



# IMPACTO DEL CAMBIO CLIMÁTICO EN LA DISTRIBUCIÓN DE TRES ROEDORES ENDÉMICOS DE LA PENÍNSULA DE YUCATÁN: IMPLICACIONES PARA LA CONSERVACIÓN DE *Otonyctomys hattii*

## IMPACT OF CLIMATE CHANGE ON THE DISTRIBUTION OF THREE ENDEMIC RODENTS FROM THE YUCATAN PENINSULA: CONSERVATION IMPLICATIONS FOR *Otonyctomys hattii*

DAVID A. MOO-LLANES<sup>1</sup> | CARLOS M. BAAK-BAAK<sup>2</sup> | NOHEMI CIGARROA-TOLEDO<sup>3</sup> | JULIO CESAR TZUC-DZUL<sup>2</sup> | J. ALONSO PANTI-MAY<sup>4</sup> | JULIÁN E. GARCÍA REJÓN<sup>2</sup> | ANA CELIA MONTES DE OCA-AGUILAR<sup>5</sup>

<sup>1</sup> Centro Regional de Investigación en Salud Pública, Instituto Nacional de Salud Pública, Tapachula, Chiapas, México.

<sup>2</sup> Laboratorio de Arbovirología. Centro de Investigaciones Regionales “Dr. Hideyo Noguchi”. Universidad Autónoma de Yucatán, Mérida, Yucatán.

<sup>3</sup> Laboratorio de Biología Celular. Centro de Investigaciones Regionales “Dr. Hideyo Noguchi”. Universidad Autónoma de Yucatán, Mérida, Yucatán.

<sup>4</sup> Laboratorio de Zoonosis y otras enfermedades transmitidas por vector. Centro de Investigaciones Regionales “Dr. Hideyo Noguchi”. Universidad Autónoma de Yucatán, Mérida, Yucatán.

<sup>5</sup> Laboratorio de Inmunología, Centro de Investigaciones Regionales “Dr. Hideyo Noguchi”, Universidad Autónoma de Yucatán, Mérida, Yucatán.

---

**Revisado:** 09 de abril de 2021; aceptado: 04 de mayo de 2021; publicado: 31 de julio de 2021.

**Autor de correspondencia:** David A. Moo Llanes, davidmooll@gmail.com

**Cita:** Moo-Llanes D.A., C.M. Baak-Baak, N. Cigarroa-Toledo, J.C. Tzuc-Dzul, J.A. Panti-May, J.E. García Rejón y A.C. Montes de Oca-Aguilar. 2020. Impacto del cambio climático en la distribución de tres roedores endémicos de la Península de Yucatán: implicaciones para la conservación de *Otonyctomys hattii*. *Revista Mexicana de Mastozoología, nueva época*, 11(1):1-14. ISSN:2007-4484. [www.rev mexmasto zoologia.unam.mx](http://www.rev mexmasto zoologia.unam.mx)

### RELEVANCIA

El impacto del cambio climático en la biodiversidad es constante. Nosotros evaluamos el impacto del cambio climático en tres especies de roedores endémicos y definimos el nicho ecológico de *Otonyctomys hattii* como estrecho, y especializado en comparación con el nicho ecológico de *Peromyscus yucatanicus* y *Heteromys gaumeri*, que es amplio en la Península de Yucatán.

## RESUMEN

*Peromyscus yucatanicus*, *Heteromys gaumeri* y *Otonyctomys hatti* son pequeños roedores endémicos de la Península de Yucatán. Para comprender la distribución ecológica y geográfica de estas especies de roedores en la región, utilizamos modelos de nicho ecológico (MNE) y reconstruimos el impacto histórico (Pleistoceno), periodo actual y potencial del cambio climático (2050), en las áreas de idoneidad espacial. De acuerdo a nuestros modelos, las tres especies redujeron su cobertura desde el Pleistoceno hasta el periodo actual, pero en escenarios futuros se prevé un leve incremento de las áreas aptas para todas ellas. Sin embargo, el nicho ecológico de *O. hatti* es estrecho, especializado y diferente al de *P. yucatanicus* o *H. gaumeri*, que juntos ocupan un nicho relativamente similar y tienen una superposición sustancial en la distribución geográfica del hábitat adecuado. Muchas regiones de la distribución actual y potencial de *O. hatti* no están bajo protección a pesar de que es una especie amenazada. Nuestros resultados podrían utilizarse como un elemento importante para reevaluar las áreas de conservación de *O. hatti* en todo su rango potencial.

**Palabras clave:** Cricetidae, Heteromyidae, MaxEnt, México, nicho ecológico.

## ABSTRACT

*Peromyscus yucatanicus*, *Heteromys gaumeri* and *Otonyctomys hatti* are small endemic rodents of the Yucatan Peninsula. To understand the ecological and geographic distribution of these rodent species in the region, we used ecological niche modeling (ENM) and reconstructed the historical (Pleistocene), current, and potential impact of climate change (2050), on the spatial suitability areas. According to our models, the three species reduced their coverage from the Pleistocene to the current, but under future scenarios a slight increase of the suitable areas for all of them is predicted. However, the ecological niche of *O. hatti* is narrow, specialized and different from that of *P. yucatanicus* or *H. gaumeri*, which together occupy a relatively similar niche and have substantial overlap in the geographic distribution of suitable habitat. Many regions of the current

and potential distribution of *O. hatti* are not under protection even though it is a threatened species. Our results could be used as an important element to re-evaluate the conservation areas of *O. hatti* throughout its potential range.

**Key words:** Cricetidae, ecological niche, Heteromyidae, MaxEnt, Mexico.

## INTRODUCCIÓN

El cambio climático es una de las perturbaciones naturales más importantes que ha acelerado o modificado la composición, estructura y proceso funcional histórico y contemporáneo de los ecosistemas (Malcolm *et al.*, 2006; Parmesan y Yohe, 2003). Esta perturbación natural ha tenido un fuerte impacto en la dinámica poblacional de las especies y ha jugado un papel fundamental en los procesos de diversificación (Parmesan, 2006; Ramírez-Barahona *et al.*, 2009). Algunos estudios muestran la heterogeneidad de respuestas de las especies al cambio climático y cómo algunas regiones fueron y serán potencialmente más afectadas que otras (Cuervo-Robayo *et al.*, 2020; Hidasi-Nieto *et al.*, 2019; Prieto-Torres *et al.*, 2016; Ramírez-Barahona *et al.*, 2009). En particular, los estudios basados en predicciones futuras sugieren que el cambio climático afectará la distribución espacial de las condiciones ambientales más rápido de lo que las especies pueden adaptarse (Bellard *et al.*, 2012). En consecuencia, se espera que la distribución y supervivencia de las especies se vean afectadas, por ejemplo, se prevé que bajo estos escenarios se homogeneizará la fauna local y regional, debido a que la riqueza de especies declinará por la extinción de especies especializadas (Clavel *et al.*, 2010; Hidasi-Nieto *et al.*, 2019). A su vez, la pérdida de diversidad conducen a la extinción de interacciones y otros procesos funcionales de los ecosistemas (Cahill *et al.*, 2013). Esta es una de las razones por las que el cambio climático ha sido considerado uno de los mayores desafíos para la conservación natural y de la biodiversidad (Dawson *et al.*, 2011; Pearson y Dawson 2003; Walther *et al.*, 2002). Sin embargo, se sabe que el efecto del cambio climático sobre las especies dependerá de supuestos específicos, como el grupo biológico al que pertenecen, el grado de especialización al hábitat y el espacio geográfico en el que se da (Bellard *et al.*, 2014; Urban, 2015). Esto ha provocado que se preste mayor atención a

las consecuencias que traería el cambio climático en especies endémicas o en zonas donde se presenta un alto valor de endemismo (Leclerc *et al.*, 2020; Malcolm *et al.*, 2006; Morueta-Holme *et al.*, 2010; Urban, 2015). Las especies endémicas debido a su estrecha tolerancia de hábitat / clima y rangos específicos de bioma son más susceptibles a un clima cambiante y tienden a tener un mayor riesgo de extinción (Ashrafzadeh *et al.*, 2019; Malcom *et al.*, 2002; Peterson y Watson 1998; Thomas *et al.*, 2003).

La diversidad en la mastofauna de México ha sido el resultado de la complejidad fisiográfica del país, pero también de las fluctuaciones ambientales ocurridas durante el Pleistoceno (Arroyo-Cabrales *et al.*, 2010; Ceballos *et al.*, 2010; Ferrusquía-Villafranca *et al.*, 2010). Actualmente, la fauna de mamíferos de México está representada por 525 especies y el 30% (182) son exclusivas del país (Ceballos *et al.*, 2005; García-Marmolejo *et al.*, 2008). La mayoría de los mamíferos endémicos son roedores (116 especies) con dos especies extintas y, sin embargo, el 47% y el 37% se encuentran en la categoría de “preocupación” y “en peligro”, respectivamente (CONABIO, 2020; IUCN, 2020). A pesar de esto, pocos estudios han abordado cómo las poblaciones o especies de mamíferos, particularmente las especies endémicas, fueron o serán afectadas con el tiempo por variaciones espaciales climáticas (Aguado-Bautista *et al.*, 2015; Ramírez-Bautista *et al.*, 2020; Zamora-Gutiérrez *et al.*, 2019). Estos estudios son importantes, sobre todo porque la evidencia sugiere que el cambio climático en este país ha afectado de manera desigual las distintas provincias biogeográficas que agrupan o concentran la diversidad biológica de México (Cervo-Robayo *et al.*, 2020).

La historia biológica de la Provincia de la Península de Yucatán (PPY) comenzó hace 65 millones de años, durante este periodo fue testigo de numerosas transgresiones marinas en aguas tropicales (Vázquez-Domínguez y Arita, 2010) y fue influenciado por los efectos de los cambios climáticos del Pleistoceno-Holoceno (Islebe *et al.*, 1996; Metcalfe *et al.*, 2000; Orellana *et al.*, 2003). La Península de Yucatán tiene una fuerte afinidad neotropical tanto en flora como en fauna (Vázquez-Domínguez y Arita, 2010) y una clara diferenciación biótica entre la región norte (región de Yucatán) y la región sur (El Peten; Ibarra-Martínez *et al.*, 2002; Ra-

mírez-Barahona *et al.*, 2009). En este paisaje kárstico, la mayor diversidad de mamíferos se concentra en la región sur (Campeche y Quintana Roo) y los roedores son uno de los grupos biológicos más representativos (Sosa-Escalante *et al.*, 2013).

*Peromyscus yucatanicus* Allen and Chapman, 1897, *Heteromys gaumeri* Allen y Chapman, 1897, y *Otonyctomys hatti* Anthony, 1932 son las únicas especies endémicas de pequeños roedores de la PPY (MacSwiney *et al.*, 2009; Zaragoza-Quintana *et al.*, 2016). Aunque se considera que las tres especies se encuentran en toda la región (Hernández-Betancourt *et al.*, 2012; Vázquez-Domínguez y Arita, 2010; Zarza *et al.*, 2003), se desconoce la influencia que han tenido las oscilaciones climáticas históricas en su distribución actual y la forma en que responderán a los escenarios de cambio climático futuros. Con excepción de *O. hatti*, el resto de especies han sido muy estudiadas en la región. *Peromyscus yucatanicus* y *H. gaumeri* son de hábitos semi-arbóreos y terrestres, respectivamente. Ambas especies se registran en selvas tropicales secas y húmedas (MacSwiney *et al.*, 2012), en paisajes perturbados (Cimé-Pool *et al.*, 2007) e incluso en viviendas rurales (Panti-May *et al.*, 2012). Asimismo, ambos roedores son reservorios importantes de patógenos causantes de enfermedades (Chablé-Santos *et al.*, 1995; Loría-Cervera *et al.*, 2013; Panti-May, 2011), de modo que, cualquier evento que modifique su distribución también podría afectar la dinámica de la interacción espacial huésped-parásito.

A la fecha, hay menos de 40 registros de *O. hatti* en el PPY. Los registros incluyen los estados de Yucatán, Quintana Roo y Campeche en México y el noreste de Guatemala y el centro y norte de Belice (MacSwiney *et al.*, 2009; Panti-May *et al.*, 2015). *Otonyctomys hatti* es una especie de hábitos arbóreos de la que se desconoce muchos aspectos importantes sobre su ecología y biología (Zaragoza-Quintana *et al.*, 2016). Sin embargo, parece que esta especie produce menos camadas en promedio (1.8; Panti-May *et al.*, 2015) que *P. yucatanicus* (3.5; Lackey 1976) y *H. gaumeri* (4.7; Hernández-Betancourt, 2003). En la actualidad, la especie está en la lista de “Especies en peligro de extinción” (CONABIO 2017; Sosa-Escalante *et al.*, 2013) pero no existen estudios sobre los factores que influyen en su distribución espacial y las posibles presiones ecológicas que podrían afectar a sus poblacio-

nes (Zaragoza-Quintana *et al.*, 2016). Identificar y comprender los factores que influyen en la distribución espacial y temporal de especies endémicas podría ayudar a abordar las medidas de conservación de la biodiversidad en áreas prioritarias (Sánchez-Cordero *et al.*, 2005; Porcasi *et al.*, 2005). En este trabajo utilizamos un enfoque de nicho ecológico para evaluar y generar modelos que nos permitan estimar los impactos históricos (Pleistoceno), actuales y potenciales del cambio climático en la distribución espacial de tres pequeños roedores endémicos (*P. yucatanicus*, *H. gaumeri* y *O. hatti*) de la PPY. Si bien las especies coexisten en una provincia biogeográfica relativamente homogénea en términos ecológicos, nuestra hipótesis es que el patrón de distribución histórico y futuro será particular, determinado por las capacidades y habilidades inherentes a la especie.

## MATERIALES Y MÉTODOS

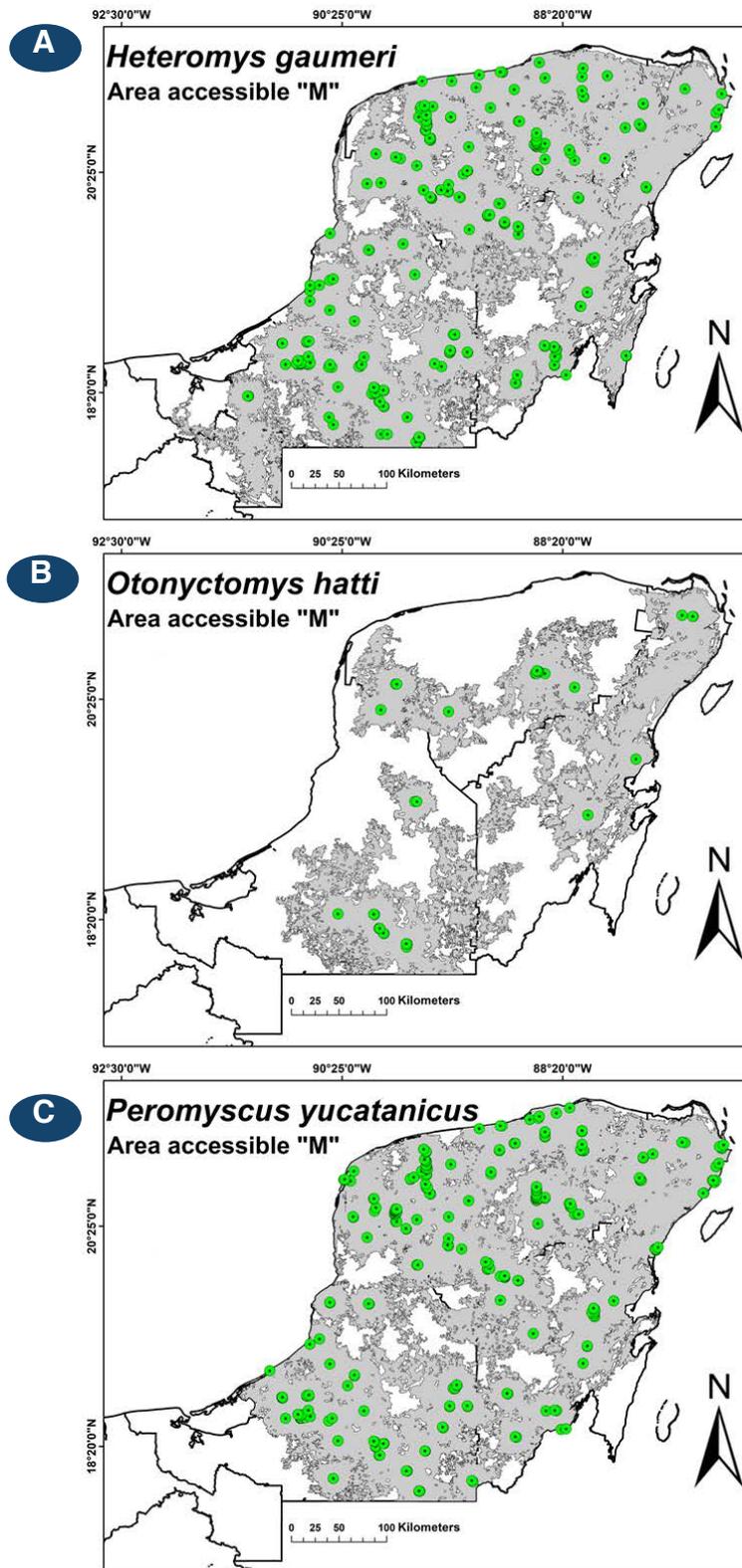
**Base de datos.** Se construyó una base de datos a partir de colecciones disponibles en la literatura científica publicada (Pech-May *et al.*, 2016a), en los registros de la colección de la Universidad Autónoma de Yucatán (Estrella, E.), en la Global Biodiversity Information Facility (GBIF 2021; Available [www.gbif.org/](http://www.gbif.org/)) y en Enciclovida-CONABIO (disponible en [www.encyclovida.mx/](http://www.encyclovida.mx/)). La base de datos incluyó 507 puntos de datos de ocurrencias para tres especies en Yucatán, Campeche, Quintana Roo (México): *P. yucatanicus* (N=250; <https://doi.org/10.15468/dl.u6v422>), *H. gaumeri* (N=225; <https://doi.org/10.15468/dl.npze7d>), y *O. hatti* (N=32; <https://doi.org/10.15468/dl.nmjr2u>).

**Área accesible M.** El área accesible M de la distribución potencial se definió por medio de puntos de ocurrencias para cada especie (*P. yucatanicus*, *H. gaumeri*, y *O. hatti*) y se creó un búfer disuelto en un radio de 15 km desde cada punto de ocurrencia (Barve *et al.*, 2011). Esos búfers se superpusieron con el Inventario Forestal INEGI 2010 V5 (INEGI, 2015) para crear un búfer nuevo llamado área accesible M (Owens *et al.*, 2013). El área accesible M se estimó para *P. yucatanicus* (125,600 km<sup>2</sup>), *H. gaumeri* (133,910 km<sup>2</sup>), y *O. hatti* (64,931 km<sup>2</sup>; Figura 1).

**Modelos de Nicho Ecológico (MNE).** Utilizamos 19 variables de Bioclim obtenidas de WorldClim versión 2.0 (Fick y Hijmans, 2017) con una resolución 0.00833° (1km<sup>2</sup>). Los MNE basados en

datos de ocurrencia y variables bioclimáticas se construyeron utilizando el programa MaxEnt V.3.4.1 (Phillips *et al.*, 2017). El programa divide de manera aleatoria los puntos de ocurrencia en datos de entrenamiento para la construcción de modelos (75%) y datos de evaluación para las pruebas de los modelos (25%; Moo-Llanes, 2016). Más adelante, se revisaron los MNE, para ver las variables de Bioclim que explican el 90% de la construcción de estos modelos por medio de una prueba de “Jackknife” proporcionada por MaxEnt. Estas variables se analizaron mediante una matriz de correlación (Moo-Llanes, 2016) y se seleccionaron las variables de Bioclim para el modelo final. Todos los modelos se convirtieron a binarios (ausencia / presencia) de acuerdo a el 95% de los puntos de ocurrencia (Peterson *et al.*, 2012).

**Escenarios bajo Cambio Climático (ECC).** La proyección de MNE se analizó para tres períodos de tiempo: a) Pleistoceno: Las reconstrucciones climáticas se calibraron y redujeron estadísticamente utilizando datos de *WorldClim* de ≈ 21.000 años antes del actual, el período que tuvo las condiciones más frías y secas utilizando el *Model for Interdisciplinary Research on Climate* (MIROC; Hasumi y Emori, 2004); b) Para las condiciones actuales, interpolaciones de datos observados y representativos de 1950 a 2000 (Fick y Hijmans, 2017) y c) Futuro: Utilizamos los escenarios RCP 4.5 en el año 2050 del Quinto Informe de Evaluación (AR5; *Representative Concentration Pathways*, RCP; IPCC, 2013). El ECHAM6 es un modelo de circulación atmosférica general y, como tal, se centra en el acoplamiento entre los procesos diabáticos y las circulaciones a gran escala, ambos impulsados en última instancia por el forzamiento radiativo. ECHAM6 tiene una representación mejorada de la transferencia radiativa en la parte de onda corta (o solar) del espectro, una descripción completamente nueva de los efectos de los aerosoles, una representación mejorada del albedo de la superficie, incluido el tratamiento de los estanques de deshielo en el hielo marino, y una representación en la atmósfera media como parte del modelo estándar (Stevens *et al.*, 2013). El ECHAM6 se adaptó mejor a las condiciones atmosféricas de la región, por ejemplo en Pech-May *et al.*, (2016a) y Carmona-Castro *et al.*, (2018). Elegimos utilizar el modelo MIROC (Pleistoceno) y ECHAM6 (RCP 4.5) porque se consideran la mejor opción para PPY (Pech-May *et al.*, 2016b).



**Figura 1.** Área accesible M para roedores endémicos en la Provincia de la Península de Yucatán en gris. Los puntos verdes representan los registros de ocurrencias de cada especie. **A)** *Heteromys gaumeri*, **B)** *Otonyctomys hatti*, y **C)** *Peromyscus yucatanicus*.

**Evaluación del Modelo.** El área bajo la curva (AUC por sus siglas en inglés) de la línea observada de rendimiento del modelo, se dividió por el área bajo la línea de expectativas aleatorias, para calcular la ROC-parcial (característica operativa del receptor por sus siglas en inglés) y evaluar los modelos (Peterson, 2012). Se utilizaron re-muestréos basados en Bootstrap (1,000 en total), en las que el 50% de los datos de evaluación se vuelven a muestrear con reemplazo y se recalculan las relaciones AUC, para probar la hipótesis de que el rendimiento del modelo era mejor que la expectativa aleatoria cuando el 95% de las proporciones de AUC bootstrap-replicadas eran  $> 1.0$ , se rechazó la hipótesis nula de que el rendimiento no era mejor que la expectativa aleatoria (Peterson *et al.*, 2008).

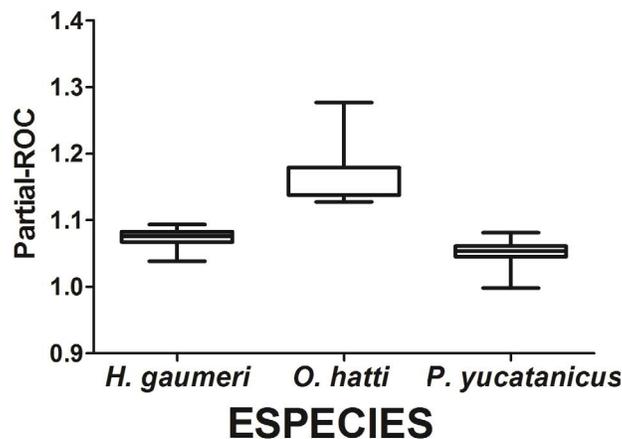
## RESULTADOS

Todos los modelos fueron significativos con un valor por arriba de 1 (Figura 2). La mayoría de las variables *Bioclim* que contribuyen  $\geq 85\%$  a la construcción del modelo fueron diferentes para cada especie (Cuadro 1). La mayor magnitud y similitud (siete) de variables bioclimáticas se detectó entre *P. yucatanicus* (N = 10) y *H. gaumeri* (N = 10). A diferencia de las otras especies, solo se utilizaron cuatro variables *Bioclim* para construir los modelos de distribución de *O. hattii* y la isothermalidad (Bio 3) fue exclusiva para el modelo de nicho ecológico de esta especie. La estacionalidad de la temperatura (Bio 4) y la temperatura media del trimestre más húmedo (Bio 8) fueron

las únicas variables *Bioclim* compartidas entre las tres especies distribuidas en la PPY.

Las predicciones del modelo de nicho ecológico difirieron entre las tres especies, con un hábitat más adecuado para *P. yucatanicus* (Figura 3) y *H. gaumeri* (Figura 4) en toda la PPY. Un dato interesante es que reportan menos áreas de superposición entre *O. hattii* (Figura 5) y el resto de las especies en los tres períodos de tiempo. Nuestros modelos indican que el hábitat adecuado para *O. hattii* es menos del 50% del reportado para *P. yucatanicus* y *H. gaumeri* en los tres períodos de tiempo (Cuadro 2). La distribución potencial de *O. hattii* es bastante discontinua en la región central del estado de Yucatán. La distribución potencial predicha para *O. hattii* continúa más al norte en el estado de Quintana Roo y desciende a las selvas tropicales conocidas como la región de El Petén. Sin embargo, se puede observar que las áreas adecuadas en El Petén tampoco son continuas.

La predicción en condiciones del periodo Pleistoceno revela que las tres especies tenían un área de distribución de idoneidad mayor que en la actualidad. El área de cobertura de *H. gaumeri*, *P. yucatanicus* y *O. hattii* disminuyó desde el Pleistoceno a la actualidad en un promedio de 1%, 2% y 5%, respectivamente. Sin embargo, la predicción del período actual hasta el año 2050 sugiere particularmente un aumento en todas las especies. *Heteromys gaumeri* y *O. hattii* aumentarán su área de cobertura en un 12% y un 13% cada una. *Peromyscus yucatanicus* solo



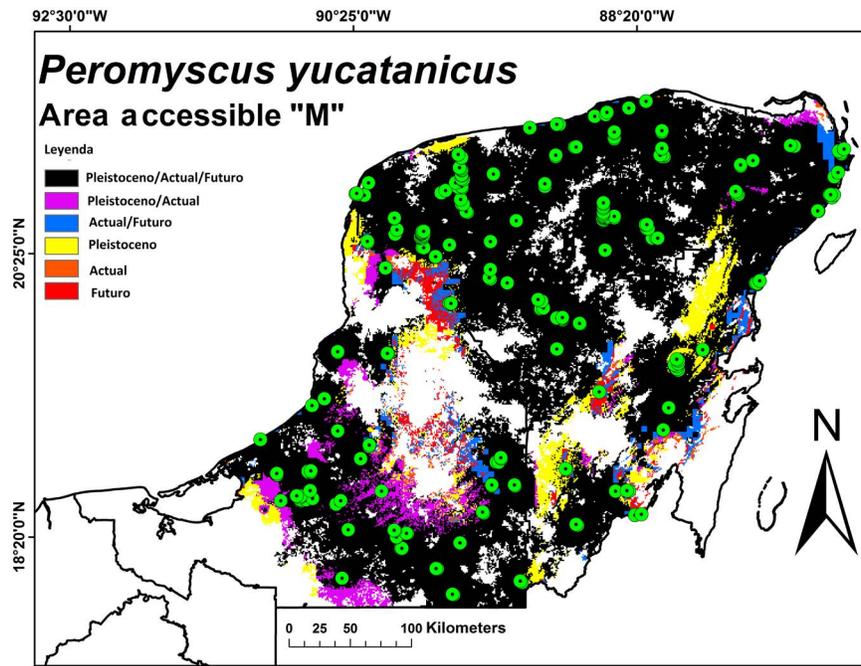
**Figura 2.** Valores de ROC parcial para roedores endémicos en la Provincia de la Península de Yucatán.

Cuadro 1. Contribuciones de las variables (%) al modo de nicho ecológico climático de tres roedores endémicos de la Provincia de la Península de Yucatán.

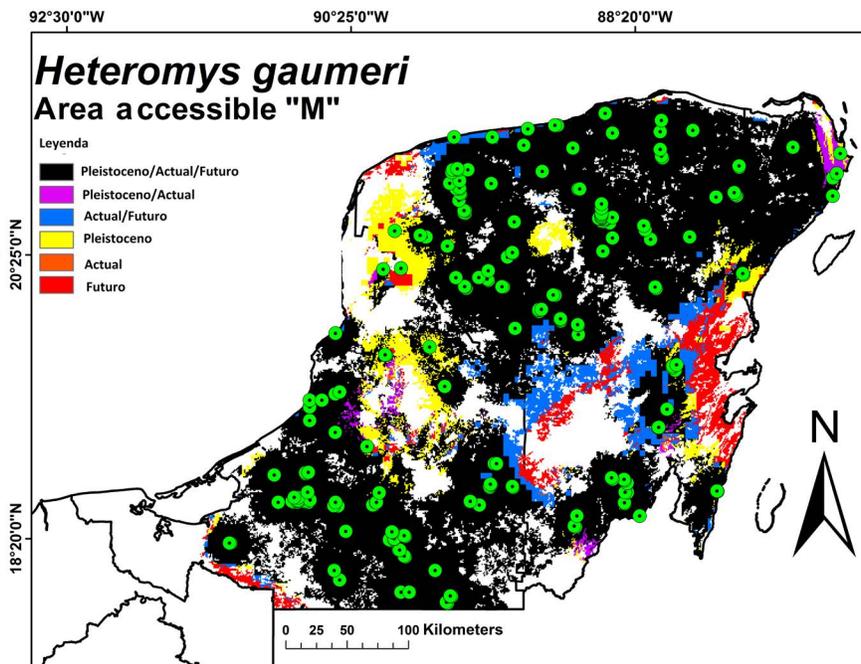
Variables Bioclim	<i>Peromyscus yucatanicus</i>	<i>Heteromys gaumeri</i>	<i>Otonyctomys hatti</i>
(Bio1) Annual Mean Temperature	3.0	23.9	-
(Bio2) Mean Diurnal Range	2.9	17.0	-
(Bio3) Isothermality	3.1	2.2	22.9
(Bio4) Temperature Seasonality	11.3	6.0	10.0
(Bio5) Max Temperature of Warmest Month	2.0	1.2	-
(Bio6) Min Temperature of Coldest Month	1.3	1.0	-
(Bio7) Temperature Annual Range	1.7	1.4	3.2
(Bio8) Mean Temperature of Wettest Quarter	6.5	3.6	44.2
(Bio9) Mean Temperature of Driest Quarter	-	4.9	-
(Bio10) Mean Temperature of Warmest Quarter	-	1.0	-
(Bio11) Mean Temperature of Coldest Quarter	5.9	2.0	-
(Bio12) Annual Precipitation	7.1	2.0	10.1
(Bio13) Precipitation of Wettest Month	6.6	0.4	3.5
(Bio14) Precipitation of Driest Month	6.1	9.9	2.0
(Bio15) Precipitation Seasonality	11.8	6.7	1.6
(Bio16) Precipitation of Wettest Quarter	6.2	6.5	1.5
(Bio17) Precipitation of Driest Quarter	-	1.0	1.0
(Bio18) Precipitation of Warmest Quarter	9.3	5.0	-
(Bio19) Precipitation of Coldest Quarter	15.2	4.3	-

Cuadro 2. Área de cobertura (Km<sup>2</sup>) de tres roedores endémicos en la Península de Yucatán en tres periodos de tiempos: Pleistoceno, actual, y futuro (2050).

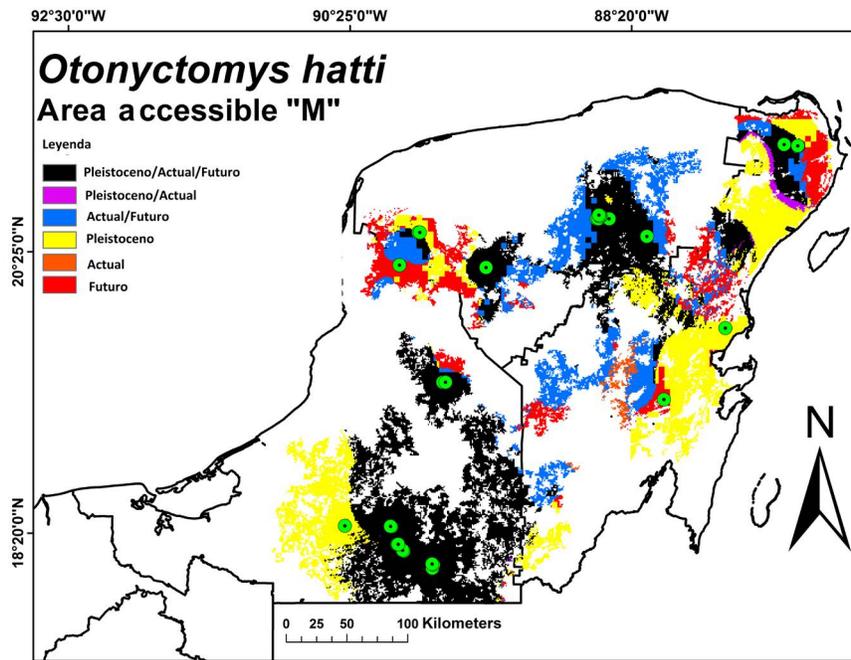
Familia	Especies	Pleistoceno	Actual	2050	Modelo compartido (Pleistoceno/ Actual/ 2050)
Heteromyidae	<i>H. gaumeri</i>	112,697	111,722	123,770	102,209
Cricetidae	<i>P. yucatanicus</i>	113,715	110,694	112,653	99,815
	<i>O. hatti</i>	43,648	38,523	51,409	27,444



**Figura 3.** Modelos de nicho climático de *Peromyscus yucatanicus* en la provincia de la Península de Yucatán. Los modelos se proyectaron bajo el Pleistoceno ( $\approx 21,000$  años antes del actual), actualmente (como distribución potencial) y bajo cambio climático futuro (2050). El resto de categorías representan áreas adecuadas compartidas entre los períodos. Los puntos verdes representan los registros de apariciones de *P. yucatanicus*.



**Figura 4.** Modelos de nicho climático de *Heteromys gaumeri* en la Provincia de la Península de Yucatán. Los modelos se proyectaron bajo el Pleistoceno ( $\approx 21,000$  años antes del presente), actualmente (como distribución potencial) y bajo cambio climático futuro (2050). El resto de las categorías representan áreas adecuadas compartidas entre los períodos. Los puntos verdes representan los registros de apariciones de *H. gaumeri*.



**Figura 5.** Modelo de nicho climático de *Otonyctomys hatti* en la Provincia de la Península de Yucatán. Los modelos se proyectaron bajo escenarios del Pleistoceno ( $\approx 21,000$  años antes del presente), actualmente (como distribución potencial) y bajo cambio climático futuro (2050). El resto de categorías representan áreas adecuadas compartidas entre los periodos. Los puntos verdes representan los registros de apariciones de *O. hatti*.

incrementó su área de cobertura en un 2%. A pesar de que nuestras proyecciones de nicho ecológico desde el Pleistoceno hasta 2050 sugieren una alta estabilidad para *P. yucatanicus* (Figura 3) y *H. gaumeri* (Figura 4), nuestro modelo también mostró que en todos los escenarios en la PPY proporciona un área reducida de hábitat adecuado para *O. hatti* (Figura 5).

## DISCUSIÓN

Este estudio representa una primera evaluación de las implicaciones históricas (Pleistoceno), actuales y futuras que el cambio climático puede tener en la distribución espacial de los tres roedores endémicos de la PPY, en especial para *O. hatti*. Aunque no se prevé que el cambio climático afecte la distribución en las tres especies de roedores endémicos, nuestro modelo revela que *O. hatti* tiene un nicho climático estrecho (definido por cuatro variables *Bioclim*) y, en consecuencia, una distribución geográfica menor del hábitat adecuado. Encontramos que a pesar de la aparente relativa homogeneidad ambiental de esta región, el nicho climático entre especies es diferente. De hecho, a pesar de que *P. yuca-*

*tanicus* y *O. hatti* pertenecen a la misma familia (Cricetidae) y con registros en toda la PY, las variables climáticas que influyen en su distribución son diferentes. *Peromyscus yucatanicus* y *H. gaumeri* ocupan un nicho similar y tienen una superposición sustancial en la distribución geográfica del hábitat adecuado en la PPY. Por el contrario, solo cuatro variables definen el nicho climático de *O. hatti* y se encontró que la isothermalidad es una de las más importantes y específicas. De acuerdo a los valores isotérmicos para esta especie ( $64 + 3$ ), se sugiere que se distribuye en áreas con rangos de temperatura estables dentro de un mes promedio en relación al rango de temperatura anual. El estrecho nicho climático, dirigido por cuatro variables, y el rango geográfico documentado para *O. hatti*, sugiere que se trata de una especie altamente especializada que requiere de un tipo específico de vegetación para proporcionar condiciones adecuadas para la alimentación y reproducción, una característica común de especies propensas al riesgo de extinción (Isik, 2011).

En general, las predicciones bajo condición histórica (Pleistoceno) y distribución potencial revelan que el hábitat adecuado de *O. hatti* es

más subdividido y discontinuo que el resto de las especies. La separación entre las zonas adecuadas dentro y entre la región norte (Centro de Yucatán) y sur (El Petén) de la PPY por regiones desfavorables es muy clara y sugiere que el principal factor que afecta la dispersión de *O. hatti* es la ausencia de áreas idóneas, tanto en el Pleistoceno como en la actualidad. Asimismo, nuestros resultados podrían incluso sugerir que los pocos registros de *O. hatti* en la región se deben a estas áreas desfavorables, más que a la falta de muestreo sistemático. Es interesante que, las principales áreas discontinuas de esta especie se encuentren en el punto más alto en el norte (sur del estado de Yucatán) y sur (Campeche) de la PPY. Estas áreas con mayor elevación corresponden a la “Sierrita de Ticul” (250 msnm) en el estado de Yucatán y la meseta de Zoh-Laguna (400 msnm) en Calakmul en la región de El Petén (Ibarra-Martínez *et al.*, 2002).

Los pocos registros fósiles de *O. hatti* y *P. yucatanicus* provienen de depósitos del Pleistoceno en cuevas del estado de Yucatán. (Arroyo-Cabrales y Álvarez, 2003; MacSwiney, 2009). Particularmente para *O. hatti*, los registros fósiles se concentran en la porción sur del estado de Yucatán donde las áreas de idoneidad son discontinuas, tanto bajo proyección del Pleistoceno como distribución potencial. Durante el Pleistoceno, todas las especies se distribuirían en paisajes dominados por climas áridos, sabanas y matorrales (Islebe *et al.*, 1996; Orellana *et al.*, 2003). Las selvas tropicales húmedas que ahora caracterizan a la región sur de la PPY (El Petén) surgieron más tarde, durante el Holoceno medio-temprano en respuesta a condiciones más cálidas y húmedas (Metcalf *et al.*, 2000). Los cambios producidos durante el Pleistoceno tardío al Holoceno temprano-medio podrían haber provocado la reducción de las áreas adecuadas para las tres especies. Parece que durante este período la especie tuvo que adaptarse a los nuevos paisajes de la región sur del PPY. Es notable que, los cambios ambientales que ocurrieron durante el Pleistoceno tardío y el Holoceno medio temprano se consideran los principales impulsores de la divergencia de *P. yucatanicus* (León-Tapia, 2020).

Nuestro MNE bajo condiciones futuras indica que para las tres especies es probable que algunas áreas de hábitats adecuados sigan siéndolo bajo el cambio climático. Bajo estos escenarios, se sugiere que las áreas adecua-

das aumentarían debido a que el clima actual se desplaza hacia ambientes más secos. Nuestras proyecciones coinciden con las tendencias observadas en estudios anteriores para el bosque seco tropical en la Península de Yucatán. Se sugiere que las áreas cubiertas por bosque seco tropical aumentarán en un 3-10% durante 2050 debido a un aumento en el periodo de la estación seca (Prieto-Torres *et al.*, 2016). Asimismo, se ha reportado que en las últimas dos décadas en la PPY, y otras regiones neotropicales, han exhibido una disminución más pronunciada en las precipitaciones, más evidente en algunas áreas de la región de El Petén (Cuervo-Robayo *et al.*, 2020). Estas futuras condiciones de sequía podrían ser muy similares al entorno que experimentó la especie durante el Pleistoceno y que coincide con nuestros hallazgos de mayores áreas de idoneidad bajo la proyección del Pleistoceno.

En general, nuestros hallazgos podrían sugerir que las tres especies no serán susceptibles a cambios en el hábitat debido al cambio climático futuro. Sin embargo, no podemos descartar que otros procesos como las interacciones con factores bióticos estén configurando la distribución de esta especie. Es posible que no todas las especies endémicas puedan hacer frente a otros procesos relacionados con la modificación o alteración natural o antropogénica. La Península de Yucatán es una de las regiones dominadas principalmente por el bosque seco tropical, pero también tiene una larga historia de disturbios antropogénicos que comenzó con la civilización maya (100-900 CE) y con la posterior conquista española. En la actualidad, las políticas nacionales han promovido la modificación y deforestación de las selvas tropicales en su mayoría para uso agrícola y ganadero (Ellis *et al.*, 2017). Estos nuevos paisajes se han incrementado y sin embargo parece que no afectan la presencia de *P. yucatanicus*, y *H. gaumeri*, que podrían tener una mayor capacidad de adaptación a estos hábitats transformados (Sánchez-Cordero *et al.*, 2005). Sin embargo, este podría no ser el caso de *O. hatti*, cuyos aspectos básicos de su biología y ecología se desconocen.

## CONCLUSIÓN

Por último, nosotros concluimos que el nicho ecológico de *O. hatti* es estrecho, especializado y diferente al de *P. yucatanicus* o *H. gaumeri*,

que juntos ocupan un nicho similar y tienen una superposición sustancial en la distribución geográfica del hábitat adecuado. El nicho ecológico de *O. hattii* está asociado a sus hábitos arbóreos, y la constante deforestación / modificación en el PPY, que podría favorecer la pérdida de su diversidad genética y aumentar su riesgo de extinción (Ashrafzadeh *et al.*, 2019; Thomas *et al.*, 2012). Esta condición también se sugiere para *Campylorhynchus yucatanicus*, otro taxón endémico de la Península de Yucatán (Serrano-Rodríguez *et al.*, 2018). Es importante realizar estudios con enfoque genético de conservación para determinar el impacto de los grandes vacíos de hábitats inadecuados documentados para esta especie en la PPY. Este enfoque nos permitiría detectar los niveles de diversidad genética, endogamia y mutaciones que, junto con otros factores demográficos, ecológicos o estocásticos, podrían conducir a la pérdida de este roedor endémico. Asimismo, es importante realizar estudios sobre los efectos de la población humana en la diversidad de mamíferos endémicos de la PPY, que podrían ayudar a comprender cómo las perturbaciones antropogénicas pueden cambiar la distribución espacial de las especies y aumentar su riesgo de extinción. Muchas áreas del actual nicho ecológico potencial y estrecho de *O. hattii* no están bajo protección a pesar de ser una especie amenazada, por lo que nuestros resultados podrían ser utilizados como un elemento importante para reevaluar nuevas áreas de conservación para esta especie en toda su área de distribución.

## AGRADECIMIENTOS

Agradecemos enormemente a los revisores por sus útiles comentarios y sugerencias para mejorar este manuscrito. Agradecemos a Erendira Estrella por compartir los datos mastozoológicos de la Colección de la Universidad Autónoma de Yucatán.

## LITERATURA CITADA

Arroyo-Cabrales, J. y T. Alvarez. 2003. A preliminary report of the late Quaternary mammal fauna from Loltún Cave, Yucatán, México. *Ice age cave faunas of North America*, 262-272.

Ashrafzadeh, M.R., A.A. Naghipour, M. Haidarian, S. Kusza y D.S. Pilliod. 2019. Effects of

climate change on habitat and connectivity for populations of a vulnerable, endemic salamander in Iran. *Global Ecology and Conservation*, 19:e00637.

Barve N, V. Barve, A. Jiménez-Valverde, A. Lira-Noriega, S.P. Maher, A.T. Peterson, J. Soberón y F. Villalobos. 2011. The crucial role of the accessible area in ecological niche modeling and species distribution modeling. *Ecological Modelling*, 222:1810-1819.

Bellard C., C. Bertelsmeier, P. Leadley, W. Thuiller y F. Courchamp. 2012. Impacts of climate change on the future of biodiversity. *Ecological Letters*, 15:365-377.

Carmona-Castro, O., D.A. Moo-Llanes y J.M. Ramsey. 2018. Impact of climate change on vector transmission of *Trypanosoma cruzi* (Chagas 1909) in North America. *Medical and Veterinary Entomology*, 32:84-101.

Ceballos, G., J. Arroyo-Cabrales, R.A. Medellín e Y. Domínguez-Castellanos. 2005. Lista actualizada de los mamíferos de México. *Revista Mexicana de Mastozoología*, 9:21-71.

Ceballos, G. 2014. *Mammals of México*. John Hopkins University Press. Baltimore, Maryland.

Chablé-Santos, J.B., N.R. Van Wynsbergue, S.B. Canto-Lara, y F.J. Andrade-Narváez. 1995. Isolation of *Leishmania* (L.) *mexicana* from wild rodents and their possible role in the transmission of localized cutaneous leishmaniasis in the state of Campeche, Mexico. *The American Journal of Tropical Medicine and Hygiene*, 53:141-145.

Cimé-Pool, J.A, S.F. Hernández-Betancourt y J.B. Chablé-Santos. 2007. Comunidades de pequeños roedores en dos agroecosistemas de Yucatán, México. *Revista Mexicana de Mastozoología*, 11:57-68.

CONABIO (Comisión Nacional y Uso de la Biodiversidad). 2020. *Especies en riesgo en México-Biodiversidad Mexicana*. Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad. [http://www.biodiversidad.gob.mx/especies/especies\\_enriesgo/buscador\\_especies/espRiesgo.php](http://www.biodiversidad.gob.mx/especies/especies_enriesgo/buscador_especies/espRiesgo.php).

- Cuervo-Robayo, A.P., C. Ureta, M.A. Gómez-Albores, A.K. Meneses-Mosquera, O. Téllez-Valdés y E. Martínez-Meyer. 2020. One hundred years of climate change in Mexico. *PLoS One*, 15: e0209808. [doi.org/10.1371/journal.pone.0209808]
- Dawson, T.P., St. Jackson, J.I. House, I.C. Prentice y G.M. Mace. 2011. Beyond predictions: biodiversity conservation in a changing climate. *Science*, 332:53-58.
- Ellis, E.A., U.H. Gómez y J.A. Romero-Montero. 2017. Los procesos y causas del cambio en la cobertura forestal de la Península Yucatán, México. *Revista Ecosistemas*, 26:101-111.
- Fick, S.E., R.J. Hijmans, S.E. Cameron, J.L. Parra, P.G. Jones y A. Jarvis. 2017. WorldClim 2: new 1-km spatial resolution climate surfaces for global land areas. Very high resolution interpolated climate surfaces for global land areas. *International Journal of Climatology*, 37:4302-4315.
- García-Marmolejo, G., T. Escalante y J.J. Morrone. 2008. Establecimiento de prioridades para la conservación de mamíferos terrestres neotropicales de México. *Mastozoología Neotropical*, 15:41-65.
- Hasumi, H. y S. Emori. 2004. K-1 coupled model (MIROC) description, K-1 technical report, 1. Center for Climate System Research, University of Tokyo.
- Hernández-Betancourt, S., S. Medina-Peralta, J. Chablé-Santos, C.I. Selem-Salas, M.P. González-Pérez, B. Canseco, J. Góngora-Salinas. 2012. Small rodents' richness and abundance in two agroecosystems and a secondary dry forest (Acahual) in the Cuxtal Reserve, Yucatan, México. *Tropical and Subtropical Agroecosystems*, 15: 329-336.
- Hernández-Rivera, M.P., O. Hernandez-Montes, A. Chiñas-Perez, J.M. Batiza-Avelar, G. Sánchez-Tejada, C. Wong-Ramirez y A. Monroy-Ostria. 2015. Study of cutaneous leishmaniasis in the state of Campeche (Yucatan Peninsula), México over a period of two years. *Salud Pública de México*, 57:58-65.
- Hidasi-Nieto, J., D.C. Joner, F. Resende, L. de Macedo Monteiro, F.V. Faleiro, R.D. Loyola y M.V. Cianciaruso. 2019. Climate change will drive mammal species loss and biotic homogenization in the Cerrado Biodiversity Hotspot. *Perspectives in Ecology and Conservation*, 17:57-63.
- Ibarra-Cerdeña, C.N., L. Valient-Banuet, V. Sánchez-Cordero, C.R. Stephens y J.M. Ramsey. 2017. *Trypanosoma cruzi* reservoirs-triatomine vector co-occurrence networks reveal meta-community effects by synanthropic mammals on geographical dispersal. *Peer Journal*, 5:e3152.
- Ibarra-Manríquez, G., J.L. Villaseñor, R. Durán y J. Meave. 2002. Biogeographical analysis of the tree flora of the Yucatan Peninsula. *Journal of Biogeography*, 29:17-29.
- INEGI-Instituto Nacional de Estadística y Geografía. 2015. *Guía para la interpretación de cartografía. Uso de suelo y vegetación*. Escala 1:250,000 Serie 5. Instituto Nacional de Estadística y Geografía. México.
- IPCC-Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambio climático. 2013. Resumen para responsables de políticas, resumen técnico y preguntas frecuentes. 2013. ISBN: 978 92 9169 338 2.
- Isik, K. 2011. Rare and endemic species: Why are they prone to extinction? Turkish. *Journal of Botany*, 35:411-417.
- Islebe, G.A., H. Hooghiemstra, M. Brenner, J.H. Curtis y D. Hodell. 1996. A Holocene vegetation history from lowland Guatemala. *The Holocene*, 6:265-271.
- IUCN (International Union for Conservation of Nature). 2020. The IUCN Red List of Threatened Species 2020-3.
- Izeta, A., C.N. Ibarra-Cerdeña, D.A. Moo-Llanes y J.M. Ramsey. 2016. Geographical, landscape and host associations of *Trypanosoma cruzi* DTUs and lineages. *Parasites and Vectors*, 9:631.
- León-Tapía, M.A. 2020. DNA Barcoding and demographic history of *Peromyscus yucatanicus* (Rodentia: Cricetidae) endemic to the Yucatan Peninsula, Mexico. *Journal of Mammalian Evolution*. [doi.org/10.1007/s10914-020-09510-z]

- Loría-Cervera, E.N., E.I. Sosa-Bibiano, L.E. Villanueva-Lizama, N. Van Wynsbergue y S.B. Canto-Lara. 2013. Nitric oxide production by *Peromyscus yucatanicus* (Rodentia) infected with *Leishmania* (*Leishmania mexicana*). *Memorias do Instituto Oswaldo Cruz*, 108:172-177.
- MacSwiney, G.M.C., S. Hernández-Betancourt y A. Avila-Flores. 2009. *Otonyctomys hattii* (Rodentia: Cricetidae). *Mammalian Species*, 1-5.
- MacSwiney, G.M.C., S. Hernández-Betancourt, J.A. Panti-May y J.M. Pech-Canché. 2012. Ecología poblacional del ratón yucateco *Peromyscus yucatanicus* (Rodentia: Cricetidae) en las selvas de Quintana Roo, México. Pp. 237-246, en: *Estudios sobre la biología de roedores silvestres mexicanos*. (Cervantes, FA y C. Ballesteros-Barrera, eds.). Instituto de Biología (UNAM), Unidad Iztapalapa (Universidad Autónoma Metropolitana), México.
- Metcalf, S.E., S.I. O'Hara, M. Caballero y S.J. Davies. 2000. Records of late Pleistocene-Holocene climatic change in Mexico—a review. *Quaternary Science Reviews*, 19:699-721
- Moo-Llanes, D.A., C.N. Ibarra-Cerdeña, E.A. Rebollar-Téllez, S. Ibáñez-Bernal, C. González y J.M. Ramsey. 2013. Current and future niche of North and Central American sandflies (Diptera: Psychodidae) in climate change scenarios. *PLoS Neglected Tropical Disease*, 7:e2421.
- Moo-Llanes, D.A., A. Pech-May, A.C. Montes de Oca-Aguilar, O.D. Salomón y J.M. Ramsey. 2020. Niche divergence and paleo-distributions of *Lutzomyia longipalpis* mitochondrial haplogroups (Diptera: Psychodidae). *Acta Tropica*, 211:105607.
- Orellana, R, G. Islebe y C. Espadas. 2003. Presente, pasado y futuro de los climas de la península de Yucatán. Pp. 37-52, en: *Naturaleza y sociedad en el área maya, pasado, presente y futuro*. (Colunga-García Marín, P., A. Larqué-Saavedra, eds.). Academia Mexicana de Ciencias, México.
- Owens, H.L., L.P. Campbell, L.L. Dornak, E.E. Saupe y N. Barve. 2013. Constraints on interpretation of ecological niche model by limited environmental ranges on calibration areas. *Ecological Modelling*, 263:10-18.
- Panti-May, J.A, S. Hernández-Betancourt, H. Ruíz-Piña y S. Medina-Peralta. 2012. Abundance and population parameters of commensal rodents present in rural households in Yucatan, Mexico. *International Biodeterioration and Biodegradation*, 66:77-81.
- Panti-May, J.A., G.M.C. MacSwiney, S.F. Hernández-Betancourt y O.A. Valdes-Rodríguez. 2015. Reproduction and postnatal development in the Yucatán veper mouse. *Mammalia*, 79:169-176.
- Panti-May, J.A. 2011. *Pequeños roedores como huéspedes de Trypanosoma cruzi en viviendas de la localidad de molas, Yucatán, México*. Tesis para obtener el grado de Médico Veterinario Zootecnista. Campus de Ciencias Biológicas y Agropecuarias. Mérida, México, Universidad Autónoma de Yucatán Mérida.
- Parmesan, C. y G. Yohe. 2003. A globally coherent fingerprint of climate change impacts across natural systems. *Nature*, 421:37-42. pmid:12511946, [doi.org/10.1038/nature01286]
- Pech-May, A, D.A. Moo-Llanes, M.B. Puerto-Ávila, M. Casas-Martinez, R. Danis-Lozano, G. Ponce, E. Tun-Ku, J.F. Pinto-Castillo, A. Villegas, C. Ibáñez-Piñon, C. González y J.M. Ramsey. 2016b. Populations genetics and ecological niche of invasive *Aedes albopictus* in México. *Acta Tropica*, 157:30-41.
- Peterson, A.T. 2012. Niche modeling. Niche evaluation. *Biodiversity Informatics*, <https://doi.org/10.17161/bi.v8i1.4300>
- Peterson, A.T., M., Papes y J. Soberón. 2008. Rethinking receiver operating characteristic analysis applications in ecological niche modeling. *Ecological Modelling*, 213:63-72.
- Peterson, A.T., J. Soberón, R.G. Pearson, R.P. Anderson, E. Martinez-Meyer, M. Nakamura y M.B. Araújo. 2012. *Ecological niches and geographic distributions*. Princenton University Press. ISBN: 9780691136882.
- Phillips, S.J., R.P. Anderson, M. Dudik, R.E. Schapire y M.E. Blair. 2017. Opening e black

box: an open source release of MaxEnt. *Ecography*, 40:887-893.

Porcasi, X., G.E. Calderón, M. Lamfri, M. Scavuzzo, M.S. Sabbattini y J.J. Polop. 2005. Predictive distribution maps of rodent reservoir species of zoonoses in Southern America. *Mastozoología Neotropical*, 12:199-216.

Prieto-Torres, D.A., A.G. Navarro-Sigüenza, D. Santiago-Alarcón y O.R. Rojas-Soto. 2016. Response of the endangered tropical dry forests to climate change and the role of Mexican Protected Areas for their conservation. *Global Change Biology*, 22:364-379.

Ramírez-Bautista, A., J.H. Thorne, M.W. Schwartz y J.N. Williams. 2020. Trait-based climate vulnerability of native rodents in southwestern Mexico. *Ecology and Evolution*, 10:5864-5876.

Sánchez-Cordero, V., P. Illoldi-Rangel, M. Linaje, S. Sarkar y A.T. Peterson. 2005. Deforestation and extant distributions of Mexican endemic mammals. *Biological Conservation*, 126:465-473.

Serrano-Rodríguez, A., G. Escalona-Segura, E. Iñigo-Elias, A. Serrano-Rodríguez, J.M. Uriostegui y A.C. Montes de Oca-Aguilar. 2018. Potential distribution and climatic niche of seven species of *Campylorhynchus* (Aves, Troglodytidae): conservation implications for *C. yucatanicus*. *The Wilson Journal of Ornithology*, 130:13-22.

Stevens, B., M. Giorgetta, M. Escj, T. Mauritsen, T. Crueger y S. Rast. 2013. Atmospheric component of the MPI.M Earth system model: ECHAM6. *Journal of Advances in Modelling Earth System*, 5:1-27.

Thomas, C.D., A. Cameron, R.E. Green, M. Bakkenes, L.J. Beaumont, Y.C. Collingham, B. Erasmus, M. Ferreira, A. Graiger, L. Hannah, L. Huhges, B. Huntley, A. VanJaarsveld, G. Midgley, L. Miles, M.A. Ortega-Huerta, A.T. Peterson, O.L. Phillips y S.E. Williams. 2012. Extinction risk from climate change. *Nature*, 427:145-148.

Zaragoza-Quintana, E.P., J.M. Pech-Canché, J.E. Sosa-Escalante, S. Hernández-Betancourt, L.S. León-Paniagua y G.M.C. MacSwi-

ney. 2006. Small rodents in the Yucatan Peninsula: knowledge and perspectives in 114 years of research. *Therya*, 7:299-314.