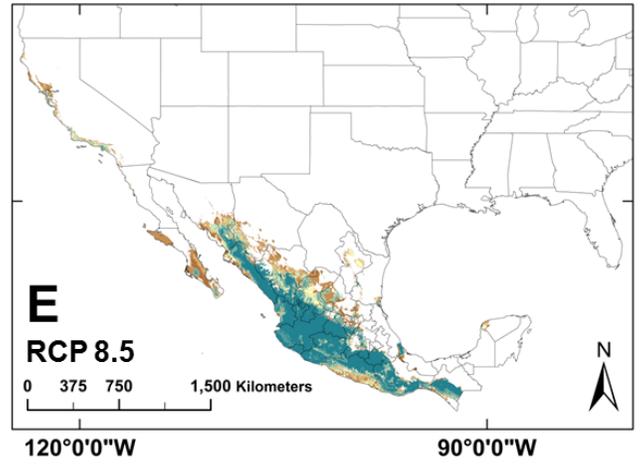
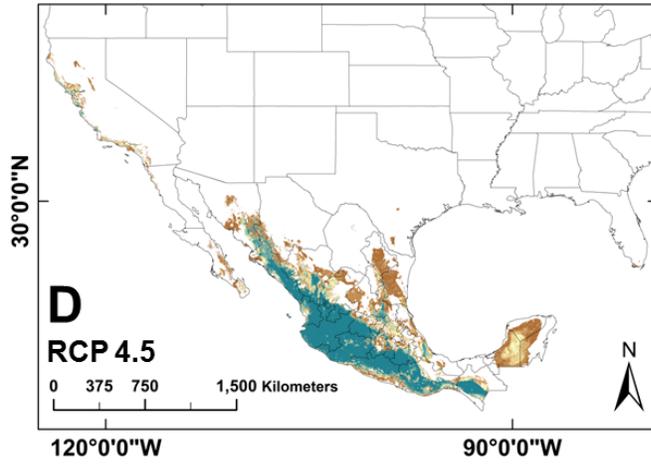
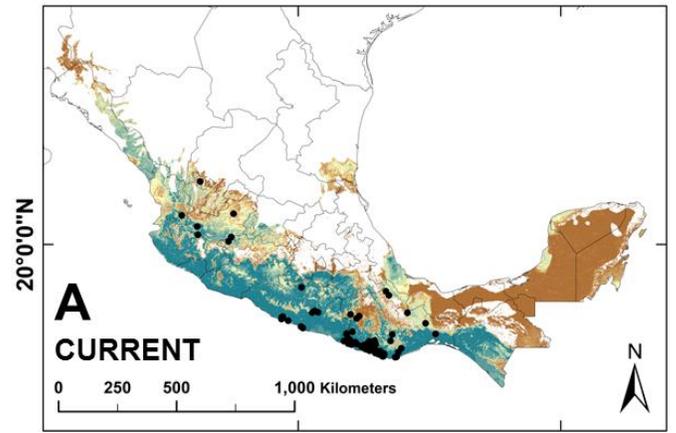
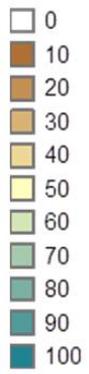
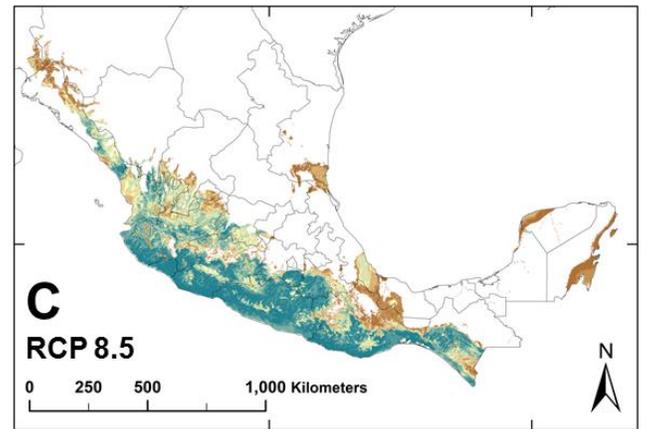
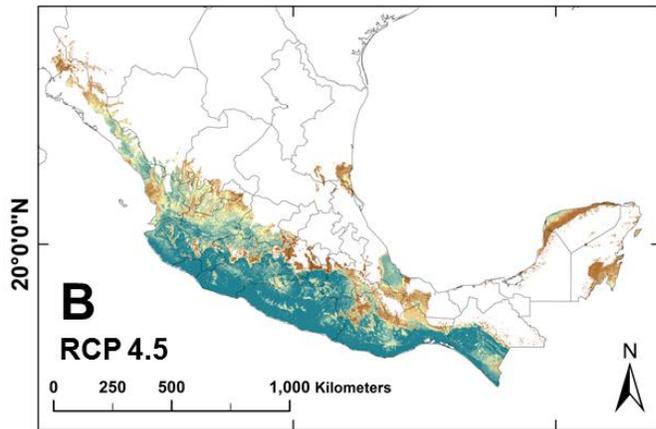


Fig. 19.

*Triatoma mazzottii*



2050



2070

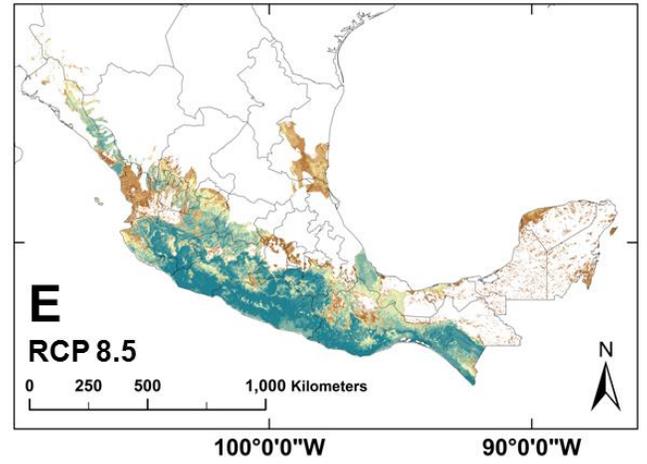
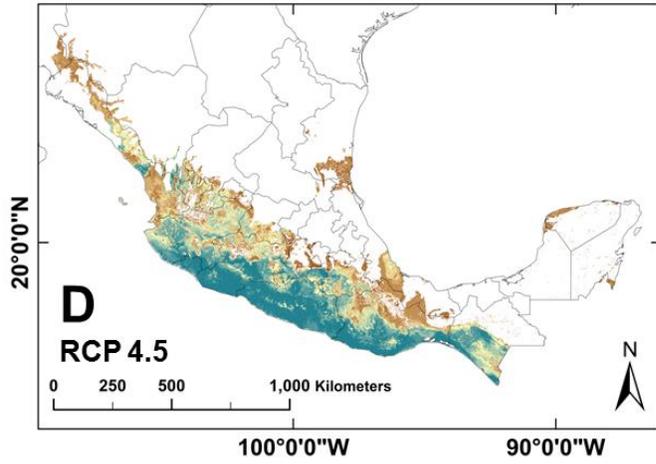
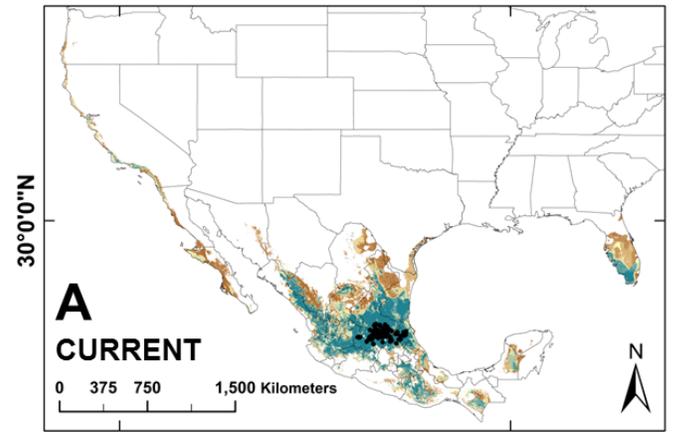
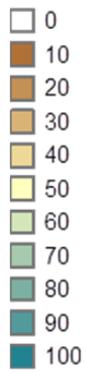
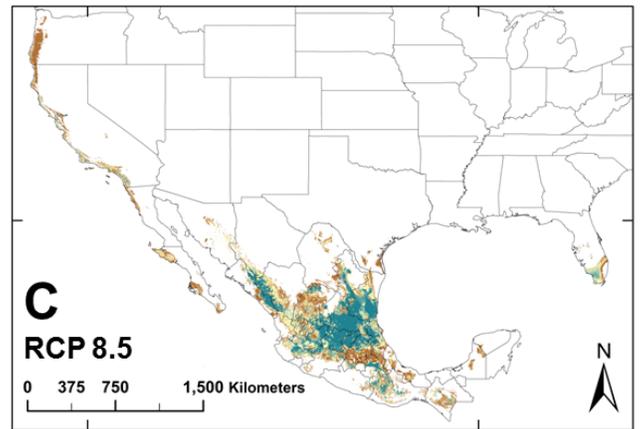
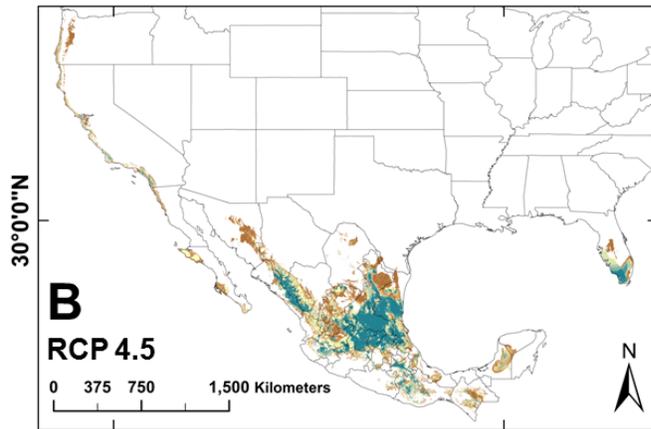


Fig. 20.

*Triatoma mexicana*



2050



2070

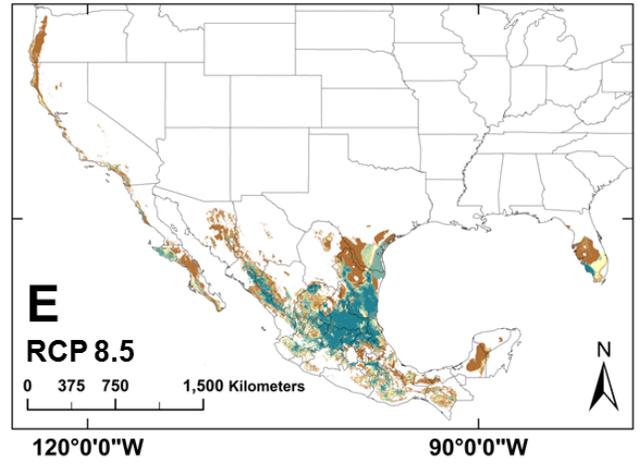
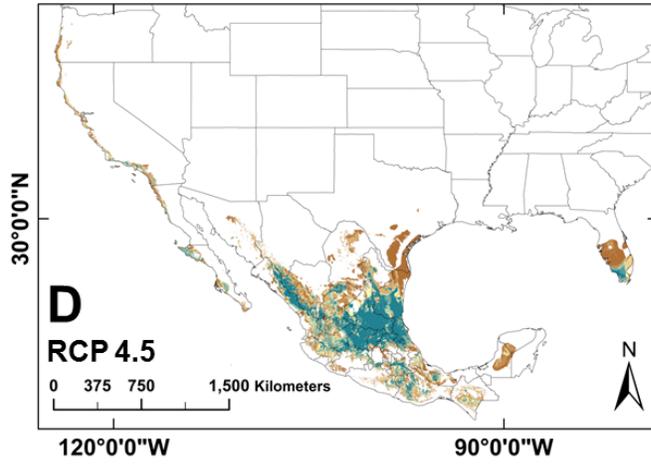
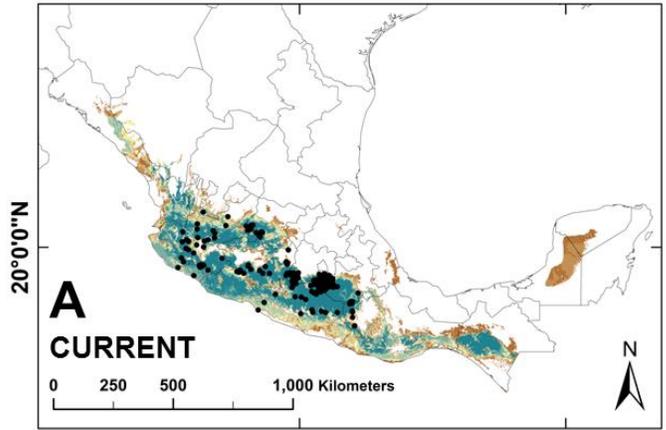
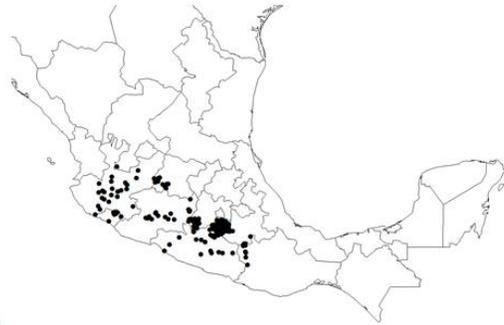
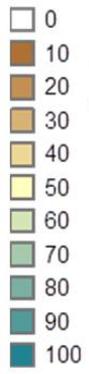
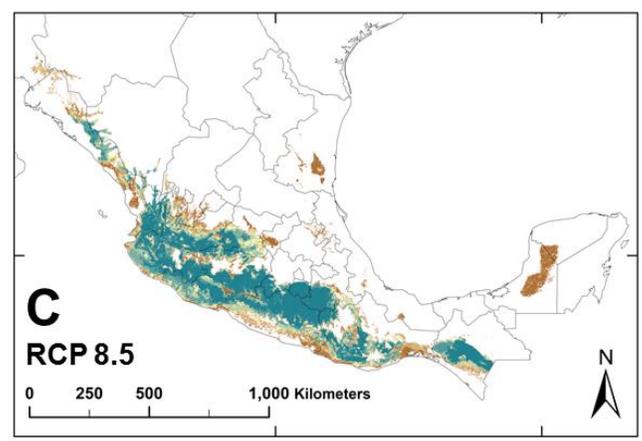
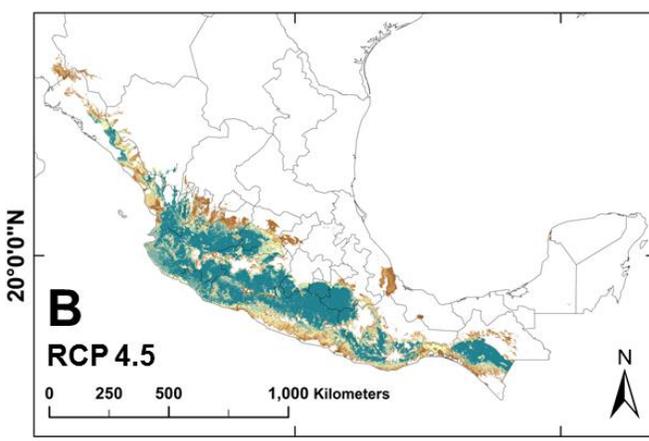


Fig. 21.

*Triatoma pallidipennis*



2050



2070

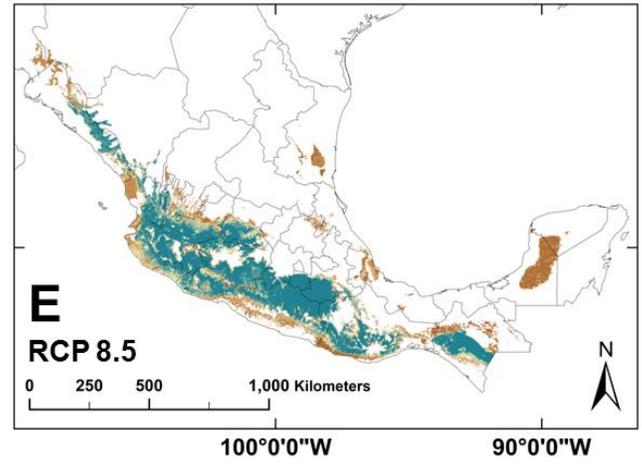
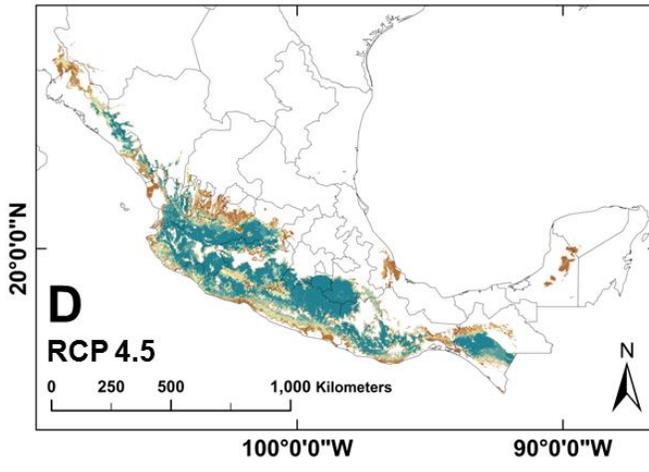
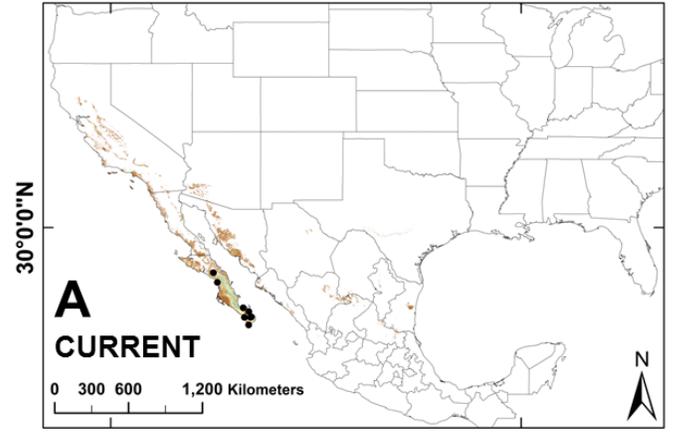
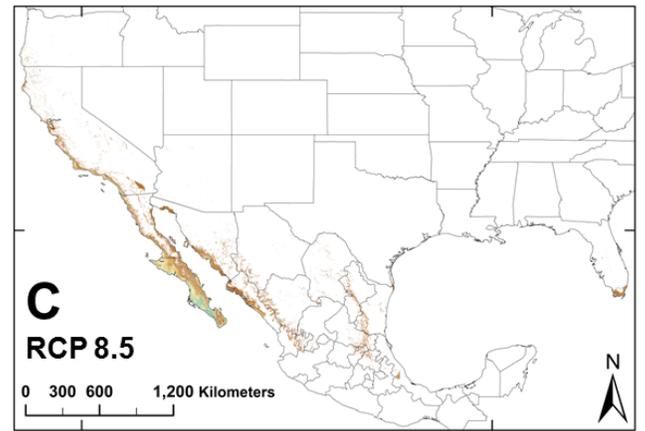
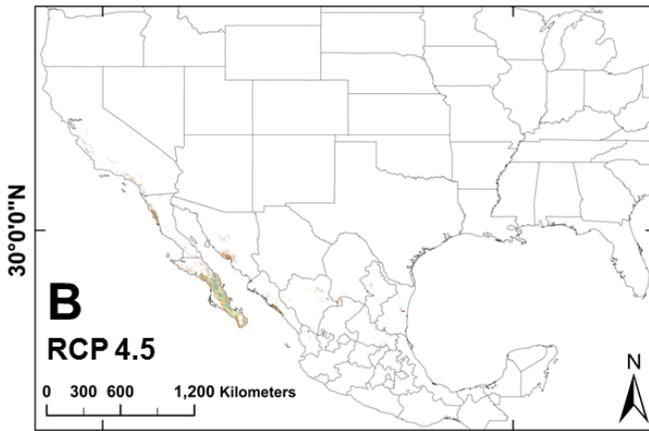


Fig. 22.

*Triatoma peninsularis*



2050



2070

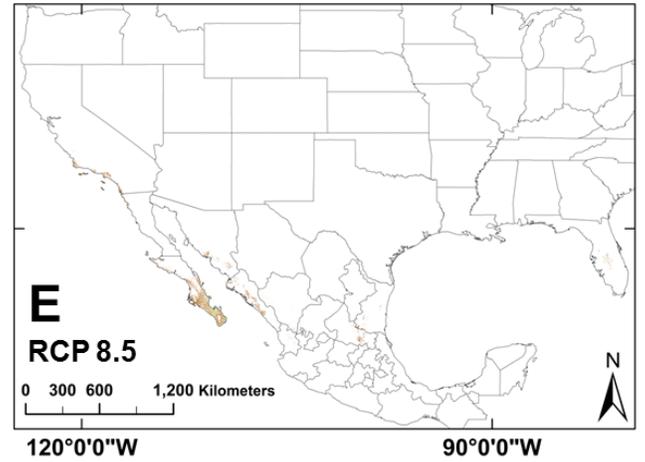
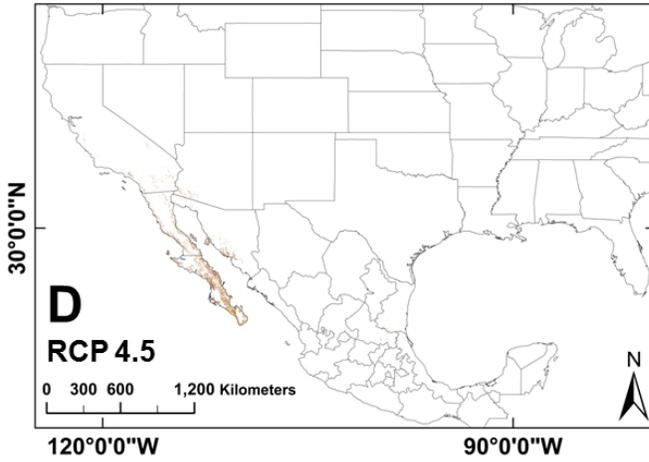
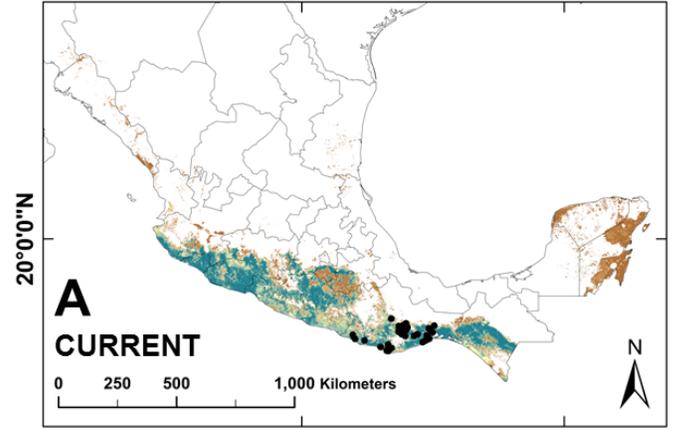
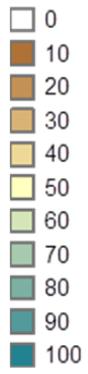
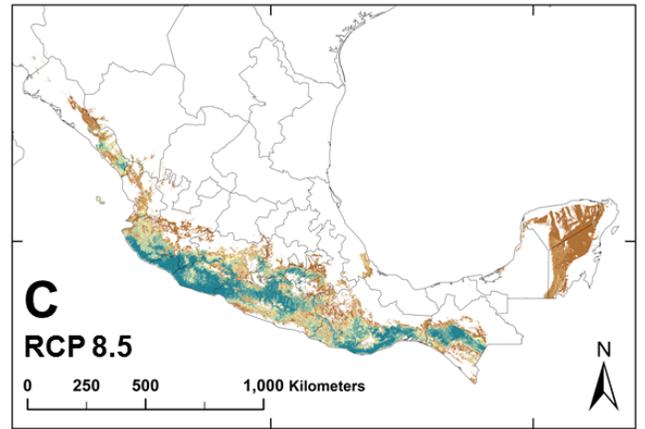
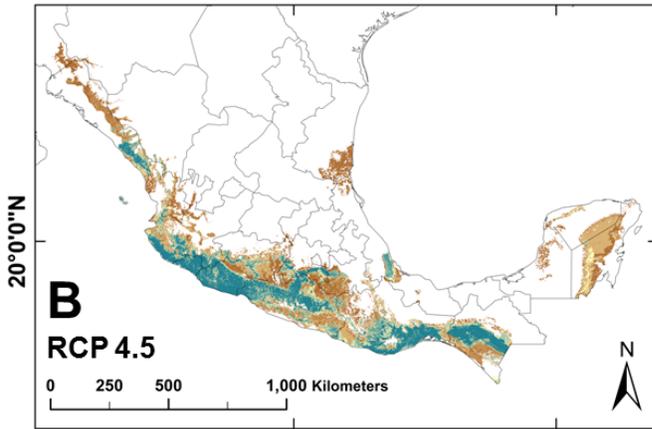


Fig. 23.

*Triatoma phyllosoma*



2050



2070

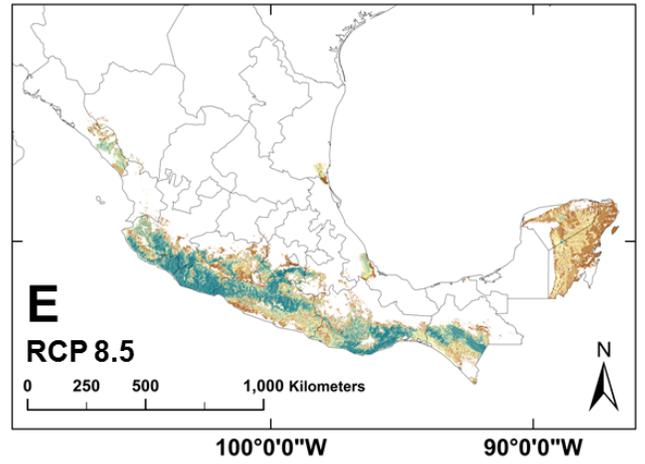
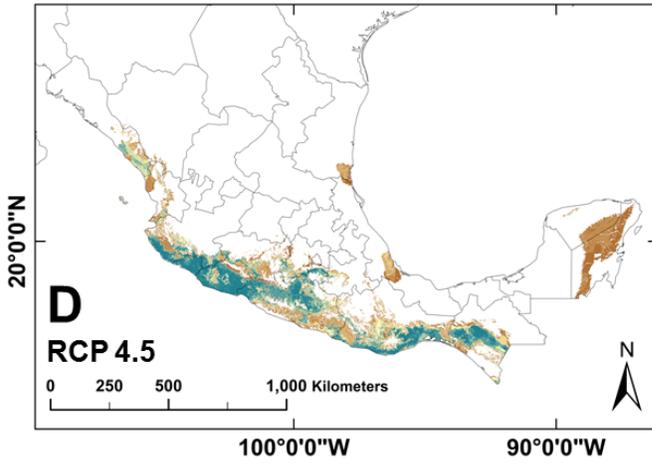
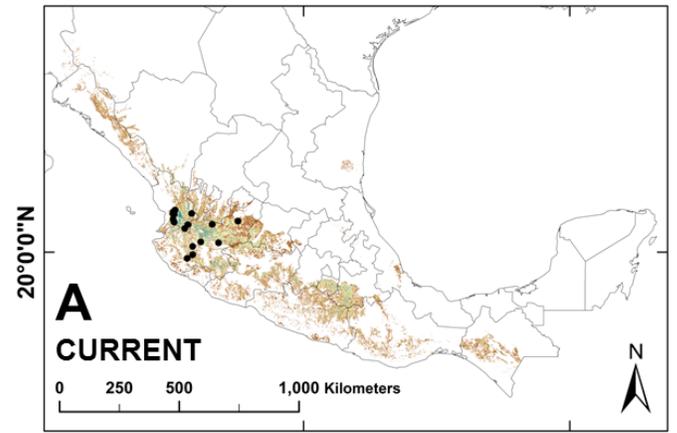
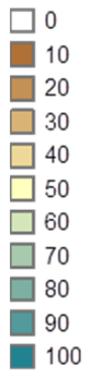
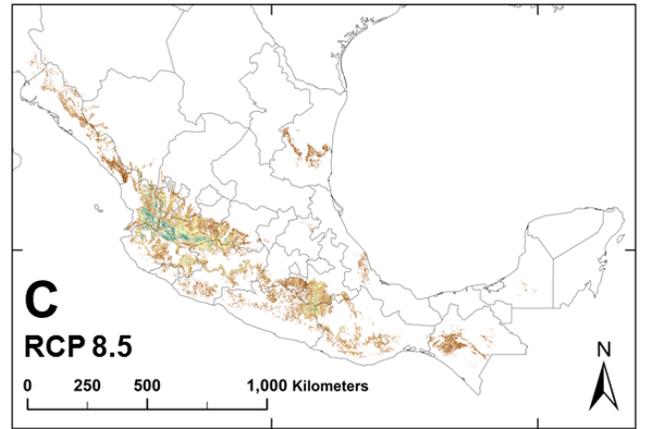
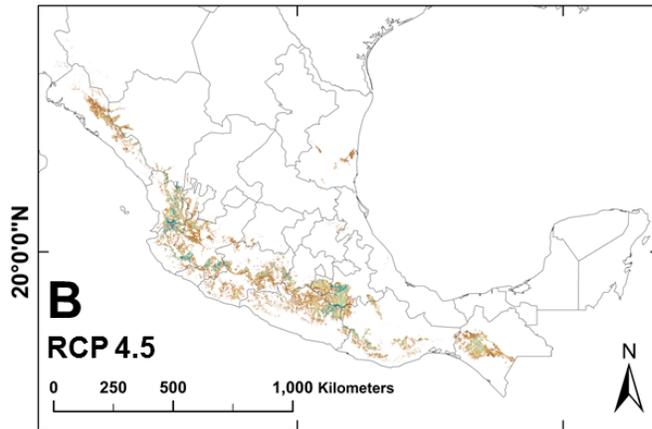


Fig. 24.

*Triatoma picturata*



2050



2070

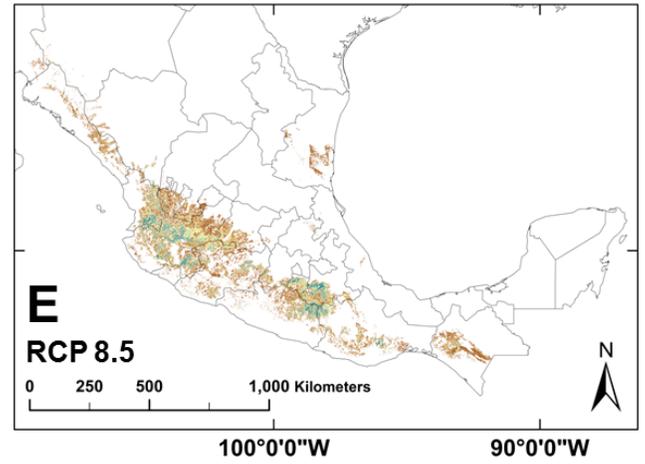
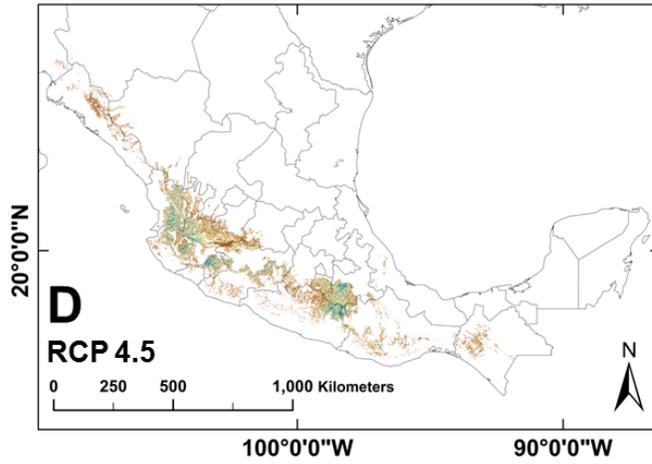
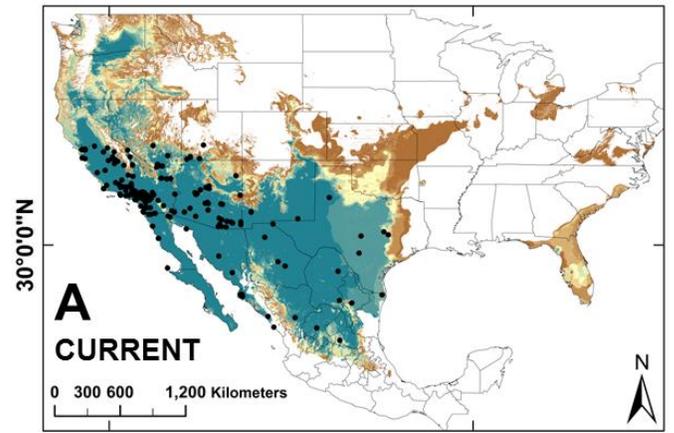
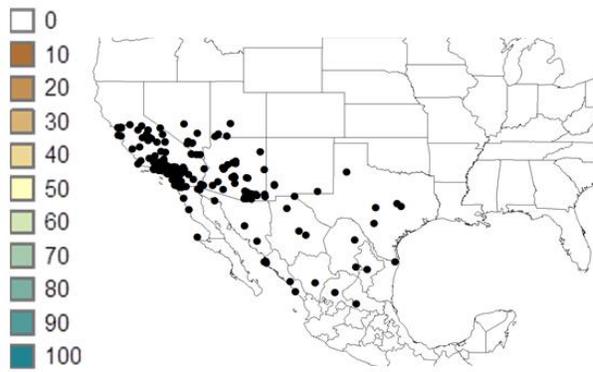
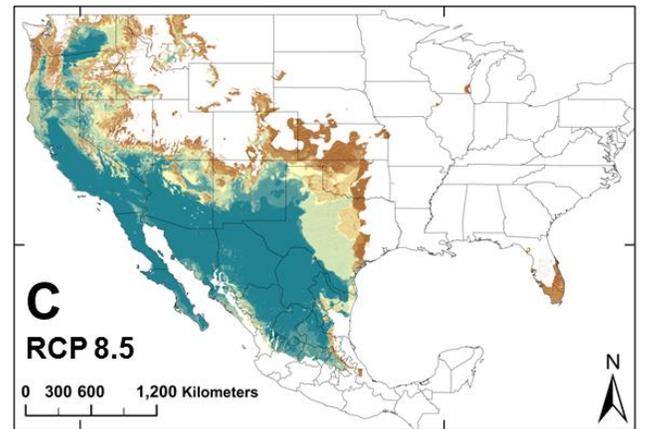
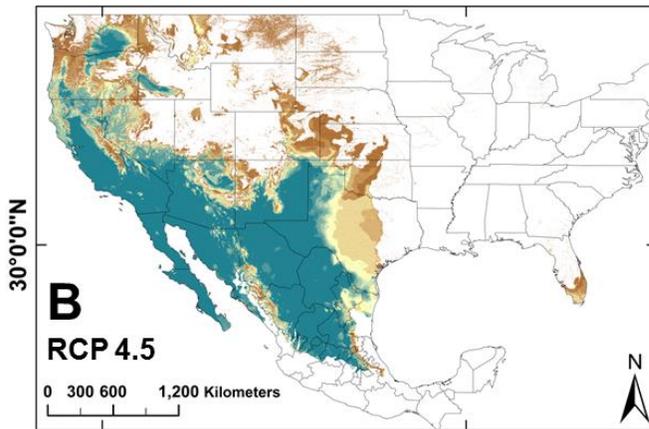


Fig. 25.

*Triatoma protracta*



2050



2070

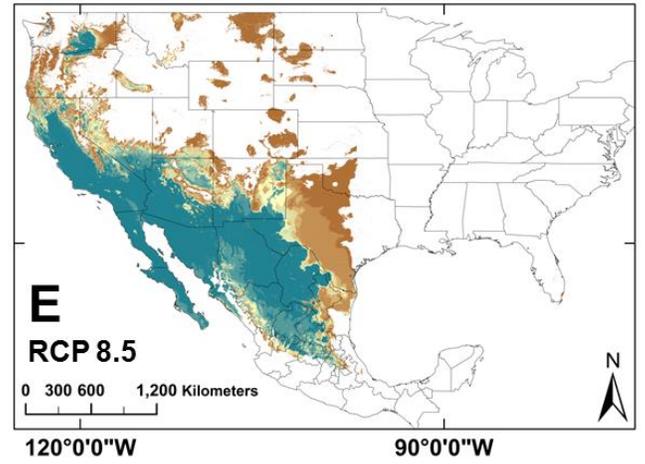
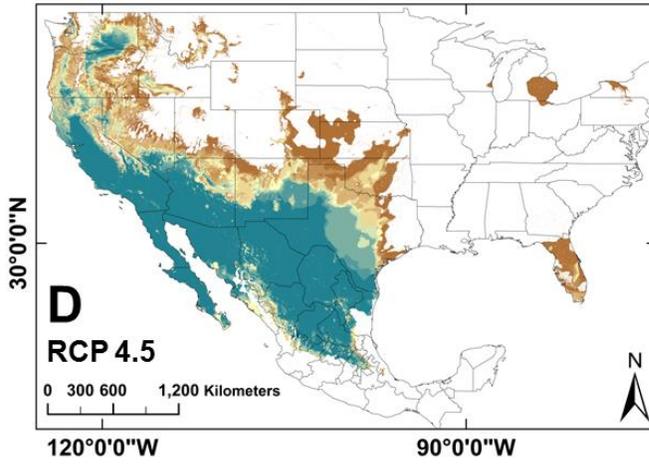
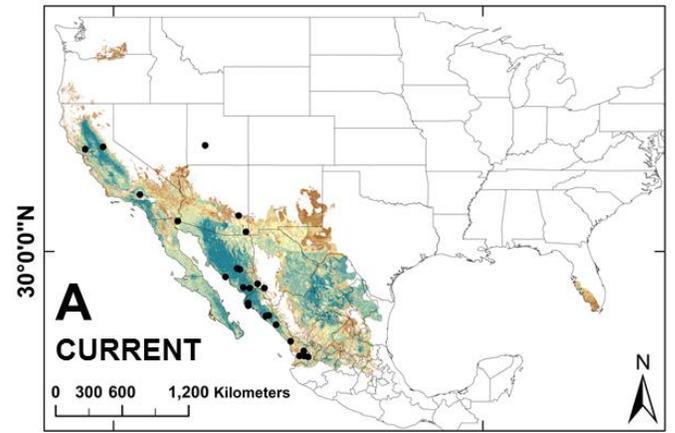
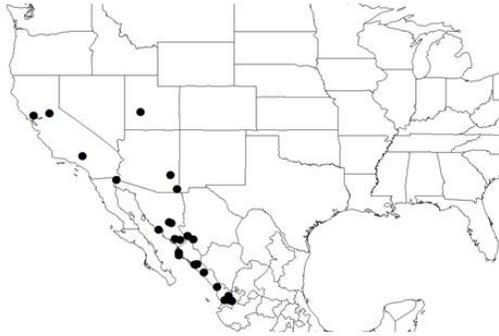
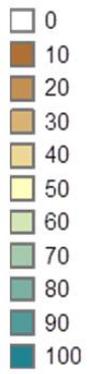
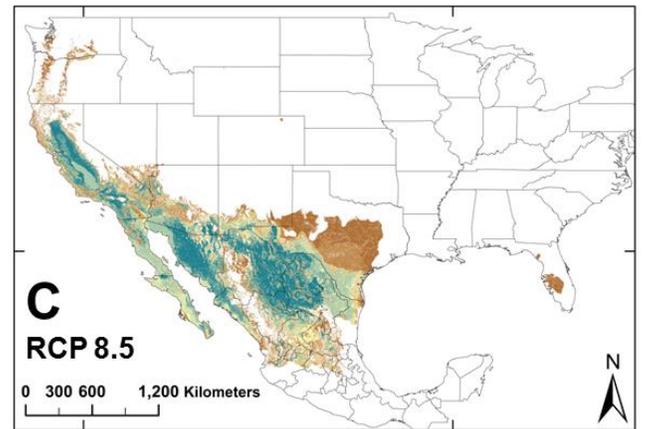
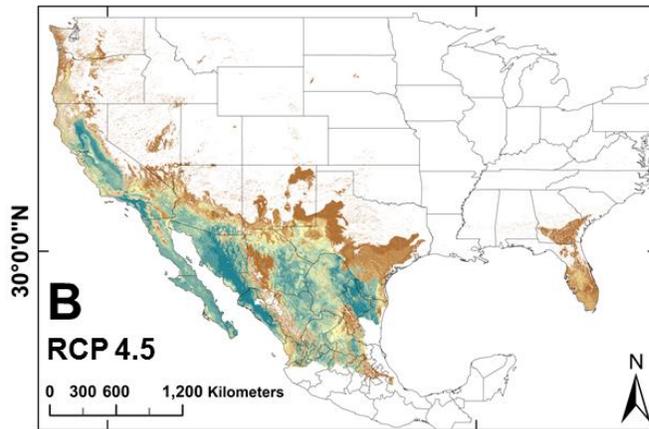


Fig. 26.

*Triatoma recurva*



2050



2070

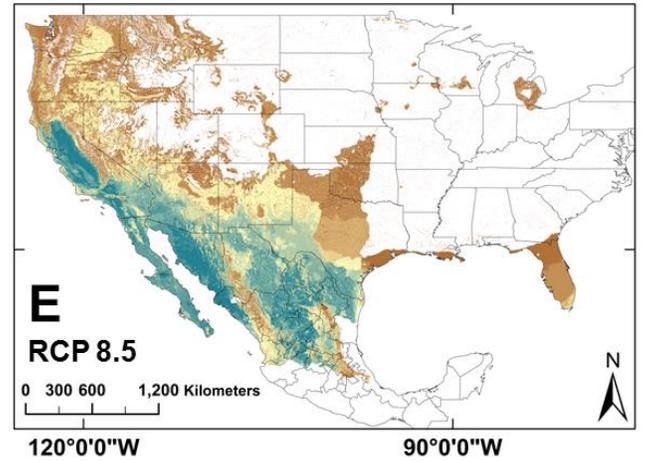
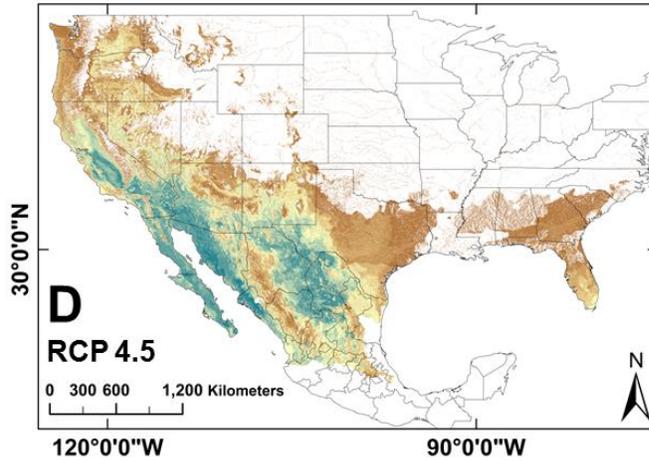
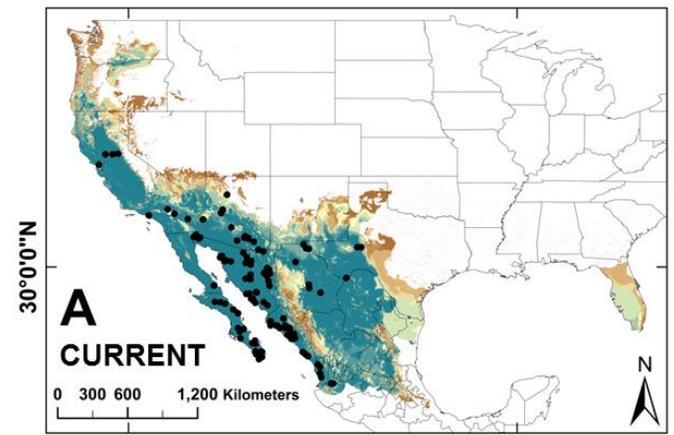
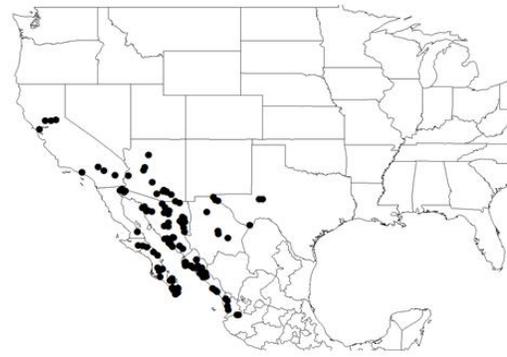
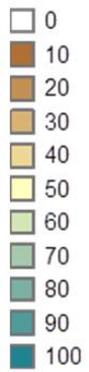
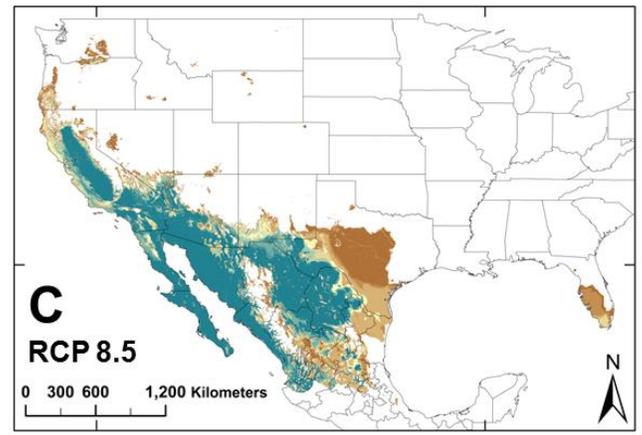
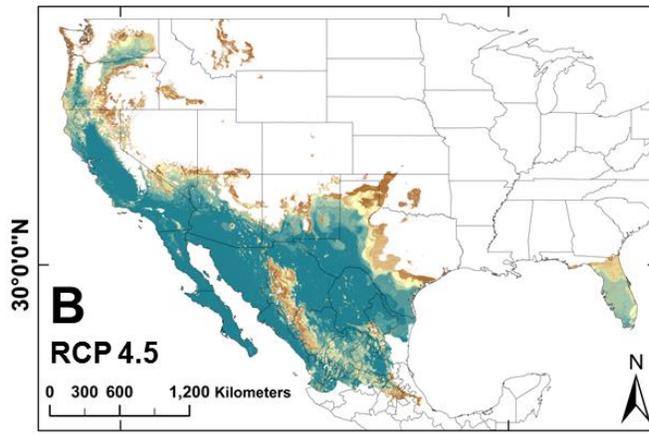


Fig. 27.

*Triatoma rubida*



2050



2070

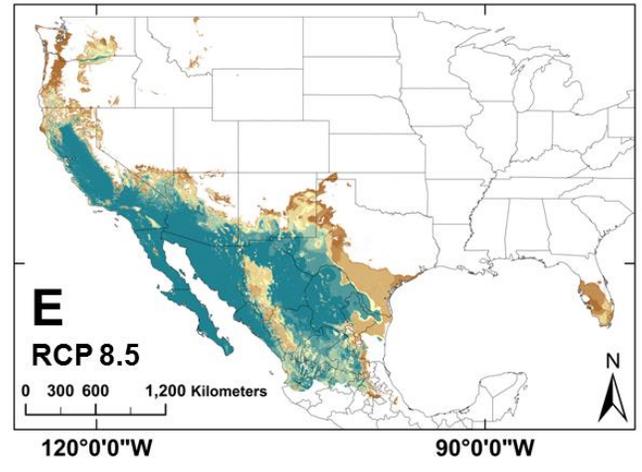
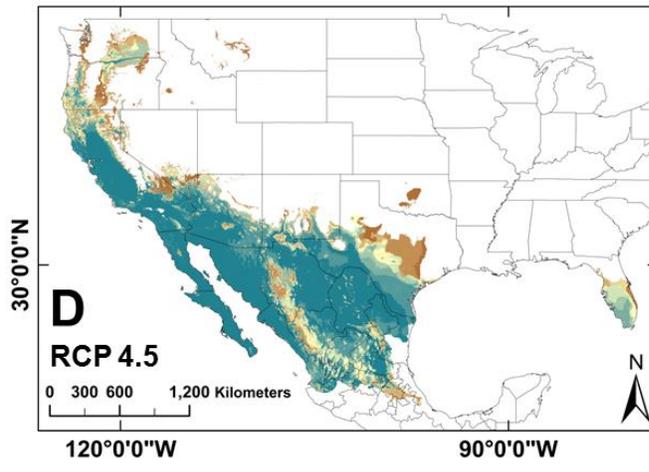
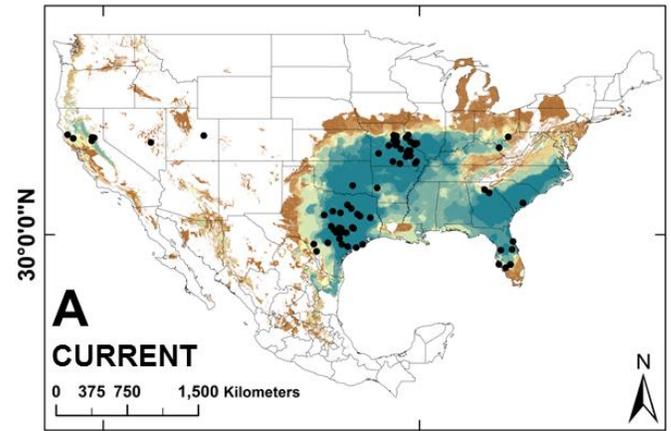
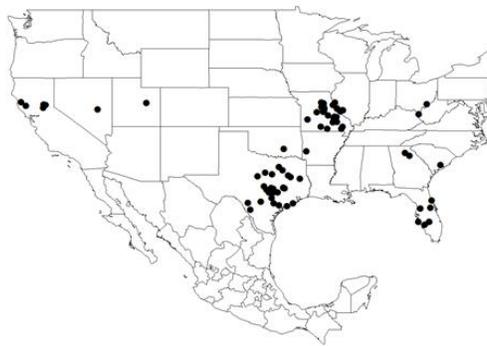
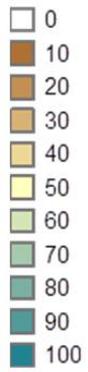
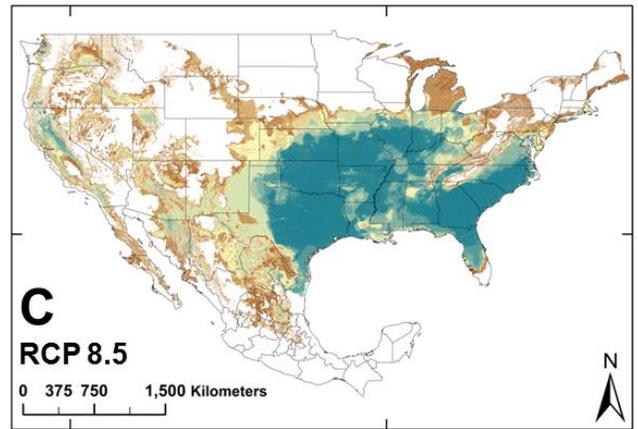
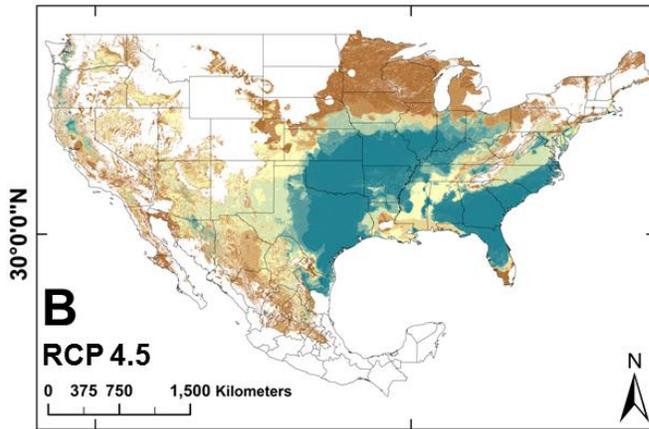


Fig. 28.

*Triatoma sanguisuga*



2050



2070

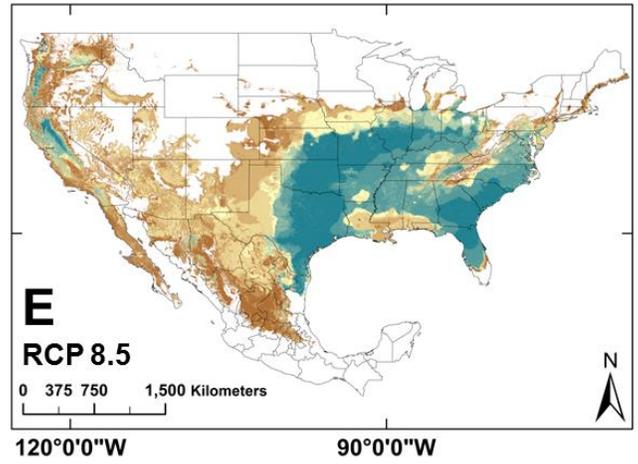
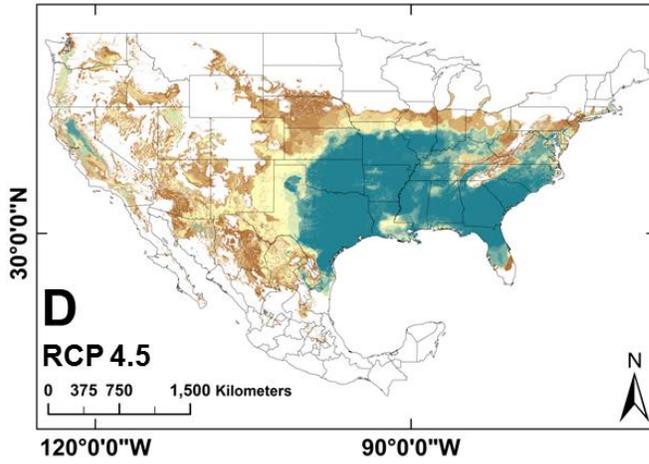
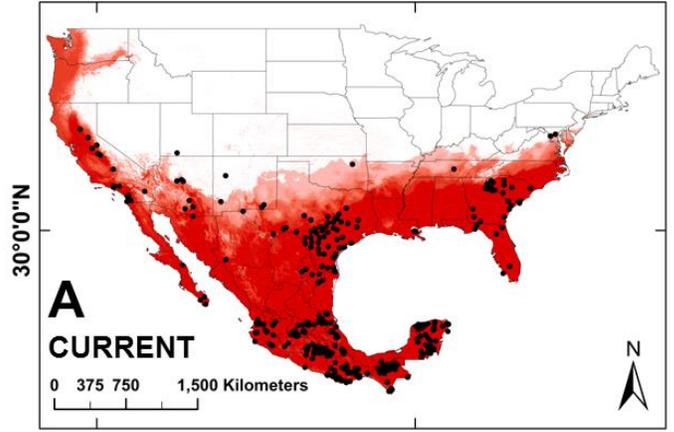
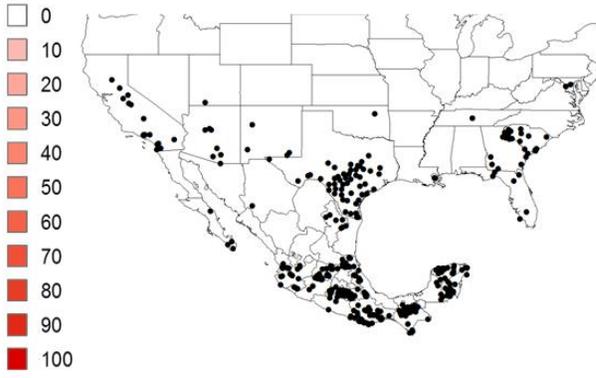
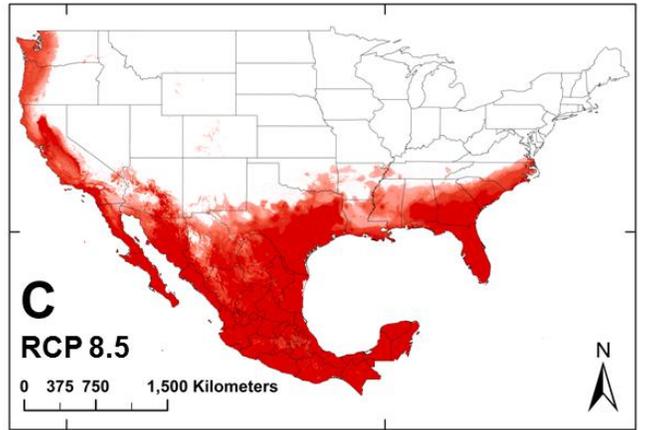
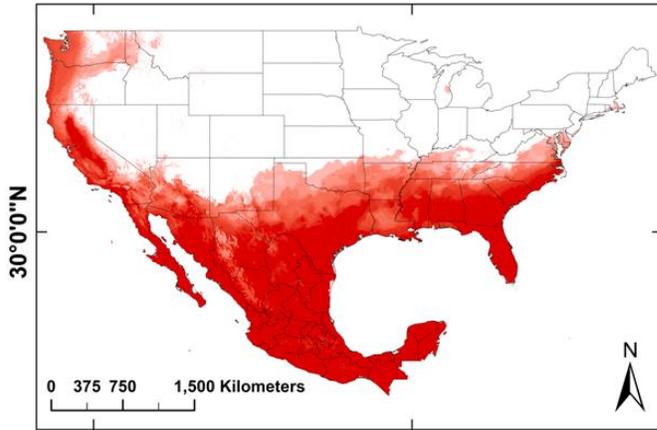


Fig. 29.

*Trypanosoma cruzi*



2050



2070

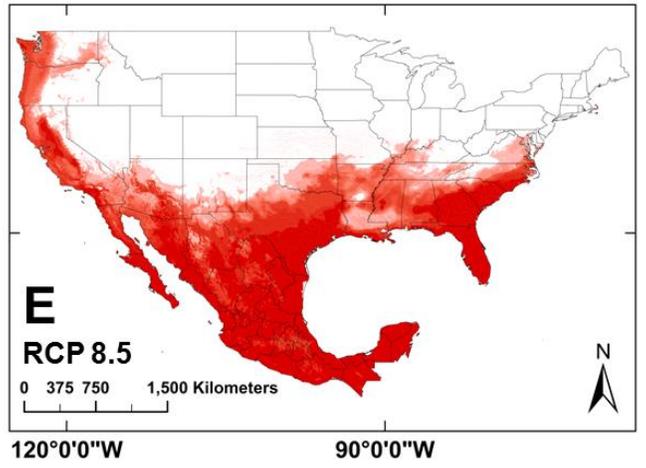
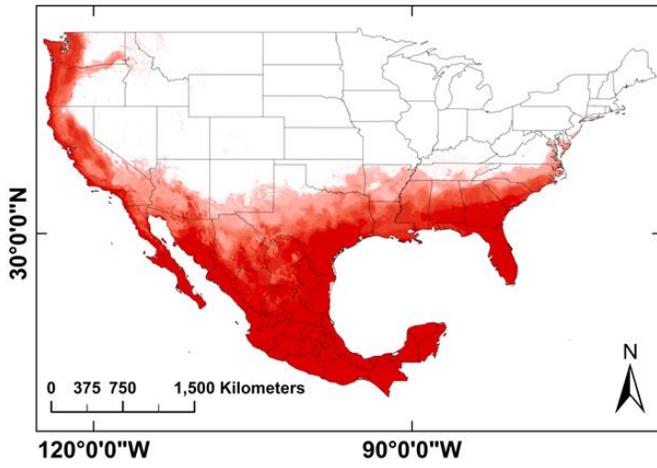


Fig. 30.

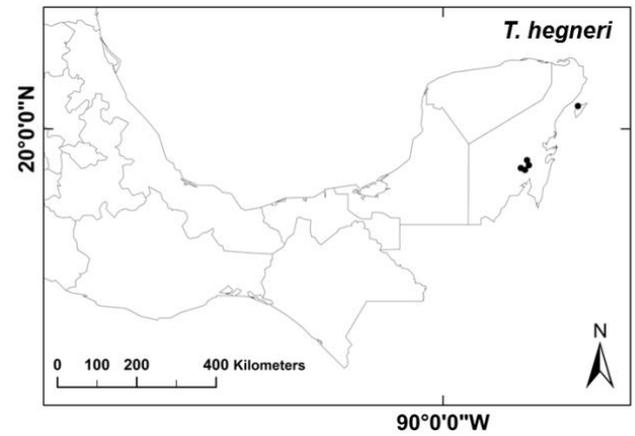
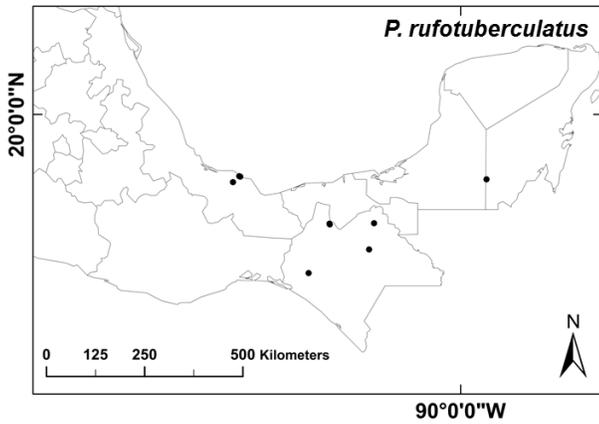
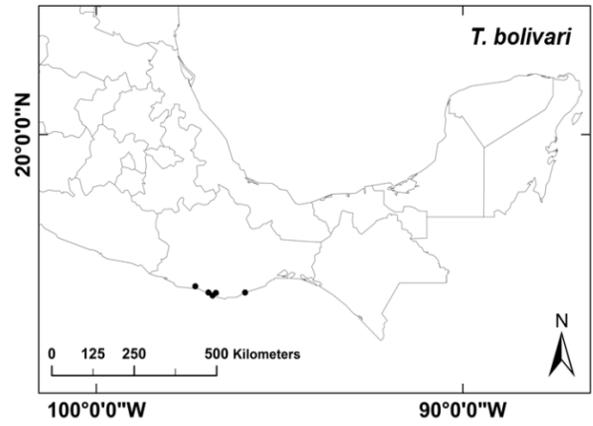
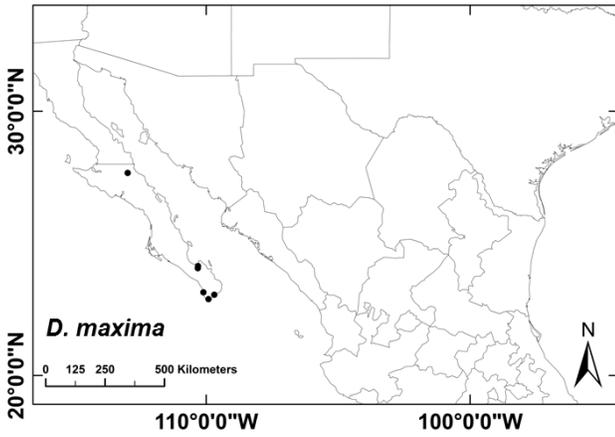
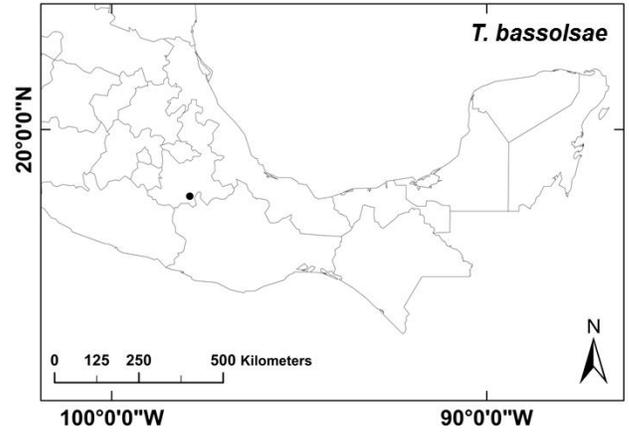
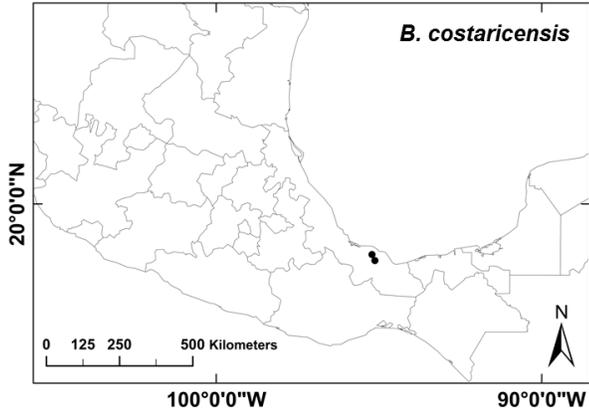


Fig. 31.

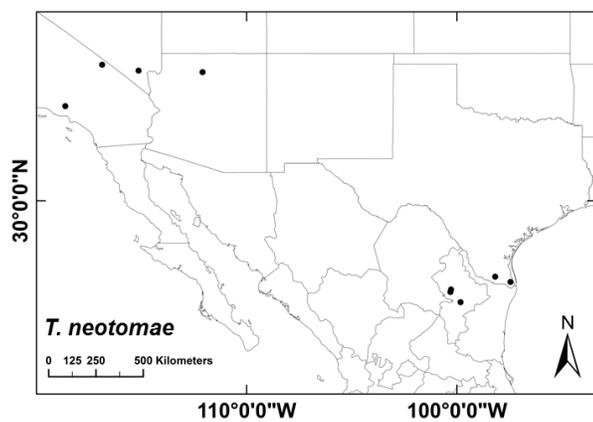
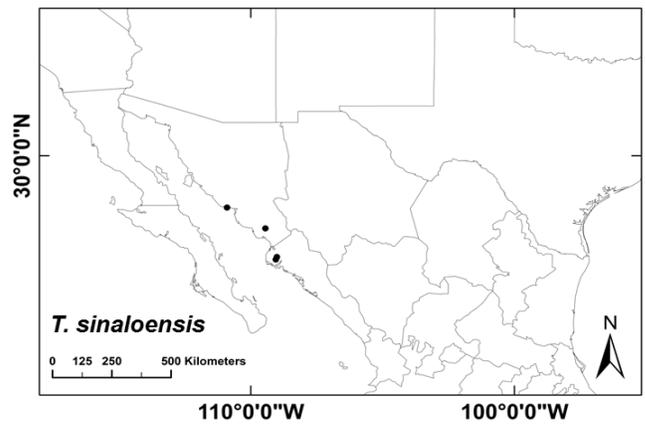
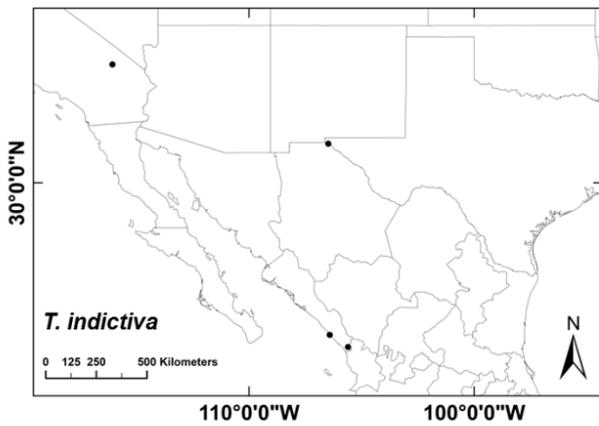
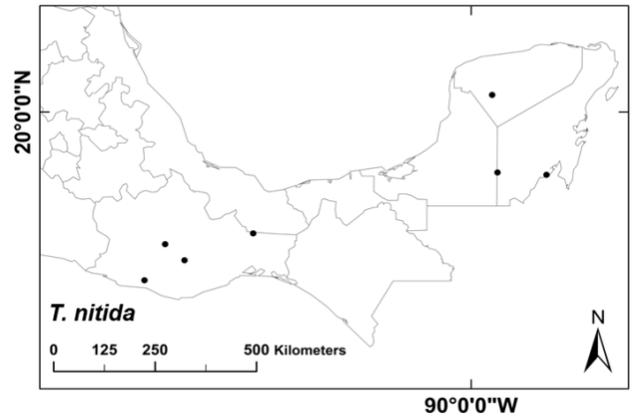
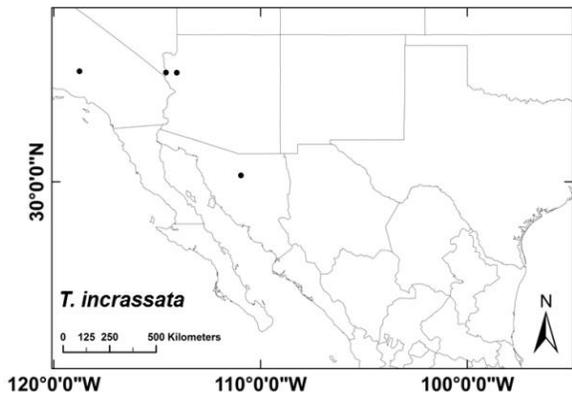


Fig. 32.