



## Biogeografía

# Cambios en los patrones de endemismo de los mamíferos terrestres de México por el calentamiento global

## *Changes on patterns of endemism of the Mexican land mammals by global warming*

Óscar Aguado-Bautista\* y Tania Escalante

Museo de Zoología "Alfonso L. Herrera", Departamento de Biología Evolutiva, Facultad de Ciencias, Universidad Nacional Autónoma de México, Apartado postal 70-399, 04510 México, D. F., México

Recibido el 21 de abril de 2014; aceptado el 18 de noviembre de 2014

### Resumen

Existen algunos análisis acerca del impacto del cambio climático en la distribución de los mamíferos terrestres de México. Sin embargo, los impactos en las áreas de endemismo no han sido analizados. Por esto, el objetivo de este análisis fue determinar los efectos del cambio climático en los patrones de endemismo de los mamíferos de México, dado las diferencias climáticas entre 2 períodos, el presente (1961-1990) y el futuro (2080-2099). Para ello, se obtuvieron 405 modelos de distribución de especies de los mamíferos terrestres de México, aplicando un algoritmo de máxima entropía (MaxEnt), y haciendo una proyección futura bajo el escenario climático A2 de acuerdo a 3 modelos de circulación general. Posteriormente, se realizó un análisis de endemidad para identificar las áreas de endemismo y sus taxones endémicos. Se identificaron 23 áreas de endemismo en el presente, mientras que en las proyecciones futuras se obtuvieron de 14 a 16. Por último, se presenta una comparación entre los 2 periodos usando un análisis espacial y midiendo la vulnerabilidad de las áreas de endemismo con un factor relativo de vulnerabilidad. La pérdida de patrones de endemismo, el desplazamiento geográfico, la reducción de superficies y el cambio en la composición de especies de las áreas de endemismo, muestran el impacto negativo que puede provocar el calentamiento global en los patrones de endemismo.

Derechos Reservados © 2015 Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Biología. Este es un artículo de acceso abierto distribuido bajo los términos de la Licencia Creative Commons CC BY-NC-ND 4.0.

*Palabras clave:* Cambio climático; Análisis de endemidad; Biogeografía; Vulnerabilidad; Modelos de distribución de especies

### Abstract

There are some analyses about the impact of climatic change in the distribution of Mexican land mammals. However, this impact has not been analyzed on areas of endemism. For this reason, the aim of this analysis was to determine the climate change effects in the patterns of endemism of the mammals of Mexico, regarding the climatic differences between 2 time periods, present time (1961-1990) and future time (2080-2099). For this purpose, 405 species distribution models of the Mexican land mammals were obtained applying a maximum entropy algorithm (MaxEnt), and using their projections under climate scenario A2 according to 3 general circulation models. Later, an Endemicity Analysis was performed in order to identify areas of endemism and their endemic taxa. Twenty-three areas of endemism in the present time were identified, while 14-16 areas of endemism were identified for the future time. Finally, a comparison between present and future time is presented, using spatial analysis and measuring vulnerability of the areas of endemism with a relative vulnerability factor. Loss of patterns of endemism, geographic displacement, surfaces reduction and change in species composition of the areas of endemism show the negative impact that global warming may cause on the endemism patterns.

All Rights Reserved © 2015 Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Biología. This is an open access item distributed under the Creative Commons CC License BY-NC-ND 4.0.

*Keywords:* Climate change; Endemicity analysis; Biogeography; Vulnerability; Species distribution models

\* Autor para correspondencia.

Correo electrónico: [bounduflo@hotmail.com](mailto:bounduflo@hotmail.com) (Ó. Aguado-Bautista).

## Introducción

La confirmación del cambio climático como una de las principales amenazas para la diversidad biológica (Beever y Belant, 2012; Jarema, Samson, McGill y Humphries, 2009; Karsh y MacIver, 2010; Moritz et al., 2008; Rosenzweig et al., 2008; Thuiller et al., 2009), han hecho necesario implementar diversas medidas de adaptación y mitigación a nivel internacional y local desarrolladas a partir de diferentes análisis de vulnerabilidad con diferentes métodos (Cahill et al., 2012). En el caso de los mamíferos de México se desconocen muchas de las consecuencias del calentamiento global, pero existen algunos estudios sobre el tema (Martínez-Meyer, Calixto-Pérez y Arroyo-Lamber, 2011; Trejo et al., 2011) y la información que se tiene sobre su historia y biología indican que el fenómeno climático de las últimas décadas repercutirá en la distribución de los mamíferos en el país como se conoce hoy en día. Un cambio en la distribución de los taxones mastofaunísticos sugiere modificaciones conductuales, microevolutivas y adaptativas, que muchas veces no se pueden analizar por el desconocimiento de diferentes aspectos de la biología de los mamíferos, pero se pueden analizar los patrones biogeográficos, los cuales se han considerado como evidencia de la historia evolutiva de las especies (Morrone, 2009). Por lo cual, el objetivo de este estudio es analizar los patrones de endemidadad de los mamíferos terrestres de México en el marco de un calentamiento global como consecuencia de las actividades humanas.

## Materiales y métodos

### Área de estudio y datos

El estudio fue limitado a México, en donde se han registrado 550 especies de mamíferos (Ceballos y Arroyo-Cabrales, 2012), de las cuales solo 405 especies (74% del total, pertenecientes a 12 órdenes) fueron empleadas en este estudio, dada su estabilidad taxonómica y su implemento frecuente en otros estudios biogeográficos (Escalante, Morrone y Rodríguez-Tapia, 2013). El total de registros suma 78,478, con un promedio de 194 registros por especie, los cuales fueron obtenidos del Atlas biogeográfico de los mamíferos terrestres de América del Norte (<http://atlasbiogeografico.com/>; Escalante, 2013; Escalante y Rodríguez-Tapia, 2011). Se trató de utilizar las especies con mayor número de registros, para obtener modelos de distribución más robustos, pero lamentablemente se reduciría la representatividad de la mastofauna presente en México a un 30% (163 especies con 100 o más registros). Para evitar errores en las georreferencias, los datos se revisaron espacialmente en ArcGIS 9.3 (ESRI, 2008) y se consultaron 405 fichas de especies de la International Union for Conservation of Nature (IUCN, 2013) y 47 de *Mammalian Species* (ASM, 2013; Apéndice 1, véase versión digital), mientras que para la nomenclatura se siguieron los trabajos de Ceballos, Arroyo-Cabrales, Medellín y Domínguez-Castellanos (2005); Ceballos y Arroyo-Cabrales (2012); Ramírez-Pulido, Arroyo-Cabrales y Castro-Campillo (2005) y Redondo, Brina, Silva, Ditchfield y Santos (2008). Las 21 capas

bioclimáticas (se incluyen el índice de aridez anual y de verano, derivados de las otras capas) a una resolución de 30 segundos de arco se obtuvieron del Moscow Forestry Sciences Laboratory (MFSL, 2012; ver URL <http://forest.moscowfsl.wsu.edu/climate/>) tanto para la línea base que corresponde al periodo 1961-1990 como para el horizonte 2090. El escenario socioeconómico seleccionado fue el A2, debido a que sus estimaciones se asemejan a las tendencias socioeconómicas del presente, con un crecimiento y desarrollo desigual entre regiones, altas tasas de crecimiento poblacional y uso de combustibles fósiles; y estima un aumento promedio en la temperatura de 3.9 para el 2090-2099 (Rogelj, Meinshausen y Knutti, 2012). El A2 propone algo muy similar que el RCP 8.5, el cual es uno de los nuevos escenarios presentados en el quinto informe de evaluación del panel intergubernamental sobre cambio climático (IPCC, por sus siglas en inglés), en 2013. En ambos escenarios pesimistas la capacidad de adaptación y mitigación es baja, lo que ocasiona altos costos en la adaptación en un futuro cercano (Van Vuuren et al., 2012). Los modelos de circulación elegidos fueron 3, dado las ventajas y desventajas decada uno: CGCM3, versión T63, cuya resolución de 2.8° latitud /longitud ayuda a modelar con mejor precisión el clima en zonas tropicales (CCCMA, 2014); GFDLCM21, el cual mejora el modelado de fenómenos tropicales como el niño (ENSO; Delworth et al., 2006); HADCM3, debido a que tiene el mejor desempeño para México, aunque la mejor resolución se obtiene con GFDLCM21, de acuerdo con la comparación realizada por Conde, Estrada, Martínez, Sánchez y Gay (2011), donde se prueba el desempeño para México de 21 modelos utilizados en el cuarto informe del IPCC.

### Modelos de distribución de especies (MDE)

Se utilizó el programa MaxEnt v3.3.3k (Phillips, Anderson y Schapire, 2006) para elaborar los modelos de distribución de 405 especies. Previó al modelado en MaxEnt se empleó el factor de inflación de la varianza (FIV) en el programa SPSS, versión 20, para conocer la relación entre las 21 variables ambientales y, de ser necesario, eliminar algunas para reducir la colinealidad en cada modelo. La calibración de MaxEnt utilizada fue la establecida por defecto, la regla de corte elegida fue "igual sensibilidad y especificidad del entrenamiento" (Bean, Stafford y Brashares, 2012; Liu, Berry, Dawson y Pearson, 2005); el multiplicador de regularización utilizado fue de 1 para muestras pequeñas (<100) y de 1.5 para muestras mayores (Anderson y González Jr., 2011); 40 réplicas para cada especie. En todos los casos, se utilizó la técnica bootstrapping para las réplicas (Phillips y Dudík, 2008) y, de esta forma, se pudieron validar los conjuntos de pocos datos (Pearson, Raxworthy, Nakamura y Peterson, 2007; Yáñez-Arenas, Mandujano, Martínez-Meyer, Pérez-Arteaga y González-Zamora, 2012). El porcentaje de datos para la validación del modelo fue 25% de los registros de cada especie. La evaluación del modelo se realizó mediante el área bajo la curva (AUC; Fielding y Bell, 1997; Longoria, 2008; Phillips et al., 2006; Phillips y Dudík, 2008). Los modelos fueron rechazados si el valor de AUC fue menor a 0.7 (un valor de 0.5 indica que el modelo propuesto es igual que el azar; Phillips y Dudík, 2008). La contribución de cada una de las variables se

midió por medio de la prueba de Jackknife (Phillips et al., 2006). Para el caso de los modelos en el tiempo presente o línea base, estos fueron limitados geográficamente (Downer, 2009; Elith et al., 2011; Soberón, 2010) con las provincias fisiográficas y en algunos casos con las cuencas hidrológicas o las cotas altitudinales, capas obtenidas a partir del Continuo de Elevación Mexicano 3.0 del Inegi (2013; ver URL <http://www.inegi.org.mx/geo/contenidos/datosrelieve/continental/continuoelevaciones.aspx>), de las provincias fisiográficas del Inegi (2001) y del Atlas ambiental de América del Norte de la Comisión para la cooperación ambiental, CCA (2006; <http://www.cec.org/Page.asp?PageID=122&ContentID=2336>). Para aplicar esta delimitación geográfica a los modelos de distribución en el presente de cada especie, se consultaron las fuentes de información antes mencionadas en el área de estudio y datos, así como los trabajos de Alexander y Riddle (2005); Ascorra, Wilson y Gardner (1991); Dawson (2005); Jezkova, Jaeger, Marshall y Riddle (2009); León-Paniagua, Navarro-Sigüenza, Hernández-Baños y Morales (2007); Woodman (2005) y Woodman y Timm (1999). En el caso de las proyecciones futuras (horizonte 2090) de cada distribución de las especies, se consideró como parte de la distribución potencial las superficies contraídas o expandidas, que se encontraban adyacentes o dentro de las superficies obtenidas en el presente.

*Análisis de endemidad*

Los MDE obtenidos se unieron en conjuntos de 33 especies y se interseccionaron con la grilla de 1° x 1° previamente etiquetada de acuerdo con Szumik, Casagrande y Roig (2006). La tabla de atributos de esta última capa se editó en una hoja de cálculo (.ods). La edición consistió en la elaboración de una tabla dinámica, donde las columnas fueron las presencias y ausencias de los MDE y las filas las celdas de la grilla. Posteriormente, la tabla se exportó en un editor de texto, donde se editó y guardó

conforme a lo establecido por Szumik et al. (2006). Con el software NDM/VNDM, versión 3.0 (Goloboff, 2012; <http://www.lillo.org.ar/phylogeny/endemism/>) se identificaron las áreas de endemismo y se obtuvo el valor de endemidad de cada especie y a partir de dicho valor, se calculó el índice de endemidad del área (IE), en donde la regla utilizada fue que el área de endemismo estuviera formada por la simpatria parcial de las distribuciones de al menos 2 taxones (Szumik et al., 2006). Para el análisis se utilizaron los parámetros por defecto de NDM/VNDM y solo se modificó el porcentaje de especies únicas para retener áreas superpuestas con un 98%, una semilla aleatoria de 362 (celda escogida al azar dentro de la grilla donde inicia el análisis el programa) y un porcentaje mínimo de ajuste de la distribución de cada especie al área endémica de 0.2, con la finalidad de evaluar los posibles cambios en los patrones de endemismo (ver Apéndice 2, véase versión digital). Posteriormente, se realizaron consensos entre áreas con 25% de similaridad de especies para evitar la sobrerrepresentación y ambigüedad (Escalante, Szumik y Morrone, 2009). Lo anterior se realizó para la línea base y los 3 escenarios futuros, con la finalidad de observar las diferentes tendencias que pudieran presentarse de acuerdo con cada uno de los escenarios climáticos empleados. Por último, las áreas de endemismo obtenidas se validaron con las propuestas en otros estudios acerca de patrones de endemismo y provincias biogeográficas sustentadas en los endemismos (Escalante et al., 2009; Escalante et al., 2013; Gámez, Escalante, Rodríguez, Linaje y Morrone, 2012; Morrone, 2001), así como la nomenclatura de las áreas de endemismo utilizados en la tabla 1, estuvo de acuerdo con el principio de prioridad taxonómico (Ramírez-Pulido y Castro-Campillo, 1992), mientras que los acrónimos empleados para cada una de las áreas, se obtuvieron de las primeras 3 letras de cada palabra del nombre compuesto por 1 o 2 palabras y solo las iniciales del nombre para más de 3 palabras.

Tabla 1  
Áreas de endemismo obtenidas en este estudio, con sus respectivos índices de endemidad (IE) y sus especies endémicas. Además, se muestran los valores de endemidad de cada especie en el presente y en el futuro

Área de Endemismo	Abreviación	IE	Especies	Valor para cada especie.		
				Presente	Futuro	
				CGCM3	GFDLCM21	HADCM3
Altiplano Mexicano	Altmex	2.2	<i>Bison</i>	0.6		0.8
			<i>Cynomys ludovicianus</i>			0.6
			<i>Geomys arenarius</i>	0.8		0.9
			<i>Perognathus flavescens</i>	0.8		
California	Cal	7.3	<i>Chaetodipus californicus</i>	1.0		0.8
			<i>Chaetodipus fallax</i>	0.7	0.9	1.0
			<i>Microtus californicus</i>	0.9	0.8	0.7
			<i>Neotoma macrotis</i>	1.0	0.7	0.8
			<i>Peromyscus californicus</i>	0.9	0.9	0.9
			<i>Scapanus latimus</i>	0.9	0.9	0.7
			<i>Sciurus griseus</i>	0.9	0.7	0.6
			<i>Sorex ornatus</i>	1.0	0.9	0.9
			<i>Spermophilus beecheyi</i>	0.7	1.0	1.0
			Chiapas	Chi	2.5	<i>Alouatta pigra</i>
<i>Chironectes minimus</i>	0.8	0.3				
<i>Peromyscus zarhynchus</i>	0.8	0.9				0.6
<i>Peropteryx kappleri</i>		0.7				
<i>Phylloderma stenops</i>						0.7
<i>Sorex stizodon</i>	0.8					
Distrito Este	Disest	2.3	<i>Tylomys tumbalensis</i>	0.9	0.8	0.8
			<i>Cratogeomys merriami</i>		0.7	1.0
			<i>Neotomodon alstoni</i>		0.8	0.9

(Continúa)

Tabla 1  
Áreas de endemismo obtenidas en este estudio, con sus respectivos índices de endemidad (IE) y sus especies endémicas. Además, se muestran los valores de endemidad de cada especie en el presente y en el futuro (Cont.)

Área de Endemismo	Abreviación	IE	Especies	Valor para cada especie. Presente	Futuro		
					CGCM3	GFDLCM21	HADCM3
Distrito Este (cont.)	Disest	2.3	<i>Peromyscus bullatus</i>	1.0	1.0	0.8	0.7
			<i>Peromyscus furvus</i>		0.4		
			<i>Romerolagus diazi</i>	0.5	0.8	0.8	0.8
			<i>Sorex oreopolus</i>		0.8	0.8	0.8
			<i>Sorex ventralis</i>			1.0	
Faja Volcánica Transmexicana FVTM		3.3	<i>Xerospermophilus perotensis</i>	0.8	0.8		
			<i>Cratogeomys fumosus</i>		0.8	0.5	0.7
			<i>Cryptotis alticola</i>	0.9	0.7	0.8	0.7
			<i>Cryptotis parva</i>			0.7	
			<i>Neotomodon alstoni</i>	0.8			
			<i>Reithrodontomys chrysopsis</i>	0.8	0.7	0.7	0.8
			<i>Sorex oreopolus</i>	0.8			
			<i>Sorex saussurei</i>		0.7	0.7	0.9
Golfo de México	Golmex	2.5	<i>Spermophilus adocetus</i>			0.2	
			<i>Balantiopteryx io</i>				0.8
			<i>Carollia sowelli</i>				0.8
			<i>Didelphis marsupialis</i>				0.9
			<i>Eptesicus brasiliensis</i>				0.6
			<i>Marmosa mexicana</i>				0.9
			<i>Myotis albescens</i>				0.7
			<i>Myotis keaysi</i>		0.7		
			<i>Oryzomys alfaroi</i>	0.8	0.8		0.8
			<i>Peromyscus beatae</i>				0.7
			<i>Peromyscus mexicanus</i>	0.8	0.8		0.6
			<i>Philander opossum</i>				0.9
			<i>Platyrrhinus helleri</i>				0.9
			<i>Sylvilagus brasiliensis</i>	0.9			0.9
Mohave	Moh	2.7	<i>Chaetodipus formosus</i>		0.7		
			<i>Eumops perotis</i>	0.7			
			<i>Perognathus longimembris</i>	1.0	0.6		
			<i>Peromyscus crinitus</i>	0.9	0.9		
Neártica Oeste	Neaoes	2.8	<i>Antrozous pallidus</i>		0.9		
			<i>Dipodomys merriami</i>		0.9	1.0	
			<i>Lepus californicus</i>	0.9	0.8	0.9	
			<i>Lynx rufus</i>		0.8		
			<i>Sylvilagus audubonii</i>	1.0	0.8	0.8	
Neotropical	Neo	3.7	<i>Taxidea taxus</i>	0.8			
			<i>Chiroderma villosum</i>				0.9
			<i>Eptesicus furinalis</i>	0.7		0.9	
			<i>Micronycteris microtis</i>	1.0			1.0
			<i>Myotis nigricans</i>	0.9		0.9	
			<i>Oligoryzomys fulvescens</i>			0.9	
			<i>Potos flavus</i>	0.9			
Neotropical Amplia	Neoamp	6.5	<i>Tamandua mexicana</i>	1.0			0.8
			<i>Artibeus jamaicensis</i>	0.9	0.9	0.9	0.9
			<i>Artibeus lituratus</i>	0.9	0.9	0.8	0.9
			<i>Centurio senex</i>	0.9			
			<i>Glossophaga soricina</i>	0.6	1.0	0.5	0.9
			<i>Leopardus wiedii</i>	0.9			
			<i>Molossus rufus</i>			0.8	
			<i>Panthera onca</i>	0.9		0.3	
			<i>Pteronotus davyi</i>		0.7		
			<i>Pteronotus parnelli</i>		1.0	0.9	0.9
			<i>Pteronotus personatus</i>	0.6			
			<i>Puma yaguarondi</i>	0.8			
			<i>Sturnira lilium</i>			0.9	0.9
Neotropical Pacífico Central	NPC	3.2	<i>Baiomys musculus</i>	0.9	0.7	0.9	0.9
			<i>Carollia subrufa</i>	0.8	0.8	0.8	
			<i>Hylonycteris underwoodi</i>	0.8	0.8	0.6	
			<i>Glossophaga morenoi</i>		0.9		
			<i>Orthogeomys grandis</i>	0.7			0.9
			<i>Enchisthenes hartii</i>		0.7	0.6	0.7
			<i>Nyctomys sumichrasti</i>			0.9	
			<i>Bassariscus sumichrasti</i>				0.9
			<i>Phyllostomus discolor</i>				0.9
Oaxaca-Tehuacanense	Oaxteh	6.8	<i>Centronycteris centralis</i>		0.7		0.7
			<i>Cryptotis alticola</i>	0.8			
			<i>Cryptotis magna</i>		0.8	0.9	0.7
			<i>Cryptotis mexicana</i>		0.7	0.6	0.6
			<i>Cryptotis phillipsii</i>	0.7			
			<i>Diaemus youngi</i>			0.6	0.8

Tabla 1

Áreas de endemismo obtenidas en este estudio, con sus respectivos índices de endemidad (IE) y sus especies endémicas. Además, se muestran los valores de endemidad de cada especie en el presente y en el futuro (Cont.)

Área de Endemismo	Abreviación	IE	Especies	Valor para cada especie. Presente	Futuro		
					CGCM3	GFDLCM21	HADCM3
Oaxaca-Tehuacanense (cont.)	Oaxteh	6.8	<i>Habromys ixtlani</i>	0.6	0.7	0.7	0.6
			<i>Habromys lepturus</i>	0.6	0.7	0.7	0.6
			<i>Megadontomys cryophilus</i>	0.5	0.6	0.6	0.9
			<i>Microtus oaxacensis</i>	0.5	1.0	1.0	1.0
			<i>Microtus umbrosus</i>	0.7		0.7	
			<i>Myotis albescens</i>			0.7	
			<i>Oryzomys chapmani</i>				0.7
			<i>Peromyscus melanocarpus</i>	0.8	1.0	1.0	1.0
			<i>Peromyscus melanurus</i>	0.8		0.4	
			<i>Rheomys mexicanus</i>		0.6	0.7	0.5
Pacífico	Pac	2.7	<i>Liomys pictus</i>	0.9			
			<i>Macrotus waterhousii</i>	0.9			
			<i>Rhogeessa parvula</i>	0.9			
Pacífico Centro	Paccen	2.6	<i>Megasorex gigas</i>			0.9	
			<i>Oryzomys melanotis</i>	0.7	0.7	0.7	0.9
			<i>Osgoodomys banderanus</i>		0.7	0.9	
			<i>Pappogeomys bulleri</i>	1.0	0.9		
			<i>Peromyscus perfulvus</i>		0.8		
			<i>Sigmodon alleni</i>	0.9	0.8	0.8	0.9
			<i>Spermophilus annulatus</i>				0.7
Pacífico Norte	Pacnor	3.7	<i>Sylvilagus cunicularius</i>			0.5	
			<i>Chaetodipus artus</i>	0.8			0.9
			<i>Chaetodipus goldmani</i>	0.6	0.9		
			<i>Chaetodipus pernix</i>	0.7			
			<i>Neotoma phenax</i>		0.9		0.8
			<i>Reithrodontomys burti</i>		0.8		
Península de Baja California	PBC	2.4	<i>Chaetodipus arenarius</i>	0.9			
			<i>Chaetodipus rudinoris</i>	0.6	1.0	0.3	0.9
			<i>Dipodomys simulans</i>			0.9	0.9
			<i>Eumops perotis</i>				0.9
			<i>Peromyscus eva</i>	0.9	0.9	0.7	0.9
			<i>Peromyscus fraterculus</i>			0.9	0.9
			<i>Sylvilagus bachmani</i>		0.9	0.6	0.9
			<i>Cryptotis mayensis</i>	0.9			0.8
Península de Yucatán	Penyuc	4.5	<i>Heteromys gaumeri</i>	0.6			
			<i>Mazama pandora</i>	0.9			
			<i>Otonyctomys hatti</i>	1.0			0.9
			<i>Peromyscus yucatanicus</i>	0.9			
			<i>Rhogeessa aeneus</i>	0.8			0.6
			<i>Microtus quasiater</i>	1.0			
Sierra Madre Oriental	SMO	3.0	<i>Oryzomys chapmani</i>	0.9			
			<i>Peromyscus furvus</i>	1.0			
			<i>Sorex macrodon</i>	0.9			
			<i>Cynomys mexicanus</i>	0.8			
Sierra Madre Oriental Norte	SMON	3.1	<i>Myotis planiceps</i>	0.8			
			<i>Sciurus alleni</i>	0.8			
			<i>Sorex milleri</i>	0.8			
			<i>Cryptotis tropicalis</i>	1.0	0.9	0.9	0.7
Soconusco	Soc	3.7	<i>Habromys lophurus</i>		0.9	0.9	0.7
			<i>Heteromys nelsoni</i>		0.7	1.0	0.6
			<i>Macrophyllum</i>				0.8
			<i>Microtus guatemalensis</i>	0.6	0.7	0.8	0.9
			<i>Peromyscus guatemalensis</i>	1.0	1.0	0.9	0.8
			<i>Peromyscus gymnotis</i>	0.4	0.2	0.5	
			<i>Reithrodontomys tenuirostris</i>	0.7	0.7	0.8	0.7
			<i>Chrotopterus auritus</i>				0.3
			<i>Cryptotis merriami</i>	0.8	0.9	0.9	0.8
			<i>Habromys lophurus</i>	0.8			
Tierras Altas de América Central	TAAC	3.1	<i>Liomys salvini</i>	0.6	0.8	0.9	0.8
			<i>Noctilio albiventris</i>		0.8	0.8	0.8
			<i>Sciurus variegatoides</i>		0.9	0.9	0.7
			<i>Scotinomys teguina</i>	0.8	0.6	0.6	0.7
			<i>Corynorhinus mexicanus</i>	0.9		0.9	0.8
			<i>Dipodomys phillipsii</i>				0.7
			<i>Liomys irroratus</i>				0.7
Zona de Transición Mexicana	ZTM	2.7	<i>Peromyscus difficilis</i>	0.9			0.7
			<i>Peromyscus melanotis</i>			0.8	
			<i>Sigmodon leucotis</i>	0.9		0.8	0.7
			<i>Conepatus leuconotus</i>	0.7			
			<i>Mephitis macroura</i>	0.9			
			<i>Myotis velifer</i>	0.9			
Zona de Transición Mexicana Amplia	ZTMA	2.5					



### Tendencias futuras y vulnerabilidad en los patrones de endemismo

Para observar los posibles cambios en los patrones de endemismo en los diferentes escenarios se utilizó ArcGIS 9.3 (ESRI, 2008) para superponer las áreas de endemismo correspondientes al presente y futuro, y visualizar las modificaciones en las superficies de las áreas de endemismo para el 2090, debidas al cambio climático. Antes de analizar los resultados en el sistema de información geográfica, se importaron los datos en forma vectorial y, posteriormente se transformaron a "raster" para conocer el número de píxeles y, a partir de ellos, se calcularon los porcentajes de superficie de cada área de endemismo tanto para el presente como para el futuro. Las diferencias entre la longitud y la latitud se obtuvieron mediante el análisis del desplazamiento del centroide de las áreas con la herramienta direccional de ArcGIS. Por último, la vulnerabilidad de las áreas se calculó con el factor de vulnerabilidad (FV) modificado a partir de Balica, Wright y Van der Meulen (2012), el cual se obtiene de acuerdo con:

$$FV = (SppS + Spp) / SppR$$

donde: SppS son las especies que son más susceptibles al cambio climático o especies que solo se presentan en el presente y se pierden en el futuro; Spp son las especies totales del presente; y SppR las especies resistentes al cambio climático o especies del presente que prevalecen en el futuro. El FV se interpretó en forma relativa de acuerdo con el valor más alto obtenido dentro de las diferentes áreas de endemismo. Para explicar parte de la vulnerabilidad de las áreas de endemismo se obtuvieron las temperaturas medias y precipitaciones anuales observadas en el presente y esperadas en el futuro, a partir de la superposición de las áreas con las superficies climáticas.

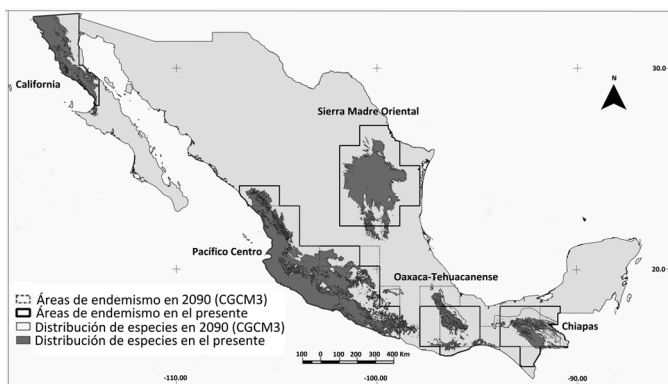


Figura 1. En el mapa se muestran 5 áreas de endemismo obtenidas al realizar el análisis de endemismo para el presente y el futuro (CGCM3). En el caso de la Sierra Madre Oriental (SMO) solo se obtuvo en la línea base. Aunque las formas de las superficies pueden variar entre los 3 modelos de circulación general, los resultados fueron muy similares en cuanto a los efectos del cambio climático: desplazamiento de las áreas de endemismo, cambios en la composición biológica de cada área y pérdidas de áreas en el futuro.

### Resultados

Se obtuvieron 405 modelos para cada escenario, incluyendo la línea base, correspondientes a cada una de las especies, en total 1,620 modelos. En los MDE se observó una tendencia a la disminución de la superficie de su distribución, pero en algunas especies la respuesta fue diferenciada según el modelo de circulación general utilizado; por ejemplo, *Ammospermophilus interpres*, *Corynorhinus townsendii*, *Eumops glaucinus* y *Dipodomys phillipsi* perderían la totalidad de su superficie actual de ocurrir lo propuesto en el escenario A2 con el modelo CGCM3, pero solo se reducirían sus superficies con los otros 2 modelos. Aún con las diferencias cualitativas observadas entre los diferentes modelos de circulación general, la mayoría de las distribuciones de las especies (58%) siguen una tendencia a incrementar su superficie al norte para el horizonte 2090.

### Análisis de endemismo

Se obtuvieron 23 áreas de endemismo para el presente, mientras que en las proyecciones para el futuro se recuperaron 15 con CGCM3, 14 con GFDLCM y 16 con HADCM3. Las áreas de endemismo y su composición de especies se presentan en la tabla 1, junto con el índice de endemismo (IE) y el puntaje de contribución de cada especie al IE, para cada uno de los escenarios. Algunos ejemplos cartográficos se muestran en la figura 1.

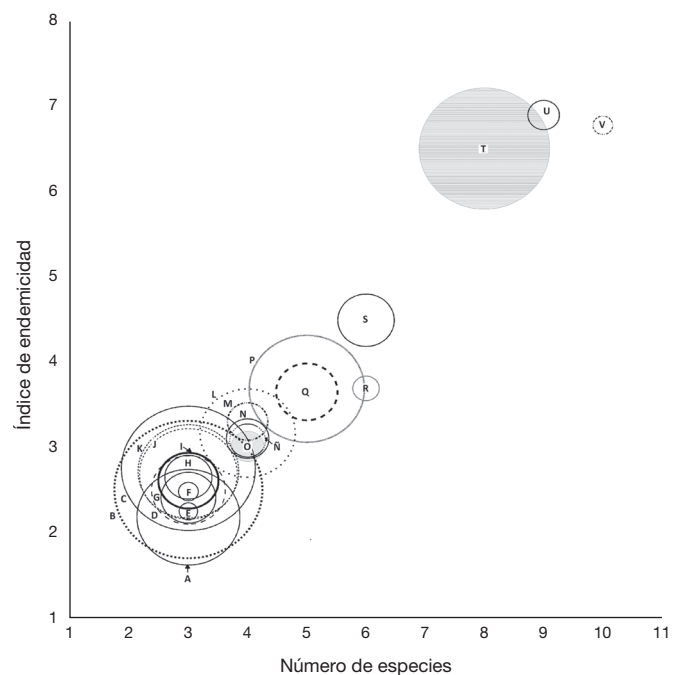


Figura 2. Relación entre el número de especies que componen las áreas de endemismo y su índice de endemismo. El tamaño de las burbujas indica el porcentaje de superficie terrestre que ocupa el área. A) Altiplano Mexicano; B) Zona de Transición Mexicana Amplia; C) Neártica Oeste; D) Golfo de México; E) Distrito Este; F) Chiapas; G) Península de Baja California; H) Mohave; I) Pacifico Centro; J) Pacifico; K) Zona de Transición Mexicana; L) Neotropical Pacifico Central; M) Faja Volcánica Transmexicana; N) Sierra Madre Oriental Norte; Ñ) Tierras Altas de América Central; O) Sierra Madre Oriental; P) Neotropical; Q) Pacifico Norte; R) Soconusco; S) Península de Yucatán; T) Neotropical Amplia; U) California; V) Oaxaca-Tehuacanense.

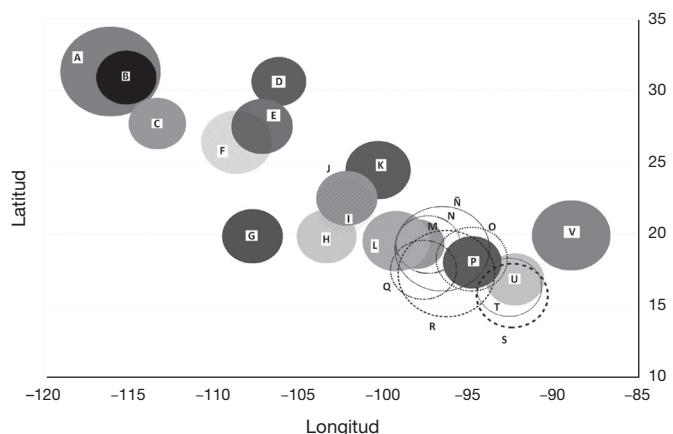


Figura 3. Distribución en la longitud y la latitud de los índices de endemismo en las áreas de endemismo del presente. El tamaño de las burbujas representa la magnitud del índice de endemismo, donde el mayor corresponde a California con 7.3. A) California; B) Mohave; C) Península de Yucatán; D) Altiplano Mexicano; E) Neártica Oeste; F) Pacífico Norte; G) Pacífico; H) Pacífico Centro; I) Zona de Transición Mexicana Amplia; J) Zona de Transición Mexicana; K) Sierra Madre Oriental Norte; L) Faja Volcánica Transmexicana; M) Distrito Este; N) Sierra Madre Oriental; Ñ) Neotropical Amplia; O) Neotropical; P) Golfo de México; Q) Neotropical Pacífico Central; R) Oaxaca-Tehuacanense; S) Soconusco; T) Tierras Altas de América Central; U) Chiapas; V) Península de Yucatán.

Se observó que de las 23 áreas de endemismo para el presente, California (Cal) tiene la mayor riqueza de especies y el índice de endemismo más alto (7.3), pero los porcentajes de superficie respecto al tamaño del país (2.1%) es de los más pequeños. Por otra parte, la Zona de Transición Mexicana (ZTM), la Península de Baja California (PBC), la Sierra Madre Oriental Norte

(SMON), el Altiplano Mexicano (Altmex), el Pacífico (Pac) y la Zona de Transición Mexicana Amplia (ZTMA) fueron las que tuvieron la menor riqueza de especies. El área de mayor tamaño fue la ZTMA que cubre 47.1% del territorio nacional, seguida de Neártica Oeste (Neaoes) con 38.5%. Lo anterior indica que no existe una tendencia entre el tamaño y el IE, pero sí una relación entre el IE y el número de especies (fig. 2). Por otra parte, los IE más altos tienen una cierta tendencia a localizarse en las 2 partes extremas del país en términos de la latitud. En el norte, Cal (-116.09, 31.35) es la que tiene la mayor riqueza y el IE más alto, mientras que en el sur Oaxaca-Tehuacanense (Oaxteh) (-96.35, 17.26) y Neotropical Amplia (Neoamp) (-96.59, 18.99) son las que tienen la mayor cantidad de endemismos (fig. 3). Al comparar el escenario presente con los de cambio climático, se puede observar que bajo el escenario CGCM3 únicamente el 65% de las áreas de endemismo actuales está representado, mientras que en GFDLCM21 es el 60% y para HADCM3 el 69%, lo que hace a este último el menos severo en cambios en cuanto al número de áreas de endemismo. La permanencia de algunas áreas de endemismo indica cierta estabilidad y pocos efectos del cambio climático sobre estas, pero al considerar el IE y la composición, así como su transformación en tamaño y posición, la situación es distinta. Por tanto, de acuerdo con las ganancias o pérdidas en superficie, se encontró que de las 23 áreas del presente, solo 10 de ellas presentan ganancias en el porcentaje de superficie, en al menos un escenario. Dichos porcentajes oscilan entre 0.6 a 32% en CGCM3, del 4 al 32% en GFDLCM21 y del 5 al 31% en HADCM3. Por otra parte, las pérdidas van desde 4% en Neotropical (Neo) (HADCM3) hasta un 99% en Altmex (GFDLCM21; fig. 4). En cuanto a las tendencias de los cambios

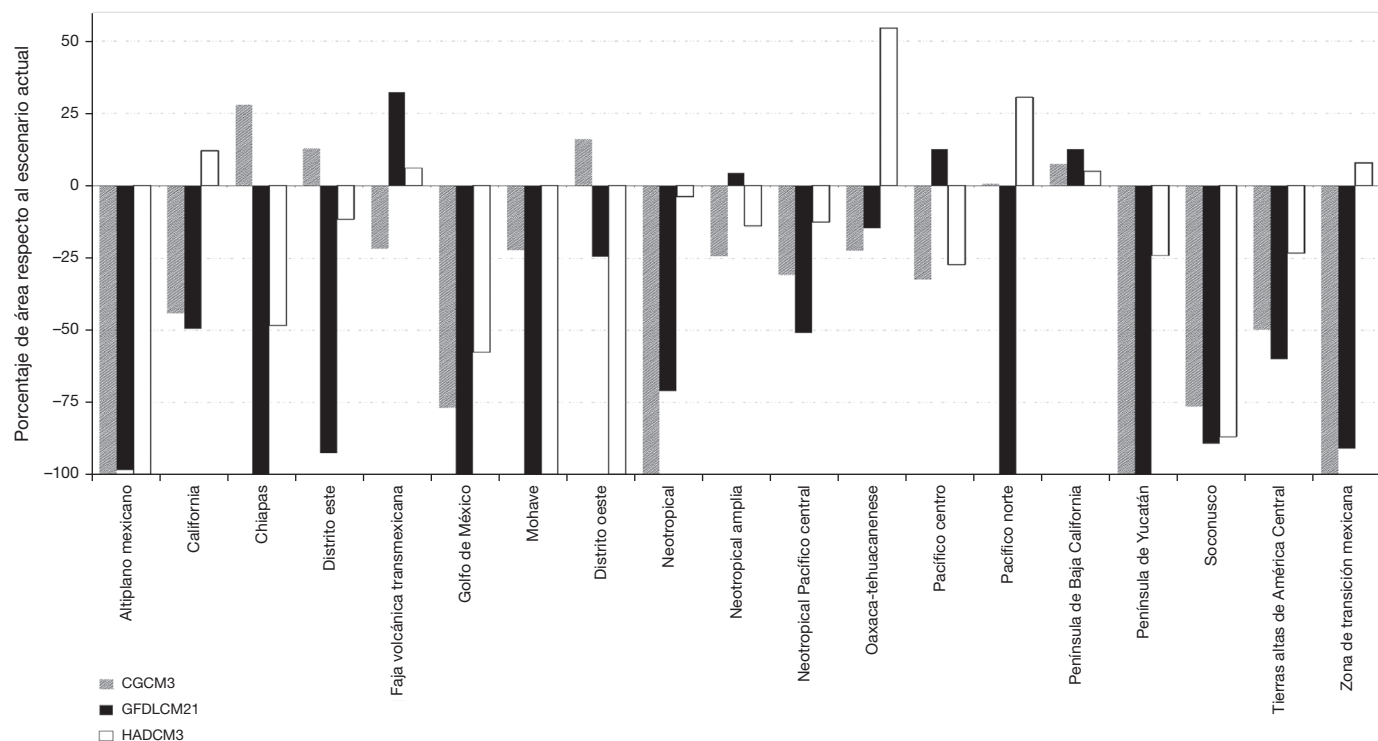


Figura 4. Las ganancias y pérdidas de superficie de las áreas de endemismo expresadas en porcentaje, para cada uno de los escenarios futuros. Solo se presentan las 19 áreas del presente que se obtuvieron en al menos un escenario futuro.

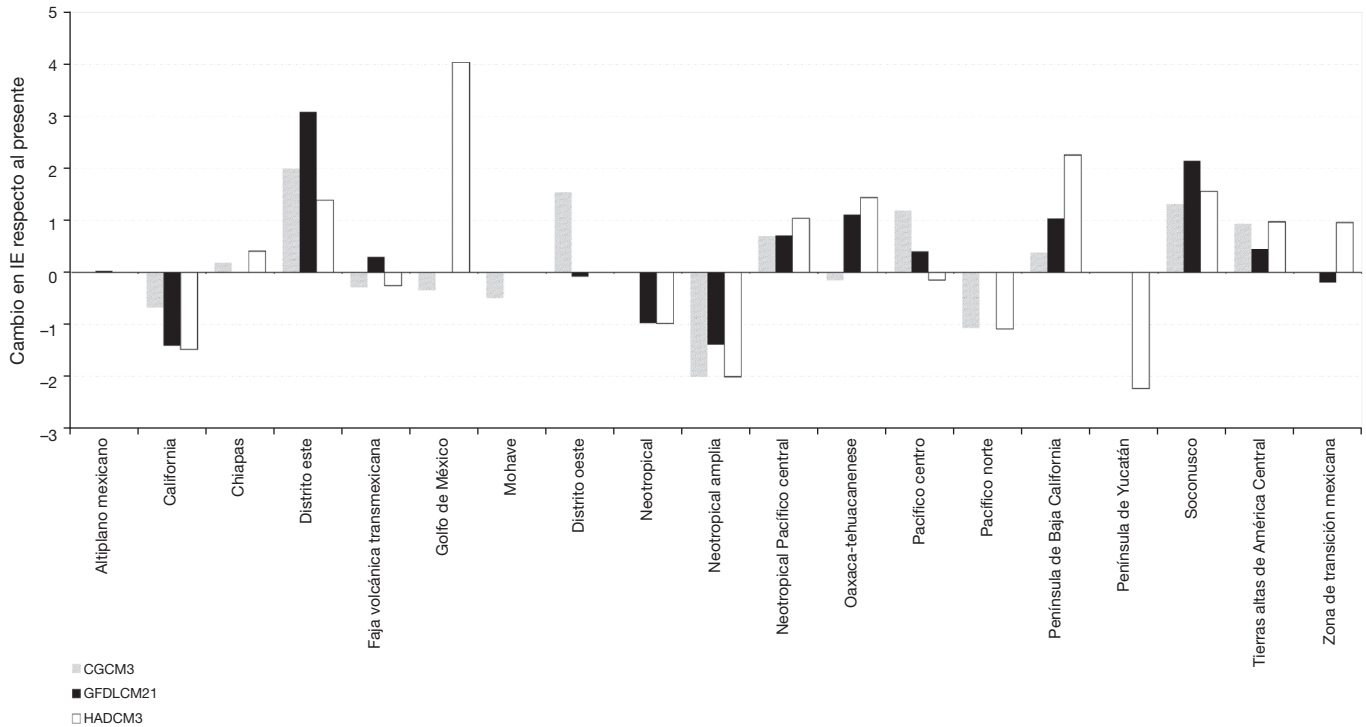


Figura 5. Las ganancias y pérdidas de superficie de las áreas de endemismo expresadas en porcentaje, para cada uno de los escenarios futuros. Solo se presentan las 19 áreas del presente que se obtuvieron en el menos un escenario futuro.

esperados para el 2090, se observó que las áreas de endemismo más afectadas para CGCM3 y GFDLCM21 son las del norte del país, mientras que las áreas de endemismo tropicales para HADCM3.

La relación del IE de las áreas de endemismo actuales con sus correspondientes en el futuro, también se vio afectada, siendo la Neotropical Amplia (Neoamp) y la Península de Yucatán (Penyuc) las áreas con mayores cambios negativos en el IE ( $-2.0$  y  $-2.2$ , respectivamente), mientras que las áreas que tuvieron un mayor incremento en su IE fueron el Distrito Este (Disest) y el Golfo de México (Golmex; fig. 5).

Por otro lado, la vulnerabilidad de las áreas de endemismo en CGCM3 fue mayor en Neoamp con un factor relativo de vulnerabilidad (FRV) de 0.62 y menor en el Pacífico Centro (Paccen) y el Disest con 0.14. En el caso de GFDLCM, el área de endemismo con un mayor FRV fue la Neotropical (Neo) con 0.57, mientras con un FRV menor fue el Soconusco (Soc) con 0.20. El mayor FRV en HADCM3 se registró en Neoamp y el área de endemismo con menor FRV fue Golmex (fig. 6).

En el caso de la variación geográfica y distribución de los patrones se observó que en CGCM3, la tendencia general es un desplazamiento a mayores latitudes con un ligero desplazamiento al oeste. Las diferencias entre este escenario y el actual son: un desplazamiento máximo de  $0.98^\circ$  hacia el norte (PBC) y en algunos casos es un cambio a latitudes bajas de  $0.58^\circ$  (Tierras Altas América Central, TAAC); mientras que los cambios en la longitud presentan un desplazamiento al oeste que pueden llegar a ser hasta de  $2.91^\circ$  (TAAC). Para GFDLCM21, la tendencia general es un desplazamiento al noroeste, lo que se

observa muy marcado en el caso de Neoamp con un cambio al oeste de  $2.07^\circ$  y  $0.07^\circ$  al norte, así como en el caso de PBC con un desplazamiento al norte de  $1^\circ$  y  $0.81^\circ$  al oeste. La tendencia general anterior es muy similar en HADCM3, donde Neoamp tiene un desplazamiento al oeste de  $3.7^\circ$  y al norte de  $0.6$ , mientras que Paccen su distribución se recorre  $0.7^\circ$  al oeste y al norte (fig. 7). Cabe señalar que se puede inferir que el desplazamiento al sur de algunas áreas de endemismo se debe a la presencia de algún sistema montañoso ubicado al sur del área de endemismo o dentro de ella, como el caso de la Faja Volcánica Transmexicana y Distrito Este (FVTM y Disest), donde el desplazamiento al sur fue de  $0.1^\circ$  en 2 modelos para la Faja Volcánica Transmexicana (CGCM3 y GFDLCM21), mientras que para Disest entre 0.04 y 0.2.

## Discusión

El impacto del cambio climático aquí observado coincide con otros estudios (Moritz et al., 2008; Trejo et al., 2011), los cuales indican que una de las respuestas esperadas para los mamíferos es el desplazamiento de su distribución, principalmente hacia latitudes norteñas y a altitudes mayores. Estas modificaciones se transfieren a los patrones de endemismo, dada la dependencia de estos a las distribuciones de las especies. Lo anterior trae consigo una limitante para su estudio, puesto que los vacíos de información ecológica y biogeográfica en la distribución de especies afectan el resultado de la identificación de las áreas de endemismo.



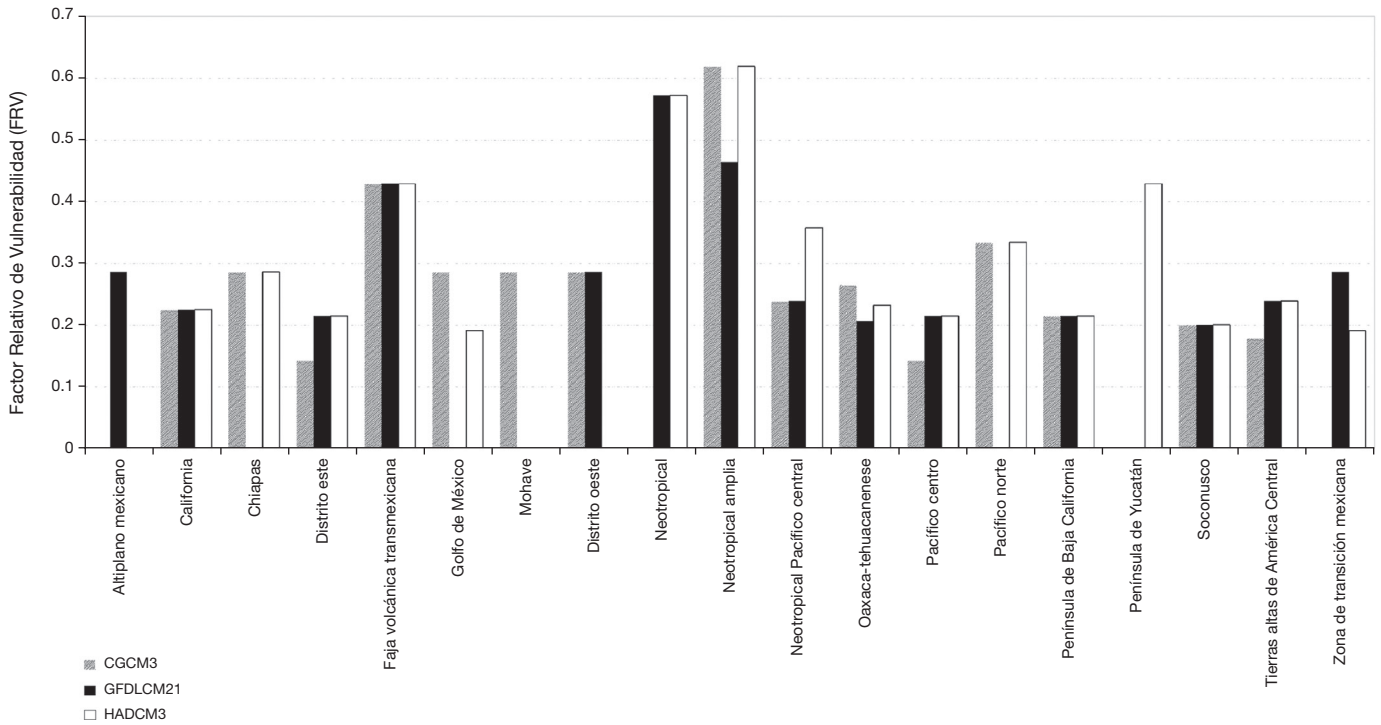


Figura 6. Las modificaciones en la composición de especies de las áreas de endemismo provocan un cambio en el factor relativo de vulnerabilidad (FRV). Este factor es mayor donde existen pérdidas de taxones endémicos o cambios de los mismos. Mientras que es menor donde se preservan las especies del escenario actual.

Aún con dicha limitante, los resultados obtenidos en cuanto a los patrones de endemismo para el presente coinciden con los propuestos en otros trabajos (Escalante et al., 2013; Ferrusquía-Villafranca et al., 2010; Morrone, 2001; Ramírez-Pulido y Castro-Campillo, 1992), lo que indica una mayor naturalidad de los patrones biogeográficos aquí descritos. Mientras que los cambios en las áreas de endemismo debidos al calentamiento global, son plausibles con la evidencia histórica del desplazamiento de los mamíferos y sus capacidades de adaptación (Barnosky, Hadly y Bell, 2003; Blois y Hadly, 2009). Por ejemplo: *Bison* perteneciente a Altmex es considerado por sus registros fósiles, característico de la provincia morfotectónica planicies y sierras de Chihuahua-Coahuila, y representativo del Rancholabreano (Pleistoceno) de las edades de mamíferos del Norte de América (Ferrusquía-Villafranca et al., 2010). Además, se empiezan a tener evidencias del impacto del cambio climático en sus poblaciones, debido a las limitantes que este fenómeno provocaría en la disponibilidad de recursos naturales para las poblaciones de especies como el bisonte (Craine, 2013; Koons et al., 2012).

Para ejemplificar los posibles cambios en la composición de especies en las áreas de endemismo se discuten los siguientes casos:

1) La composición de especies en el Altiplano Mexicano. Al conocer que *Peromyscus flavescens* derivó de la diversificación de su ancestro entre el Mioceno tardío y el Pleistoceno, debido a los cambios climáticos que hicieron que los pastizales se expandieran por la parte central de América del Norte en los periodos secos (Hafner y Hafner, 1983; Neiswenter y

Riddle, 2011); pastizales que ahora son vulnerables a un nuevo calentamiento global de mayor magnitud, se puede suponer que es posible el cambio de especies endémicas en el Altmex (*P. flavescens* por *C. ludovicianus*) en el futuro. Pero estos resultados no se pueden interpretar como una sustitución

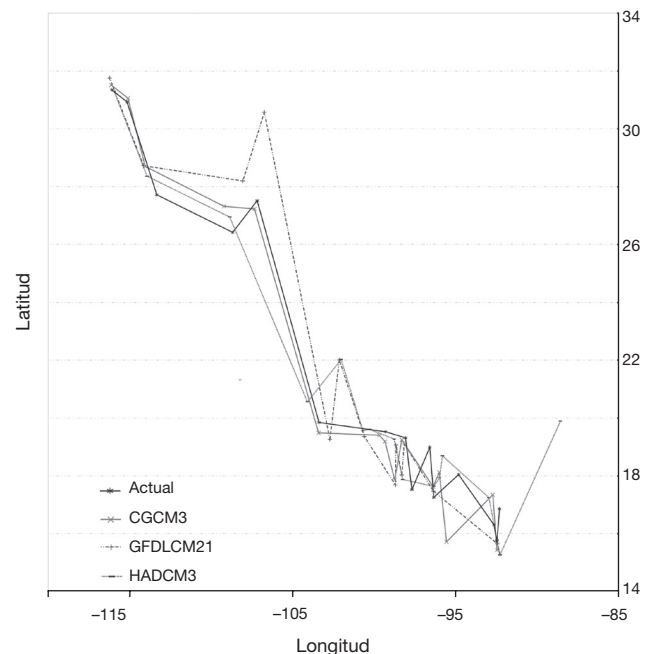


Figura 7. Distribución espacial de todas las áreas de endemismo, donde se muestran las tendencias geográficas generales de cada escenario.

ción absoluta de una especie por otra, puesto que no se consideraron las interacciones entre las especies, ni otros factores como los recursos, tanto por las limitaciones del método como por el enfoque del estudio. Aunque dichos resultados sí indican cierta vulnerabilidad de los patrones al cambio climático, como se puede observar en el FVR del área.

2) Cambios en la composición de la FVTM y el Disest. Dada la susceptibilidad y vulnerabilidad de la FVTM y Disest observada en el pasado (Pleistoceno; Ferrusquía-Villafranca et al., 2010; Gámez et al., 2012), la composición de especies para el futuro puede estar mucho más comprometida que en Altmex. Puesto que de ocurrir cambios en las distribuciones de las especies, esto puede agravarse por la fragilidad y escasez de los recursos naturales de la parte central en el país. En donde especies muy adaptadas a los zacatonales alpinos del Disest como *Romerolagus diazii*, posiblemente no esté en condiciones de competencia al interactuar con especies adaptadas a diversas condiciones de la FVTM como *Peromyscus* y *Neotomodon alstoni*, que al presentarse un cambio climático se desplacen hacia la parte este de la FVTM. Aunque de la misma forma que en Altmex, los resultados deben considerarse como una evaluación de la vulnerabilidad de las áreas de endemismo y no se deben tomar como un hecho, los cambios esperados en el futuro ya se han observado de cierta forma en el pasado, puesto que la complejidad de la biodiversidad de la FVTM y del Disest está asociada a los cambios climáticos ocurridos en el Pleistoceno (Dawson, 2005; Williams, Ramírez-Pulido y Baker, 1985).

Por último, se encontraron algunas especies que en el pasado expandieron su distribución o se diversificaron, debido a los cambios climáticos a los que estuvieron expuestos en el Neógeno, y que actualmente contribuyen o son parte de algún área de endemismo vulnerable al moderno calentamiento global. Ejemplos de ello son: *Peromyscus californicus* (Dawson, 2005), *Chaetodipus californicus* y *C. fallax* (Alexander y Riddle, 2005; Hafner et al., 2007), *Microtus californicus* (Cudworth y Koproński, 2010), *Peromyscus zarhynchus* (Dawson, 2005), *Sorex stizodon* (Hope, Speer, Demboski, Talbot y Cook, 2012), *P. longimembris* y *P. crinitus* (Hafner y Hafner, 1983; Johnson y Armstrong, 1987; Kurten y Anderson, 1980; Neiswenter y Riddle, 2011).

Por otra parte, las diferencias obtenidas en cada escenario tanto en las distribuciones potenciales y las áreas de endemismo en el futuro, se deben a la exposición a aumentos de la temperatura, mayores en las regiones del norte del país para CGCM3 y GFDLCM21 y en la parte sur para HADCM3, lo anterior asociado a una mayor disminución de la precipitación para los primeros y un ligero aumento en la parte sureste del país en el caso de HADCM3. Mientras que la vulnerabilidad de acuerdo con el FRV es muy similar en los 3 escenarios, coincidiendo en áreas de endemismo que abarcan todo el país (Neoamp y Neo) y que incluyen especies neárticas y neotropicales, por lo cual, es necesario que el FRV empleado incorpore directamente la exposición para observar mayores diferencias (Young et al., 2011). Si bien lo anterior es una limitante del FRV propuesto, este evalúa la vulnerabilidad de acuerdo con uno de los rasgos más importantes de las áreas de endemismo, las especies que la componen. Dicha vulnerabilidad es plausible con

la propia historia de las áreas y sus especies, puesto que es mayor en áreas con biotas complejas como son Neoamp y Neo. Lo anterior, hace que el FRV tenga la ventaja de poder evaluar la vulnerabilidad de una forma rápida, pero eficiente de acuerdo con lo observado biogeográfica e históricamente.

El cambio climático repercutirá en la composición y distribución de los patrones de endemismo de los mamíferos de México, en algunos casos hasta la ausencia de ellos en el futuro, dependiendo del escenario que se utilice. Por otra parte, dados los resultados obtenidos en el FRV, se puede afirmar que la vulnerabilidad es mayor en áreas de endemismo neotropicales que en áreas del norte de México. Aunque la estrecha relación entre las biotas de las áreas de endemismo, provoca que un cambio en la composición de especies en alguna de estas áreas, implique una modificación en las áreas adyacentes a cualquiera de ellas.

En cuanto a la vulnerabilidad de las áreas de endemismo de los mamíferos al cambio climático, posiblemente sea muy similar en los nuevos escenarios de cambio climático, dado que las tendencias socioeconómicas no han cambiado mucho, aun cuando se han señalado las consecuencias del cambio climático en diversos sectores. Por eso, para fines de conservación, es necesario ampliar la base de datos biológicos para desarrollar un índice de vulnerabilidad más robusto del aquí empleado, tomando a las áreas de endemismo como unidades biogeográficas históricas de manejo que permitan una aplicación práctica de lo presentado en este artículo.

## Agradecimientos

Al Dr. Oswaldo Téllez y la Dra. Cecilia Conde por su apoyo y comentarios a este trabajo. Al Posgrado en Ciencias Biológicas de la Universidad Nacional Autónoma de México y al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología por la beca otorgada para la realización de este proyecto. Así como al Dr. Gerardo Sánchez-Rojas por sus comentarios y observaciones.

## Referencias

- Alexander, L. F. y Riddle, B. R. (2005). Phylogenetics of the new world rodent Family Heteromyidae. *Journal of Mammalogy*, 86, 366–379.
- Anderson, R. P. y González Jr., I. (2011). Species-specific tuning increases robustness to sampling bias in models species distributions: an implementation with Maxent. *Ecological Modelling*, 222, 2796–2811.
- Ascorra, C. F., Wilson, D. E. y Gardner, A. L. (1991). Geographic distribution of *Micronycteris schmidtorum* Sanborn. *Proceedings of the Biological Society of Washington*, 104, 351–355.
- ASM (American Society of Mammalogists) (2013). *Mammalian species*. The American Society of Mammalogists. Recuperado el 19 marzo 2013, de <http://www.mammalogy.org/publications/mammalian-species>
- Balica, S. F., Wright, N. G. y Van der Meulen, F. (2012). A flood vulnerability index for coastal cities and its use in assessing climate change impacts. *Natural Hazards*, 64, 73–105.
- Barnosky, A. D., Hadly, E. A. y Bell, C. J. (2003). Mammalian response to global warming on varied temporal scales. *Journal of Mammalogy*, 84, 354–368.
- Bean, W. T., Stafford, R. y Brashares, J. S. (2012). The effects of small sample size and sample bias on threshold selection and accuracy assessment of species distribution models. *Ecography*, 35, 250–258.

- Beever, E. A. y Belant, J. L. (2012). *Ecological consequences of climate change: mechanisms, conservation and management*. Boca Raton: CRC Press.
- Blois, J. L. y Hadly, E. A. (2009). Mammalian response to Cenozoic climatic change. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 37, 181–208.
- Cahill, A. E., Aiello-Lammens, M. E., Fisher-Reid, M. C., Hua, X., Karanewsky, C. J., Ryu, H. Y., et al. (2012). How does climate change cause extinction? *Proceedings of The Royal Society Biological Sciences*, 1–10.
- CCA (Comisión para la Cooperación Ambiental) (2006). *Capa de ríos y lagos. Atlas Ambiental de América del Norte*. Natural Resources Canada, U. S. Geological Survey, Instituto Nacional de Estadística y Geografía. Conjunto de datos vectoriales escala 1:10 000 000. Recuperado el 20 septiembre 2012, de <http://www.cec.org/Page.asp?PageID=122&ContentID=2336>
- CCCMA (Canadian Centre for Climate Modelling and Analysis) (2014). *The third generation coupled global climate model*. Recuperado el 18 mayo 2014, de <http://www.ec.gc.ca/ccmac-cccma/default.asp?n=1299529F-1>
- Ceballos, G. y Arroyo-Cabrales, J. (2012). Lista actualizada de los mamíferos de México. *Revista Mexicana de Mastozoología Nueva Época*, 2, 27–80.
- Ceballos, G., Arroyo-Cabrales, J., Medellín, R. A. y Domínguez-Castellanos, Y. (2005). Lista actualizada de los mamíferos de México. *Revista Mexicana de Mastozoología*, 9, 21–71.
- Conde, C., Estrada, F., Martínez, B., Sánchez, O. y Gay, C. (2011). Regional climate change scenarios for Mexico. *Atmósfera*, 24, 125–140.
- Craine, J. M. (2013). Long-term climate sensitivity of grazer performance: a cross-site study. *PlosOne*, 8, e67065.
- Cudworth, N. L. y Koprowski, J. L. (2010). *Microtus californicus* (Rodentia: Cricetidae). *Mammalian Species*, 42, 230–243.
- Dawson, W. D. (2005). Peromyscine biogeography, mexican topography and Pleistocene climatology. En V. Sánchez-Cordero y R. A. Medellín (Eds.), *Contribuciones mastozoológicas en homenaje a Bernardo Villa* (pp. 145–156). México, D. F.: Instituto de Biología e Instituto de Ecología, Universidad Nacional Autónoma de México; Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad.
- Delworth, T. L., Broccoli, A. L., Rosati, A., Stouffer, R. J., Balaji, V., Beesley, V., et al. (2006). GFDL's CM2 Global coupled climate models. Part I: formulation and simulation characteristics. *Journal of Climate*, 19, 643–674.
- Downer, H. R. (2009). *Distribution of woodland salamanders of the valley and ridge in West Virginia*. (Tesis de Maestría). Department of Biological Sciences. Marshall University.
- Elith, J., Phillips, S. J., Hastie, T., Dudík, M., Chee, Y. E. y Yales, C. J. (2011). A statistical explanation of MaxEnt for ecologist. *Diversity and Distributions*, 17, 43–57.
- Escalante, T. (2013). Atlas biogeográfico de los mamíferos terrestres de América del Norte; una nueva opción en internet. *Therya*, 4, 5–8.
- Escalante, T., Morrone, J. J. y Rodríguez-Tapia, G. (2013). Biogeographic regions of North American mammals based on endemism. *Biological Journal of the Linnean Society*, 110, 486–499.
- Escalante, T. y Rodríguez-Tapia, G. (2011). Base de datos geoespacial de mamíferos terrestres de América del Norte: una aproximación a sus patrones biogeográficos y conservación. En J. F. Mas, G. Cuevas y R. González (Comps.), *Memorias de la XIX Reunión Nacional SELPER-México* (pp. 110–113). México, D. F.: Centro de Investigaciones en Geografía Ambiental. Universidad Nacional Autónoma de México.
- Escalante, T., Szumik, C. y Morrone, J. J. (2009). Areas of endemism of Mexican mammals: reanalysis applying the optimality criterion. *Biological Journal of the Linnean Society*, 98, 468–478.
- ESRI (Environmental Systems Research Institute) (2008). ArcGIS Desktop Geographic Information System. Versión 9.3. California, USA. ArcGIS y ArcMap son propiedad de ESRI y se usan aquí bajo licencia. Todos los derechos reservados. Recuperado de <http://www.esri.com>
- Ferrusquía-Villafranca, I., Arroyo-Cabrales, J., Martínez-Hernández, E., Gama-Castro, J. Ruiz-González, J., Polaco, O. J., et al., (2010). Pleistocene mammals of Mexico: a critical review of regional chronofaunas, climate change response and biogeographic provinciality. *Quaternary International*, 217, 53–104.
- Fielding, A. H. y Bell, J. F. (1997). A review of methods for the assessment of prediction errors in conservation presence/absence models. *Environmental Conservation*, 24, 38–49.
- Gámez, N., Escalante, T., Rodríguez, G., Linaje, M. y Morrone, J. J. (2012). Caracterización biogeográfica de la Faja Volcánica Transmexicana y análisis de los patrones de distribución de su mastofauna. *Revista Mexicana de Biodiversidad*, 83, 258–272.
- Goloboff, P. (2012). *NDM/VNDM. Versión 3.0*. Programs for identification of areas of endemism. Recuperado el 07 abril 2012, de <http://www.lillo.org.ar/phylogeny/endemism/>
- Hafner, J. C. y Hafner, M. S. (1983). Evolutionary relationships of Heteromyid rodents. *Great Basin Naturalist Memoirs*, 7, 3–29.
- Hafner, J. C., Light, J. E., Hafner, D. J., Hafner, M. S., Reddington, E., Rogers, D. S., et al. (2007). Basal clades and molecular systematics of Heteromyid rodents. *Journal of Mammalogy*, 85, 1129–1145.
- Hope, A. G., Speer, K. A., Demboski, J. R., Talbot, S. L. y Cook, J. A. (2012). A climate for speciation: rapid spatial diversification within the *Sorex cinereus* complex of shrews. *Molecular Phylogenetics and Evolution*, 64, 671–684.
- Inegi (Instituto Nacional de Estadística y Geografía) (2001). *Provincias fisiográficas para México*. Escala 1:1 000 000. Aguascalientes, México: INEGI.
- Inegi (Instituto Nacional de Estadística y Geografía) (2013). *Continuo de elevaciones mexicano 3.0* (CEM 3.0). Conjunto de datos de relieve para el territorio de los Estados Unidos Mexicanos a una resolución de 15 m por 15 m. Recuperado el 26 julio 2013, de <http://www.inegi.org.mx/geo/contenidos/datosrelieve/continuo/elevaciones.aspx>
- IUCN (International Union for Conservation of Nature) (2013). *The IUCN Red List of Threatened Species. Versión 2013.2*. Recuperado el 04 agosto 2013, de <http://www.iucnredlist.org>
- Jarema, S. I., Samson, J., McGill, B. J. y Humphries, M. M. (2009). Variation in abundance across a species' range predicts climate change responses in the range interior will exceed those at the edge: a case study with North American beaver. *Global Change Biology*, 15, 508–522.
- Jezkova, T., Jaeger, J. R., Marshall, Z. L. y Riddle, B. R. (2009). Pleistocene impacts on the phylogeography of the desert pocket mouse (*Chaetodipus penicillatus*). *Journal of Mammalogy*, 90, 306–320.
- Johnson, D. W. y Armstrong, D. M. (1987). *Peromyscus crinitus*. *Mammalian Species*, 287, 1–8.
- Karsh, M. B. y MacIver, D. (2010). Impacts of climate extremes on biodiversity in the Americas. En F. Dallmeier (Ed.), *Climate change, biodiversity and sustainability in the Americas: impacts and adaptations*. (183 p). Washington, D.C.: Smithsonian Institution Scholarly Press.
- Koons, D. N., Terletzky, P., Adler, P. B., Wolfe, M. L., Ranglack, D., Howe, F. P., et al. (2012). Climate and density-dependent drivers of recruitment in plains bison. *Journal of Mammalogy*, 93, 475–481.
- Kurten, B. y Anderson, E. (1980). *Pleistocene mammals of North America*. New York, USA: Columbia University Press.
- León-Paniagua, L., Navarro-Sigüenza, A. G., Hernández-Baños, B. E. y Morales, J. C. (2007). Diversification of the arboreal mice of the genus *Habromys* (Rodentia: Cricetidae: Neotominae) in the Mesoamerican highlands. *Molecular Phylogenetics and Evolution*, 42, 653–664.
- Liu, C., Berry, P. M., Dawson, T. P. y Pearson, R. G. (2005). Selecting thresholds of occurrence in the prediction of species distributions. *Ecography*, 28, 385–393.
- Longoria, C. A. (2008). *Distribución hipotética de especies de aves y de mamíferos con categoría de riesgo en la NOM-059-SEMARNAT-2001, registradas en el estado de Durango*. (Tesis de Maestría). Instituto Politécnico Nacional-Centro Interdisciplinario de Investigación para el Desarrollo Integral Regional Unidad Durango (CIIDIR).
- Martínez-Meyer, E., Calixto-Pérez, E. y Arroyo-Lamber, D. (2011). Impacto del cambio climático en la biodiversidad de los sitios terrestres prioritarios para la conservación en México. 183–187. En P. Koleff y T. Urquiza-Haas (Eds.), *Planeación para la Conservación de la Biodiversidad Terrestre en México: retos en un país megadiverso* (245 p.). México, D. F.: Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad, Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas.
- MFSL (Moscow Forestry Sciences Laboratory) (2012). Moscow Forestry Sciences Laboratory, USDA (Unites States Department of Agriculture) Forest Service. *Climate data and estimates, climate change and plant climate relationships*. Recuperado el 10 noviembre 2012, de <http://forest.moscowfsl.wsu.edu/climate/>

- Moritz, C., Patton, J. L., Conroy, C. J., Parra, J. L., White, G. C. y Beissinger, S. R. (2008). Impact of a century of climate change on small-mammal communities in Yosemite National Park, USA. *Science*, 322, 261–264.
- Morrone, J. J. (2001). *Biogeografía de América Latina y el Caribe (Vol. 3)*. Zaragoza: Manuales y Tesis SEA.
- Morrone, J. J. (2009). *Evolutionary biogeography: an integrative approach with case studies*. Nueva York: Columbia University Press.
- Neiswenter, S. A. y Riddle, B. R. (2011). Landscape and climatic effects on the evolutionary diversification of the *Perognathus fasciatus* species group. *Journal of Mammalogy*, 92, 982–993.
- Pearson, R. G., Raxworthy, C. J., Nakamura, M. y Peterson, A. T. (2007). Predicting species distributions from small numbers of occurrence records: a test case using cryptic geckos in Madagascar. *Journal of Biogeography*, 34, 102–117.
- Phillips, S. J., Anderson, R. P. y Schapire, R. E. (2006). Maximum entropy modeling of species geographic distributions. *Ecological Modelling*, 190, 231–259.
- Phillips, S. J. y Dudík, M. (2008). Modeling of species distributions with MaxEnt: new extensions and a comprehensive evaluation. *Ecography*, 31, 161–175.
- Ramírez-Pulido, J., Arroyo-Cabrales, J. y Castro-Campillo, A. (2005). Estado actual y relación nomenclatural de los mamíferos terrestres de México. *Acta Zoológica Mexicana*, 21, 21–82.
- Ramírez-Pulido, J. y Castro-Campillo, A. (1992). *Regiones y provincias mastogeográficas. Carta IV.8.8. A. Naturaleza. Atlas Nacional de México*. México, D. F.: Instituto de Geografía. Universidad Nacional Autónoma de México.
- Redondo, R. A. F., Brina, L. P. S., Silva, R. F., Ditchfield, A. D. y Santos, F. R. (2008). Molecular systematics of the genus *Artibeus* (Chiroptera: Phyllostomidae). *Molecular Phylogenetics and Evolution*, 49, 44–58.
- Rogelj, J., Meinshausen, M. y Knutti, R. (2012). Global warming under old and new scenarios using IPCC climate sensitivity range estimates. *Nature Climate Change*, 2, 248–253.
- Rosenzweig, C., Karoly, D., Vicarelli, M., Neofotis, P., Wu, Q., Casassa, G., et al. (2008). Attributing physical and biological impacts to anthropogenic climate change. *Nature*, 453, 353–358.
- Soberón, J. (2010). Niche and area of distribution modeling: a population ecology perspective. *Ecography*, 33, 159–167.
- Szumik, C. A., Casagrande, D. y Roig, S. (2006). Manual de NDM/VNDM: programa para la identificación de áreas de endemismo. *Instituto Argentino de Estudios Filogenéticos*, 5, 1–26.
- Thuiller, W., Albert, C., Araujo, M. B., Berry, P. M., Cabeza, M., Guisan, A., et al. (2009). Predicting global change impacts on plant species' distribution: future challenges. *Perspectives in Plant Ecology, Evolution and Systematics*, 9, 137–152.
- Trejo, I., Martínez-Meyer, E., Calixto-Pérez, E., Sánchez-Colón, S., Vázquez-De la Torre, R. y Villers-Ruiz, L. (2011). Analysis of the effects of climate change on plant communities and mammals in Mexico. *Atmósfera*, 24, 1–14.
- Van Vuuren, D. P., Riahi, K., Moss, R., Edmonds, J., Thomson, A., Nakicenovic, N., et al. (2012). A proposal for a new scenario framework to support research and assessment in different climate research communities. *Global Environmental Change*, 22, 21–35.
- Williams, S. L., Ramírez-Pulido, J. y Baker, R. J. (1985). *Peromyscus alstoni*. *Mammalian Species*, 242, 1–4.
- Woodman, N. (2005). Evolution and biogeography of mexican small-eared shrews of the *Cryptotis mexicana*-group (Insectivora: Soricidae). Capítulo 42: 523–534. En V. Sánchez-Cordero y R. A. Medellín (Eds.), *Contribuciones mastozoológicas en homenaje a Bernardo Villa (706 p)*. México, D. F.: Instituto de Biología e Instituto de Ecología, Universidad Nacional Autónoma de México; Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad.
- Woodman, N. y Timm, R. M. (1999). Geographic variation and evolutionary relationships among broad-clawed shrews of the *Cryptotis goldmani*-Group (Mammalia: Insectivora; Soricidae). *Fieldiana: Zoology New Series*, 91, 1–35.
- Yáñez-Arenas, C., Mandujano, S., Martínez-Meyer, E., Pérez-Arteaga, A. y González-Zamora, A. (2012). Modelación de la distribución potencial y el efecto del cambio de uso de suelo en la conservación de los ungulados silvestres del Bajo Balsas, México. *Therya*, 3, 67–79.
- Young, B., Byers, E., Gravuer, K., Hall, K., Hammerson, G. y Redder, A. (2011). *Guidelines for using the NatureServe climate change vulnerability index*. Arlington: NatureServe.