



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA  
DE MÉXICO**

---

---

**FACULTAD DE CIENCIAS**

**DINÁMICA GEOGRÁFICA DE ALGUNAS ESPECIES  
DE VEGETALES Y DE MAMÍFEROS DEL DESIERTO  
CHIHUAHUENSE PARA LOS ESCENARIOS DE  
CAMBIO CLIMÁTICO 2050 Y 2080.**

**T E S I S**

**QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:**

**BIÓLOGA**

**P R E S E N T A:**

**ISABEL ADALI CELIS GONZÁLEZ**



**DIRECTOR DE TESIS:  
BIÓL. NIZA GÁMEZ TAMARIZ  
2014**



Universidad Nacional  
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

**Biblioteca Central**



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

## Hoja de datos del jurado

1. Datos del alumno

Celis  
González  
Isabel Adali  
5523293193  
Universidad Nacional Autónoma de México  
Facultad de Ciencias  
Biología  
306105542

2. Datos del tutor

Bióloga  
Niza  
Gámez  
Tamariz

3. Datos del sinodal 1

Doctora  
Tania  
Escalante  
Espinosa

4. Datos del sinodal 2

Biólogo  
José Gerardo  
Rodríguez  
Tapia

5. Datos del sinodal 3

Maestra en Ciencias  
Angela Patricia  
Cuervo  
Robayo

6. Datos del sinodal 4

Doctora  
Léia  
Akcelrad  
Lerner

7. Datos del trabajo escrito

Dinámica geográfica de algunas especies de vegetales y de mamíferos del desierto chihuahuense para los escenarios de cambio climático 2050 y 2080.

84 pp.  
2014

*En memoria de Felipe Celis M. †*

*Abuelito gracias por creer siempre en mi y en este proyecto.*

## **Agradecimientos**

A la Universidad Nacional Autónoma de México y a la Facultad de Ciencias, por brindarme una formación académica de calidad, así como las herramientas necesarias para la elaboración de esta tesis.

Al Programa de Apoyo a Proyectos para la Innovación y Mejoramiento de la Enseñanza (PAPIME), como parte del proyecto: Atlas biogeográfico de los mamíferos terrestres de América del Norte, (PE202012) por la beca otorgada durante la realización de este proyecto.

Al taller de Biogeografía de la conservación, de esta facultad por todo el apoyo brindado, y a cada uno de los profesores que lo integran, de los cuales aprendí (y sigo aprendiendo) dentro y fuera del salón de clases y de quienes agradezco su amistad y afecto.

A mi tutora, la Biól Niza Gámez Tamariz, gracias por toda tu ayuda, apoyo paciencia y atenciones durante la dirección de esta tesis. Por todo el aprendizaje que tuvimos juntas.

A la Dra. Tania Escalante Espinosa, por todas las oportunidades de desarrollo académico y profesional, pero sobre todo personal que me brindaste desde el comienzo. ¡Muchas gracias!

Al Biól. Gerardo Rodríguez, a la Dra. Patricia Illoldi y al Biól Miguel Linaje, por su apoyo, comentarios y aportes durante la realización de este escrito. Gracias por compartir tanto conmigo.

A la M. en C. Angela Cuervo y a la Dra. Léia Scheinvar por sus contribuciones durante el proceso de revisión de este escrito.

A mi familia, porque aprendo y disfruto de ellos cada día. Gracias por tantas lecciones en los buenos y malos momentos.

A mis padres Héctor Celis y Eva Ma. González, por inculcar y fomentar en mí el amor, el respeto, el compromiso y por enseñarme a ser cada día un mejor ser humano. Gracias por todo su apoyo en cada una de las locas ideas que les comparto y de las cuales forman parte.

A mi hermano Héctor Celis G., por ser mi amigo, compañero y cómplice de aventuras. Por hacerme reír a cada instante.

A Selene, Daniela y Daniel por tantos años de amistad y confianza porque a pesar de la distancia se que puedo contar con ustedes.

A mis amigas, Brenda (¡Amiga! gracias por todos los buenos momentos, no tengo como agradecer todas tus palabras y tú apoyo en más de una ocasión. Por rescatarme y ayudarme a crecer), Fernanda (¡Mi hermana! Gracias por momentos que van desde traqueidas y elementos de vaso hasta *Homo sapiens* y mucho más), Marco (Por comenzar un proyecto que estoy segura dará grandes resultados y oportunidades), Andrea, Blanca Martha, Karen, Marisol y Laura (Por escucharme y por reír tanto conmigo).

**Dinámica geográfica de algunas especies de vegetales y de mamíferos del Desierto  
Chihuahuense para los escenarios de cambio climático 2050 y 2080.**

Celis G. Isabel A.

---

CONTENIDO

|   | Página    |
|---|-----------|
| <b>Resumen</b>  |           |
| <b>I. Introducción</b>  | <b>1</b>  |
| <b>II. Antecedentes</b>   | <b>2</b>  |
| II.1. El clima  | 2         |
| II.2. Respuestas de la biota ante un cambio en el clima                       | 3         |
| II.3. Nicho ecológico   | 4         |
| II.3.1. Conservadurismo de nicho y cambios climáticos                         |           |
| II.4. Modelado de nicho ecológico   | 5         |
| II.4.1. Limitaciones de los modeladores                                       |           |
| II.4.2. Escenarios climáticos   |           |
| II.5. Las zonas áridas y semiáridas de América del Norte como caso de estudio | 7         |
| II.5.1. Desierto Chihuahuense   |           |
| <b>III. Justificación</b>   | <b>10</b> |
| <b>IV. Objetivos</b>  | <b>11</b> |
| IV.1. Objetivo general  | 11        |
| IV.2. Objetivos particulares  | 11        |

|   | Página    |
|---|-----------|
| <b>V. Material y método</b>   | <b>12</b> |
| V.1. Base de datos  | 13        |
| V.I.I Delimitación del área de estudio  |           |
| V.2. Modelos de nicho ecológico   | 15        |
| V.3. Cuantificación y evaluación de las modificaciones a la distribución de las especies como efecto del cambio climático | 18        |
| <b>VI. Resultados</b>   | <b>19</b> |
| VI.1 Distribución actual  | 19        |
| VI.2 Modelos de distribución actual   | 21        |
| VI.3 Modelos de distribución a futuro   | 23        |
| VI.3.1 Escenario A2: Horizontes de tiempo 2050 y 2080   |           |
| VI.3.2 Escenario B2: Horizontes de tiempo 2050 y 2080   |           |
| VI.4. Evaluación del cambio   | 31        |
| VI.4.1 Escenario A2   |           |
| VI.4.2 Escenario B2   |           |
| <b>VII. Discusión</b>   | <b>44</b> |
| <b>VIII. Conclusiones</b>   | <b>49</b> |
| <b>IX. Anexo I</b>  | <b>50</b> |
| <b>X. Anexo II</b>  | <b>66</b> |
| <b>XI. Referencias consultadas</b>  | <b>75</b> |

## Índice de figuras

|  | Página |
|--|--------|
| <b>Figura I:</b><br>Diagrama de BAM.   | 4      |
| <b>Figura II:</b><br>Desierto Chihuahuense.  | 8      |
| <b>Figura III:</b><br>Mapa de ocurrencia de las familias Agavaceae, Cactaceae, Fouquieriaceae, Liliaceae, y Zygophyllaceae.                        | 19     |
| <b>Figura IV:</b><br>Mapa de ocurrencia de las familias Cricetidae, Heteromyidae y Muridae.  | 20     |
| <b>Figura AI.I:</b><br>Círculo de correlaciones para las variables bioclimáticas de las especies vegetales.  | 59     |
| <b>Figura AI.II:</b><br>Círculo de correlaciones para las variables bioclimáticas de las especies de roedores.                                     | 60     |
| <b>Figura AI.III:</b><br>Representación de los individuos de las especies vegetales en el plano principal.   | 63     |
| <b>Figura AI.IV:</b><br>Representación de los individuos de las especies de roedores en el plano principal.  | 64     |
| <b>Figura AII.I:</b><br>Modelo de distribución potencial de la especie <i>Ariocarpus retusus</i> para el tiempo actual.                            | 66     |
| <b>Figura AII.II:</b><br>Modelo de distribución potencial de la especie <i>Ariocarpus retusus</i> para el horizonte de tiempo 2050, escenario A2.  | 67     |
| <b>Figura AII.III:</b><br>Modelo de distribución potencial de la especie <i>Ariocarpus retusus</i> para el horizonte de tiempo 2080, escenario A2. | 68     |

|  |    |
|--|----|
| <b>Figura AII.IV:</b>  | 69 |
| Modelo de distribución potencial de la especie <i>Fouquieria shrevei</i> para el tiempo actual.                            |    |
| <b>Figura AII.V:</b>   | 70 |
| Modelo de distribución potencial de la especie <i>Fouquieria shrevei</i> para el horizonte de tiempo 2050, escenario A2.   |    |
| <b>Figura AII.VI:</b>  | 71 |
| Modelo de distribución potencial de la especie <i>Fouquieria shrevei</i> para el horizonte de tiempo 2080, escenario A2.   |    |
| <b>Figura AII.VII:</b>   | 72 |
| Modelo de distribución potencial de la especie <i>Mammillaria bocasana</i> para el tiempo actual.                          |    |
| <b>Figura AII.VIII:</b>  | 73 |
| Modelo de distribución potencial de la especie <i>Mammillaria bocasana</i> para el horizonte de tiempo 2050, escenario A2. |    |
| <b>Figura AII.IX:</b>  | 74 |
| Modelo de distribución potencial de la especie <i>Mammillaria bocasana</i> para el horizonte de tiempo 2080, escenario A2. |    |

## Índice de cuadros

|  | Página |
|--|--------|
| <b>Cuadro I:</b><br>Lista de especies analizadas.  | 14     |
| <b>Cuadro II:</b><br>Características de los escenarios A2 y B2.  | 16     |
| <b>Cuadro III:</b><br>Cuantificación del área de distribución actual para las especies vegetales.  | 21     |
| <b>Cuadro IV:</b><br>Cuantificación del área de distribución actual para las especies de roedores.   | 22     |
| <b>Cuadro V:</b><br>Cuantificación y porcentaje de cambio en el área de distribución de las especies vegetales para los horizontes de tiempo 2050 y 2080, escenario A2.      | 24     |
| <b>Cuadro VI:</b><br>Cuantificación y porcentaje de cambio en el área de distribución de las especies de roedores para los horizontes de tiempo 2050 y 2080, escenario A2.   | 26     |
| <b>Cuadro VII:</b><br>Cuantificación y porcentaje de cambio en el área de distribución de las especies vegetales para los horizontes de tiempo 2050 y 2080, escenario B2.    | 28     |
| <b>Cuadro VIII:</b><br>Cuantificación y porcentaje de cambio en el área de distribución de las especies de roedores para los horizontes de tiempo 2050 y 2080, escenario B2. | 30     |
| <b>Cuadro IX:</b><br>Especies vegetales con patrón de respuesta de ganancia, bajo el escenario A2.   | 31     |

|   |    |
|---|----|
| <b>Cuadro X:</b>  | 32 |
| Especie de roedor con patrón de respuesta de ganancia, bajo el escenario A2.                        |    |
| <b>Cuadro XI:</b>   | 32 |
| Especies vegetales con patrón de respuesta de pérdida, bajo el escenario A2.                        |    |
| <b>Cuadro XII:</b>  | 33 |
| Especies de roedores con patrón de respuesta de pérdida, bajo el escenario A2.                      |    |
| <b>Cuadro XIII:</b>   | 33 |
| Especies vegetales con patrón de respuesta sin cambio significativo, bajo el escenario A2           |    |
| <b>Cuadro XIV:</b>  | 34 |
| Especies vegetales con patrón de respuesta inestable, bajo el escenario A2.                         |    |
| <b>Cuadro XV:</b>   | 35 |
| Especies vegetales con patrón de respuesta de ganancia, bajo el escenario B2.                       |    |
| <b>Cuadro XVI:</b>  | 36 |
| Especies de roedores con patrón de respuesta de ganancia, bajo el escenario B2.                     |    |
| <b>Cuadro XVII:</b>   | 36 |
| Especies vegetales con patrón de respuesta de pérdida, bajo el escenario B2.                        |    |
| <b>Cuadro XVIII:</b>  | 37 |
| Especies de roedores con patrón de respuesta sin cambio significativo, bajo el escenario B2.        |    |
| <b>Cuadro XIX:</b>  | 37 |
| Especie de roedor con patrón de respuesta sin cambio significativo, bajo el escenario B2.           |    |
| <b>Cuadro XX:</b>   | 37 |
| Especies vegetales con patrón de respuesta inestable, bajo el escenario B2.                         |    |
| <b>Cuadro XXI:</b>  | 37 |
| Especie de roedor con patrón de respuesta inestable, bajo el escenario B2                           |    |
| <b>Cuadro XXII:</b>   | 39 |
| Lista de especies vegetales y de roedores con el patrón de respuesta obtenido bajo el escenario A2. |    |

|   |    |
|---|----|
| <b>Cuadro XXIII:</b>  | 41 |
| Lista de especies vegetales y de roedores con el patrón de respuesta obtenido bajo el escenario B2.   |    |
| <b>Cuadro AI.I:</b>   | 52 |
| Matriz de correlación de las 19 variables bioclimáticas para las especies vegetales.                  |    |
| <b>Cuadro AI.II:</b>  | 53 |
| Matriz de correlación de las 19 variables bioclimáticas para las especies de roedores.                |    |
| <b>Cuadro AI.III:</b>   | 55 |
| Inercia de la nube de puntos para las especies vegetales analizadas con 19 variables bioclimáticas.   |    |
| <b>Cuadro AI.IV:</b>  | 55 |
| Inercia de la nube de puntos para las especies de roedores analizadas con 19 variables bioclimáticas. |    |
| <b>Cuadro AI.V:</b>   | 57 |
| Análisis de inercia para las especies vegetales para la selección de componentes principales.         |    |
| <b>Cuadro AI.VI:</b>  | 58 |
| Análisis de inercia para las especies de roedores para la selección de componentes principales.       |    |
| <b>Cuadro AI.VII:</b>   | 61 |
| Porcentaje de comunalidad de las variables bioclimáticas para las especies vegetales.                 |    |
| <b>Cuadro AI.VIII:</b>  | 62 |
| Porcentaje de comunalidad de las variables bioclimáticas para las especies de roedores.               |    |
| <b>Cuadro AI.IX:</b>  | 65 |
| Variables bioclimáticas seleccionadas para modelar a las especies vegetales.                          |    |
| <b>Cuadro AI.X:</b>   | 65 |
| Variables bioclimáticas seleccionadas para modelar a las especies de roedores                         |    |

## Resumen

Los estudios sobre cambio climático y su impacto en la distribución de las especies han tenido un incremento notable en años recientes, profundizándose cada vez más y haciéndose para una variedad mayor de taxones. En el presente estudio se muestra una aproximación sobre la dinámica geográfica de especies de matorral xerófilo del Desierto Chihuahuense (36 especies vegetales y cinco especies de roedores), basados en modelos de nicho ecológico (ENM por sus siglas en inglés), para condiciones climáticas actuales y futuras, particularmente para los horizontes de tiempo 2050 y 2080, bajo dos escenarios de cambio climático (A2 y B2). Las respuestas se categorizaron en ganancia, pérdida, cambio no significativo e inestable, referidos a la modificación en el área de distribución de las especies estudiadas. De acuerdo con los resultados obtenidos para ambos tiempos y bajo ambos escenarios, más del 90% de las especies tienen el potencial de sufrir modificaciones en su área de distribución.

Los taxones estudiados presentaron una respuesta diferenciada al cambio climático, ya que más del 45% de las especies se proyectan aumentos en sus áreas de distribución, mientras que para el 30% se pronostican disminuciones. Estos resultados reflejan la resiliencia de las especies estudiadas, indicando la complejidad a la respuesta geográfica ante un clima cambiante.

**Palabras clave:** Modelos de nicho ecológico, biodiversidad, distribución de especies, MaxEnt.

## **I. Introducción**

En México, las tierras áridas y semiáridas comprenden la más extensa zona ecológica del país, con una superficie equivalente al 48.29% de su territorio. Cubren la mayor parte del Altiplano mexicano, las planicies costeras de los estados de Tamaulipas y Sonora, la Península de Baja California y una parte importante del Valle de Tehuacán-Cuicatlán en los estados de Puebla y Oaxaca (Conabio, 2008). Caracterizados por la escasez de precipitación, estos ambientes se encuentran definidos por una precipitación anual de entre 400 y 700 mm, seis a doce meses secos y climas áridos (Bw) a semiáridos (Bs) (Toledo, 1997), siendo la vegetación la mejor expresión del clima (Ahrens, 2000).

Los ecosistemas de las regiones áridas tienen una gran importancia ecológica para nuestro país y en ellos, los factores climáticos y fisiográficos están íntimamente relacionados con los patrones de distribución de la biota (González y Sosa, 2003). Entre estos, la aridez es el de mayor relevancia, ya que es una condición imprescindible para el establecimiento y permanencia de las especies. En sitios en los que las condiciones de precipitación y humedad son relativamente mayores, se observa el desarrollo de otros tipos de comunidades vegetales; razón por la cual algunos autores afirman que “cambios en la precipitación llevarán a una desaparición de las comunidades vegetales del desierto” (Hernández, 2006).

Uno de los factores que pudieran estar amenazando la permanencia de estas comunidades, es el actual Cambio Climático (CC), entendido como un cambio de clima atribuido directa o indirectamente a la actividad humana el cual altera la composición de la atmósfera mundial y que se suma a la variabilidad natural del clima observada durante períodos de tiempo comparables (ONU, 1992). El CC constituye un factor de presión para la distribución y existencia de muchos ecosistemas de zonas áridas y semiáridas, así como de sus especies (SEMARNAT, 2005). Para el caso específico de los ecosistemas de zonas áridas en nuestro país se ha planteado su pérdida como una posibilidad ante los escenarios de cambio futuros (Hernández, 2006; Palacios, 2010).

A escala regional los cambios en el clima limitan la distribución, abundancia y supervivencia de las especies; mientras que a escalas más finas, estas modificaciones están influenciadas por otros factores como son la disponibilidad de nutrientes en suelo, disturbios, interacciones bióticas, entre otros (Lindenmayer *et al.*, 1996; Root *et al.*, 2003; Soberón, 2010). Considerando que la

distribución de las especies puede llegar a cambiar a lo largo del tiempo, y que el CC puede llegar a ser motor de cambio en la distribución de las especies de zonas áridas y semiáridas del país, es de gran relevancia tratar de predecir cuál será el efecto de dichos cambios en la distribución de las especies. En este sentido, los Modelos de Nicho Ecológico (ENMs, por sus siglas en inglés) son una herramienta útil ya que permiten hacer proyecciones a futuro de las posibles respuestas de la biota ante dicho cambio (Anderson *et al*, 2002, Parra-Olea *et al*, 2005, Ballesteros-Barrera, 2007).

## **II. Antecedentes**

### **II.1. El clima**

El clima está constituido por aquellos elementos básicos del sistema climático que tienen una variación relativamente lenta en el tiempo. Se caracteriza por promedios de los componentes del sistema termodinámico (precipitación, viento, temperatura, etc.) sobre períodos desde un mes hasta varios años, considerando siempre la variabilidad en el tiempo y en el espacio (Amador y Alfaro, 2009). Las fluctuaciones climáticas actuales ocurren como resultado de la variabilidad interna de este sistema y de factores externos, tanto naturales como antropogénicos (IPCC, 2002).

Los gases de invernadero reducen la pérdida neta de radiación infrarroja de la Tierra hacia el espacio, lo que hace que la temperatura de la superficie terrestre sea más cálida, produciendo el denominado efecto invernadero (IPCC, 1997). Se calcula que por efecto de las actividades humanas, entre 1790 y 2004 las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) aumentaron un 70%, siendo el CO<sub>2</sub> el más importante, aumentando cerca del 80%. Es importante señalar que las concentraciones atmosféricas de CO<sub>2</sub> y CH<sub>4</sub> en 2005 registraron niveles máximos para los últimos 650 000 años (IPCC, 2013). Por todo lo anterior se espera que las concentraciones de CO<sub>2</sub>, la temperatura media mundial de la superficie y el nivel del mar aumenten durante el siglo XXI (IPCC, 2002).

A partir de la dinámica de la atmósfera terrestre en torno a los GEI, se han generado distintos Modelos de Circulación General (MCG, por sus siglas en inglés), los cuales son representaciones matemáticas para simular condiciones del clima actual (1xCO<sub>2</sub>) y de cambio climático (2xCO<sub>2</sub>) considerando tres variables: temperatura, precipitación y radiación solar (Villers-Ruíz y Trejo-Vázquez, 1998). Los MCG se emplean para generar predicciones o retroyecciones del clima para diferentes horizontes de tiempo (Amador y Alfaro, 2009). Observaciones efectuadas en todos los

continentes y en la mayoría de los océanos, evidencian que numerosos sistemas naturales están siendo afectados por cambios del clima regional, particularmente por el aumento en la temperatura (IPCC, 2007). El calentamiento del sistema climático es inminente y como evidencia se pueden mencionar los aumentos en el promedio mundial de la temperatura del aire y del océano; la modificación del régimen de lluvias; la significativa reducción de la extensión de los hielos en los polos (2.7% por decenio), glaciales de montaña; y finalmente el aumento en el nivel oceánico de cerca de 3.1 mm/año (IPCC, 2007).

De igual forma, el CC afecta las funciones de los organismos (*e.g.* desarrollo, crecimiento, metabolismo, comportamiento, entre otros), modifica la dinámica de las poblaciones (tamaño, estructura, rangos de distribución, patrones de migración), la estructura y función de los ecosistemas (procesos de descomposición, ciclos de los nutrientes, flujos de agua y energía, composición de las especies e interacciones intra e interespecíficas) y la distribución geográfica de los ecosistemas sobre la superficie de la Tierra (IPCC, 2002, Peterson *et al.*, 2002).

## **II.2. Respuestas de la biota ante un cambio en el clima**

Una de las evidencias más claras de como las especies son afectadas por el CC, es la modificación en sus áreas de distribución. Dichas modificaciones pueden mostrar tres posibles patrones: 1) que las especies cambien su distribución y/o abundancia conforme a los regímenes ambientales a los que están adaptadas; 2) que se adapten a las nuevas condiciones; y o bien, 3) si las especies no pueden desplazarse geográficamente o adaptarse, su distribución se limitará a los sitios que mantengan condiciones propicias; en casos extremos las especies pueden llegar a la extinción (Holt, 1990). A nivel poblacional, las respuestas varían en función de la especie y el sentido del cambio en el clima. Hay especies que, dadas las características de su nicho pueden verse favorecidas, y en respuesta a ello aumentar su densidad poblacional o bien expandir su área de distribución; mientras que otras, pueden ser afectadas de manera negativa. Dicho efecto negativo puede estar asociado a distintos fenómenos: a) dependencia a un hábitat específico; b) reducida tolerancia o umbrales ambientales estrechos; c) dependencia a un detonante o señal ambiental específica; d) modificaciones a nivel de las interacciones interespecíficas; y finalmente, limitada capacidad de dispersión o colonización (Vié *et al.*, 2009).

### II.3. Nicho ecológico

En la literatura se establece que el área de distribución de una especie en un tiempo determinado, es resultado de una combinación de factores ambientales (Soberón, 2010). Desde la perspectiva de la ecología de poblaciones el área de distribución de un taxón se encuentra definida por los siguientes componentes: **A**, la región en el espacio geográfico en el que las variables escenopoéticas (climáticas) permiten una tasa intrínseca de crecimiento positiva; **B**, el área en donde las interacciones bióticas del taxón son adecuadas para la permanencia de sus poblaciones y **M**, el espacio geográfico que el taxón ha sido capaz de explorar durante periodos considerables de tiempo (evolutivo). Siendo los componentes A y M los comúnmente utilizados en los ENMs para obtener una representación de las áreas de distribución de las especies (Soberón, 2010).

En el modelo BAM, el área ocupada  $G_0$  es la región con condiciones ambientales y bióticas favorables para la especie, siendo esta la expresión geográfica del nicho realizado (Hutchinson, 1957), mientras que  $G_1$  es el área invadible, zona con condiciones bióticas y abióticas favorables, pero históricamente inaccesible para la especie, es decir, que la distribución del taxón se encuentra restringida por la presencia de barreras geográficas (Soberón, 2010) (ver figura I).

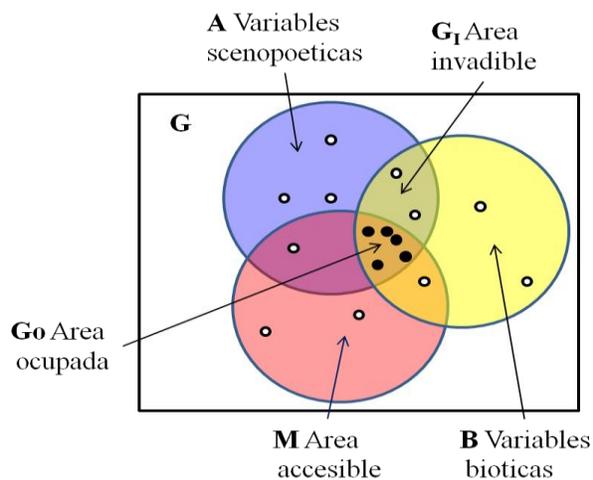


Figura I. Diagrama BAM (Soberón 2010).

Se ha mencionado entonces, el concepto de nicho ecológico, el cual Hutchinson (1957) define como el conjunto de condiciones ambientales, bióticas y abióticas, en las cuales las especies pueden crecer y sobrevivir de manera no efímera.

Para Hutchinson, el nicho fundamental define las propiedades ecológicas de una especie, siendo un concepto que incluye todos los ejes de las variables ambientales que afectan a las especies. Por lo tanto, las variables bioclimáticas pueden ser definidas como el componente climático del nicho

ecológico fundamental o el nicho climático (Pearson y Dawson, 2003). En este sentido Farber y Kadmon (2003) indican que los modelos para predecir la distribución de los organismos pueden contribuir a comprender los factores que limitan los patrones de la distribución de las especies.

### **II.3.1. Conservadurismo de nicho y cambios climáticos**

Peterson *et al.* (1999) señalan que las especies cambian sus requerimientos bióticos y abióticos de manera lenta, manteniendo éstos por largos periodos de tiempo (tiempos evolutivos), lo que definen como conservadurismo de nicho ecológico.

Existen en la literatura evaluaciones del grado de conservadurismo que pueden tener distintas especies, a partir de lo cual se ha reportado que la mayoría de los taxones explora las mismas condiciones abióticas por tiempos evolutivos (Martínez-Meyer *et al.*, 2004; Hawkins *et al.*, 2006; Knouft *et al.*, 2006; Peterson, 2011). Si partimos de la premisa del conservadurismo de nicho ecológico, entonces, ante las alteraciones climáticas recientes, lo más probable es que las especies “persigan” el espacio geográfico que brinde condiciones abióticas a las que están adaptadas (Martínez-Meyer y Peterson, 2006).

El conservadurismo de nicho cobra especial relevancia al considerar el escenario de cambio climático actual, ya que ante éste, el movimiento espacial de las especies es una alternativa a la extinción (Martínez-Meyer *et al.*, 2004), siendo esta, la base teórica que da validez a la proyección de ENMs formulados a partir de información actual a escenarios climáticos pasados o futuros.

### **II.4. Modelado de nicho ecológico**

En los últimos años se ha observado un gran avance en el desarrollo de algoritmos que permiten modelar la distribución de las especies (Iloldi-Rangel y Escalante, 2008; Mateo *et al.*, 2011; Pliscoff y Fuentes-Castillo, 2011;). Dentro de éstos los ENMs, basados en la teoría de nicho ecológico, son los más utilizados (Nenzén y Araújo, 2011). Estos han sido aplicados para evaluar hipótesis biogeográficas (Anderson *et al.*, 2002; Peterson *et al.*, 2002), procesos evolutivos (Peterson *et al.*, 1999; Martínez-Meyer *et al.*, 2003), proyectar el potencial de invasión de algunas especies (Peterson y Holt, 2003), determinar áreas prioritarias de conservación (Feria y Peterson, 2002; Loiselle *et al.*, 2003; Vargas *et al.*, 2004), entre otros. A partir de los ENMs, también es posible modelar el cambio geográfico de las poblaciones en el tiempo, así como la dirección del mismo (Parra-Olea *et al.*, 2005). Se ha reportado que los ENMs proyectados en el espacio geográfico como modelos de distribución del pasado (*i.e* Pleistoceno) son validados con registro

fósil, convirtiéndose en elemento empírico que da soporte a la teoría del conservadurismo de nicho (Martínez-Meyer y Peterson, 2006). Al modelar el nicho ecológico de las especies y proyectarlo en el tiempo o espacio también, es posible identificar áreas con potencial para perderse o ganarse como parte de la distribución de las especies (Peterson *et al*, 2001, Peterson *et al*, 2002, Parra-Olea *et al*, 2005).

Debido al creciente empleo de ENMs para evaluar la distribución de las especies en escenarios presentes, pasados o futuros, se han generado una gran variedad de algoritmos de modelado (Martínez-Meyer, 2005), tales como Bioclim (Nix, 1986), GARP (Stockwell y Peters, 1999), MaxEnt (Phillips *et al.*, 2004), entre otros. De entre esta gran diversidad pueden distinguirse dos grupos: 1) los que requieren de datos de presencia y ausencia como datos de entrada y 2) aquellos que requieren solo datos de presencia (Martínez-Meyer, 2005). Ambos trabajan sobre la base de patrones estadísticos de correlación entre los puntos de ocurrencia del taxón y el conjunto de datos ambientales (Soberón y Peterson, 2005).

#### **II.4.1. Limitaciones de los modeladores**

Debido al grado de complejidad de los fenómenos biológicos, los ENMs presentan muchas limitaciones al modelar la distribución geográfica de los taxones (Anderson, 2003; Pearson y Dawson, 2003), la gran mayoría no consideran factores bióticos o evolutivos (Guisan y Thuiller, 2005), y los resultados varían dependiendo del algoritmo que se emplee (Martínez-Meyer, 2005).

Pese a las limitantes, los ENMs ofrecen una alternativa para estimar los efectos del CC sobre la distribución de las especies, identificar aquellas especies que puedan ser más vulnerables, o bien detectar áreas climáticamente viables para la permanencia de la biodiversidad. Todas estas estimaciones, son elementos de gran valía al momento de diseñar e implementar medidas de conservación y manejo a corto y mediano plazo (Botkin *et al.*, 2007).

#### **II.4.2. Escenarios climáticos**

Recientemente se ha empleado un conjunto de variables climáticas generadas a partir de valores de temperatura y precipitación, las cuales además consideran los escenarios de emisiones de GEI propuestos por el IPCC (Panel Intergubernamental de Cambio Climático). Dichos escenarios estiman los cambios en el clima del planeta generados por actividades antropogénicas, y se les conoce como Informes Especiales sobre Escenarios de Emisiones (SRES, por sus siglas en inglés)

(IPCC, 2000), y de acuerdo con diferentes tendencias demográficas, sociales, económicas, tecnológicas y medioambientales pueden clasificarse en seis grupos o series (A1F1, A1T, A1B, A2, B1, B2), los cuales hasta el 2010 fueron agrupados en cuatro líneas de cambio y familias de escenarios (A1, A2, B1 y B2) (Moss *et al.*, 2010).

Las líneas evolutivas A1 y B1 contemplan cambios positivos en un enfoque global, con tendencias poblacionales en aumento hasta mediados de siglo XXI, momento en el que la tendencia es revertida como resultado del crecimiento económico, la introducción de nuevas tecnologías más eficientes y un mayor aprovechamiento de los recursos. Por su parte, las líneas evolutivas A2 y B2 consideran un mundo más heterogéneo, con tendencias regionales, un menor desarrollo económico y una población mundial en continuo crecimiento (IPCC, 2000).

Existe una gran variedad de métodos para generar escenarios climáticos, ya sea presentes, pasados o futuros, y la forma más común involucra el uso de modelos de circulación general de la atmósfera, GCM por sus siglas en inglés (IPCC, 2007).

## **II.5. Las zonas áridas y semiáridas de América del Norte como caso de estudio.**

Entender el impacto de los cambios climáticos del pasado sobre las especies, comunidades y ecosistemas, puede brindar elementos que ayuden a predecir los cambios en el futuro (Kappelle *et al.*, 1990). En este sentido, Riddle y Hafner (2006) mencionan que son precisamente los cambios climáticos ocurridos durante el Cuaternario, los que explican la actual extensión geográfica de los desiertos cálidos de América del Norte. Existe evidencia fósil que muestra como estos ecosistemas exhibieron su máxima extensión durante el cálido Plioceno temprano, mientras que durante los periodos húmedos y/o fríos del Plioceno tardío y Pleistoceno, las comunidades sufrieron significativas contracciones en sus áreas de distribución. Los registros dan cuenta no solo de modificaciones geográficas, sino de cambios en la composición biótica de dichas comunidades (Hernández, 2006). Inclusive, hay autores que sugieren que la formación de los desiertos del norte de México, tal y como los conocemos en la actualidad, son un fenómeno reciente que se consolidó durante el Holoceno, momento en el que se establece el actual patrón de lluvias en América del Norte (Thompson y Anderson, 2000; Hernández, 2006; Metcalfe, 2006). Es un hecho que los cambios climáticos pasados generaron modificaciones en la distribución de las comunidades vegetales del Desierto Chihuahuense, es por ello que éstas son un buen modelo para analizar los posibles efectos del CC futuro sobre la biodiversidad.

### II.5.1. Desierto Chihuahuense.

El Desierto Chihuahuense se considera entre las 37 regiones del mundo que cuentan con grandes extensiones geográficas con baja perturbación y con una superficie estimada de 507 000 km<sup>2</sup>, siendo el desierto más extenso de América del Norte (Hernández, 2006). Se encuentra en la parte septentrional del Altiplano entre los 1 000 y 2 200 m de altitud, abarcando la mayor parte de los estados de Chihuahua, Coahuila, Nuevo León, Zacatecas, Durango, Aguascalientes y San Luis Potosí, Querétaro e Hidalgo en México, y el suroeste de los Estados Unidos de América en Arizona, Nuevo México y Texas (Bravo-Hollis, 1978). Con base en el análisis de los patrones de distribución de las especies endémicas de cactáceas, Hernández y Gómez-Hinostrosa (2005) proponen una delimitación que incluye tres subregiones (Subregión principal, Subregión oriental y Subregión meridional) (Figura II).

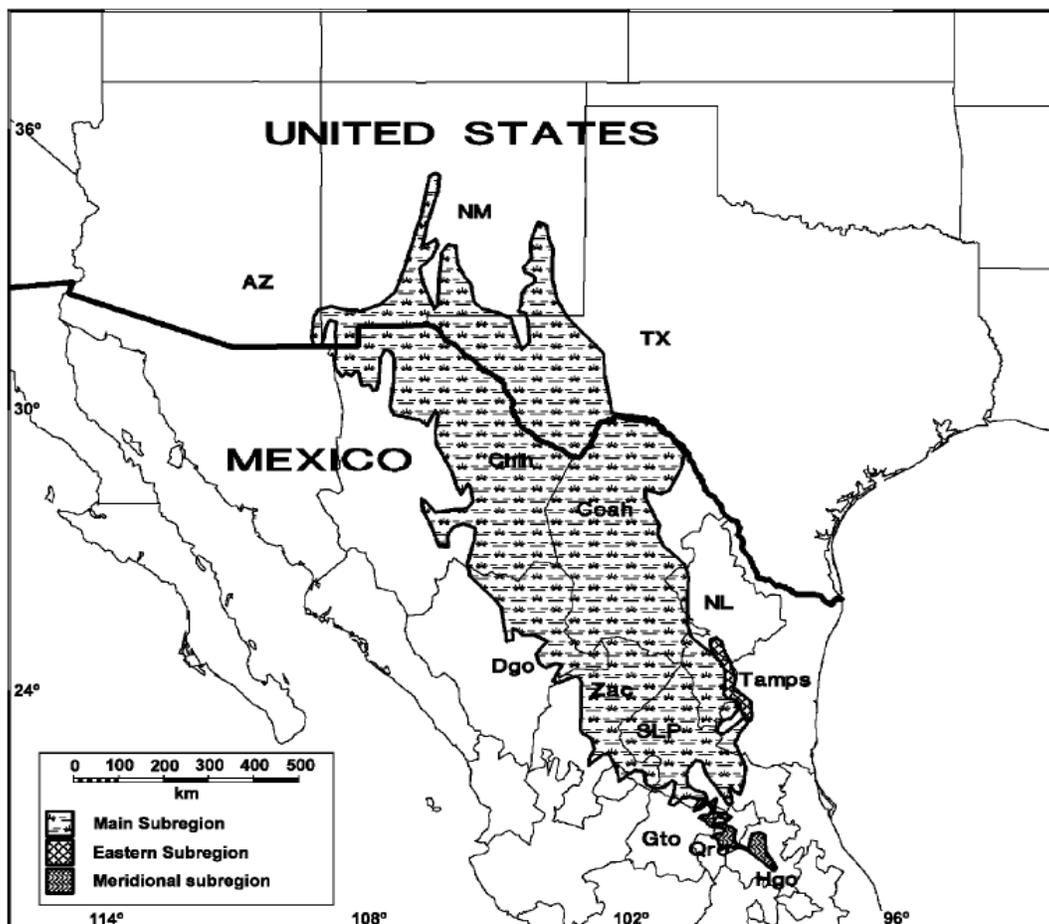


Figura II. Desierto Chihuahuense (Hernández y Gómez-Hinostrosa, 2005).

El Desierto Chihuahuense es una de las áreas con climas áridos con más alta diversidad biológica en el mundo. Por su alta riqueza y numerosas especies endémicas, es considerado como una de las tres ecorregiones desérticas más importantes del mundo (Hernández, 2006). Igualmente a nivel mundial, es la región donde habita el más rico ensamble de especies de la familia Cactaceae (Hernández *et al.*, 2004).

Su vegetación está integrada por matorrales desérticos micrófilos, matorrales desérticos rosetófilos, matorrales crasicaules y pastizales (Rzedowski, 1968), donde se estima que existen más de siete mil diferentes variedades de plantas, predominando especímenes de las siguientes familias: Ephedraceae, Pinaceae, Euphorbiaceae, Crassulaceae, Agavaceae, Zygophyllaceae y Cactaceae (Bravo-Hollis, 1978). En lo que se refiere a fauna Mittermeir *et al.*, (2002) reportan al menos 176 especies de mamíferos 325 de aves, 46 anfibios y 156 reptiles. De acuerdo con Hernández (2006), entre los mamíferos presentes en el Desierto Chihuahuense están numerosas especies de roedores y lagomorfos, el venado bura (*Odocoileus hemionus*), berrendo (*Antilocapra americana*), gato montés (*Felis rufus*), el puma (*Puma concolor*), perrito de la pradera (*Cynomys mexicanus*) y el coyote (*Canis latrans*).

La diversidad biológica del Desierto Chihuahuense enfrenta diversos problemas ecológicos: la remoción total de la vegetación para abrir tierras a la agricultura y la ganadería; extracción de especímenes para venta y comercio; saqueo especializado por parte de coleccionistas, además de la cacería inmoderada (Hernández-Oria *et al.*, y Hernández 2006). Otro factor que se estima afectará el desarrollo y sobrevivencia de las especies del Desierto Chihuahuense, es el CC al influir en la disponibilidad de humedad y nutrientes del suelo y favorecer perturbaciones; además de ser considerado un factor negativo para la sobrevivencia de las comunidades del Desierto Chihuahuense.

### **III. Justificación**

El Desierto Chihuahuense es considerado como una de las tres ecorregiones desérticas más importantes a nivel mundial, presenta un alto número de endemismos, y es área de distribución de gran diversidad de especies vegetales y animales, mismas que están sujetas a diversos factores de presión (natural y antropogénicos) siendo uno de ellos el cambio climático.

El cambio climático puede generar cambios en el paisaje, modificando los ecosistemas y alterando la distribución de sus especies, las relaciones entre ellas, así como sus hábitats; por lo que realizar evaluaciones de los efectos del cambio climático sobre la distribución de algunas de las especies (vegetales y roedores) presentes en el Desierto Chihuahuense es una importante aportación al conocimiento de las dinámicas biológicas y su relación con los distintos elementos del sistema climático; además de ser una herramienta útil en la formulación de estrategias de conservación y manejo en la zona.

#### **IV. Objetivos**

##### **IV.1 Objetivo general**

- ✓ Estimar el potencial de cambio de las áreas de distribución de especies vegetales y de roedores de matorral xerófilo pertenecientes al Desierto Chihuahuense, como resultado del cambio climático.

##### **IV.2. Objetivos particulares**

- ✓ Modelar y cuantificar los cambios en las áreas de distribución de algunas especies vegetales pertenecientes a las familias Agavaceae, Cactaceae, Fouquieriaceae, Liliaceae, y Zygophyllaceae, presentes en el Desierto Chihuahuense, bajo los escenarios de cambio climático A2 y B2, en los horizontes de tiempo 2050 y 2080.
- ✓ Modelar y cuantificar los cambios en las áreas de distribución de especies de algunos mamíferos pertenecientes a las familias Cricetidae, Muridae y Heteromyidae, presentes en el Desierto Chihuahuense, bajo los escenarios de cambio climático A2 y B2, en los horizontes de tiempo 2050 y 2080.
- ✓ Identificar las especies con potencial a sufrir cambios significativos en su área de distribución.

## **V. Material y método**

El presente análisis se desarrolló en tres etapas:

- V.1.** Construcción de una base de datos con los registros georreferenciados que describen la distribución conocida de cada especie.
  
- V.2.** Generación de modelos de nicho ecológico de las especies, actuales y futuros.
  
- V.3.** Cuantificación y evaluación de los cambios potenciales en el área de distribución de cada especie.

## **V.1. Base de datos**

Para la definición de la lista de taxones analizados, el criterio utilizado fue que presentarían amplia congruencia geográfica con el Desierto Chihuahuense, por lo que en la mayoría de los casos se trata de taxones estrictamente endémicos. Se construyó una base de datos (BD) para las especies (Ver Cuadro I), considerando los puntos de recolecta resguardados en diferentes colecciones biológicas, bases de datos en línea, bases de datos de instituciones de gobierno, así como bases de datos de especialistas. Para el caso de las especies de cactáceas se utilizó la base de datos del Dr. Héctor Hernández M., jefe del laboratorio de cactáceas en el Instituto de Biología, UNAM; para los mamíferos los registros fueron obtenidos de la base de datos MamNA (Escalante y Rodríguez-Tapia, 2011); mientras que para el resto de las especies los registros fueron solicitados a distintos portales web (GBIF, [www.gbif.org/](http://www.gbif.org/), Tropicos, [www.tropicos.org/](http://www.tropicos.org/) y REMIB [http://www.conabio.gob.mx/remib/doctos/remib\\_esp.html](http://www.conabio.gob.mx/remib/doctos/remib_esp.html), además de realizar una solicitud de información a la CONABIO. Todas las georreferencias obtenidas hasta este momento fueron validadas por expertos en los diferentes taxones y verificadas bibliográficamente.

Se obtuvieron 4 095 registros georreferenciados para las 36 especies de vegetación y 2 102 de cinco especies de roedores, lo que suma un total de 6 197 registros para 41 especies. Una vez verificados y validados, los registros fueron visualizados a través del Sistema de Información Geográfica (SIG) ArcView 3.2, obteniendo mapas puntuales de ocurrencia.

### *V.I.I Delimitación del área de estudio*

El polígono del Desierto Chihuahuense utilizado se elaboró a partir de las ecorregiones terrestres de México (INEGI, CONABIO e INE, 2008) y el polígono del Desierto Chihuahuense propuesto por el fondo mundial para la naturaleza (WWF, por sus siglas en inglés) ([www.wwf.org.mx/wwfmex/](http://www.wwf.org.mx/wwfmex/)).

Cuadro I. Lista de especies analizadas.

|    | <b>Familia</b>            | <b>Especie</b>                        | <b>Registros</b>            |
|----|---------------------------|---------------------------------------|-----------------------------|
| 1  | <b>Agavaceae</b>          | <i>Agave lechuguilla</i>              | 59                          |
| 2  | <b>Cactaceae</b>          | <i>Ariocarpus fissuratus</i>          | 154                         |
| 3  |                           | <i>Ariocarpus retusus</i>             | 151                         |
| 4  |                           | <i>Astrophytum capricorne</i>         | 37                          |
| 5  |                           | <i>Astrophytum myriostigma</i>        | 122                         |
| 6  |                           | <i>Astrophytum ornatum</i>            | 43                          |
| 7  |                           | <i>Coryphanta erecta</i>              | 66                          |
| 8  |                           | <i>Echinocereus pentalophus</i>       | 285                         |
| 9  |                           | <i>Ferocactus glaucescens</i>         | 16                          |
| 10 |                           | <i>Ferocactus pilosus</i>             | 202                         |
| 11 |                           | <i>Grusonia bradtiana</i>             | 11                          |
| 12 |                           | <i>Leuchtenbergia principis</i>       | 50                          |
| 13 |                           | <i>Lophophora williamsii</i>          | 114                         |
| 14 |                           | <i>Mammillaria bocasana</i>           | 60                          |
| 15 |                           | <i>Mammillaria compressa</i>          | 121                         |
| 16 |                           | <i>Mammillaria elongata</i>           | 32                          |
| 17 |                           | <i>Mammillaria formosa</i>            | 216                         |
| 18 |                           | <i>Mammillaria longimamma</i>         | 27                          |
| 19 |                           | <i>Mammillaria muehlenpfordtii</i>    | 19                          |
| 20 |                           | <i>Mammillaria pottsii</i>            | 94                          |
| 21 |                           | <i>Mammilloidia candida</i>           | 218                         |
| 22 |                           | <i>Opuntia stenopetala</i>            | 279                         |
| 23 |                           | <i>Sclerocactus mariposensis</i>      | 27                          |
| 24 |                           | <i>Sclerocactus papyracanthus</i>     | 23                          |
| 25 |                           | <i>Stenocactus coptonogonus</i>       | 30                          |
| 26 |                           | <i>Thelocactus conothelos</i>         | 77                          |
| 27 |                           | <i>Thelocactus hexaedrophorus</i>     | 108                         |
| 28 |                           | <i>Thelocactus rinconensis</i>        | 15                          |
| 29 |                           | <i>Turbinicarpus pseudopectinatus</i> | 26                          |
| 30 |                           | <i>Turbinicarpus schmiedickeanus</i>  | 63                          |
| 31 |                           | <b>Fouquieriaceae</b>                 | <i>Fouquieria splendens</i> |
| 32 | <i>Fouquieria shrevei</i> |                                       | 14                          |
| 33 | <b>Liliaceae</b>          | <i>Dasyilirion wheeleri</i>           | 122                         |
| 34 |                           | <i>Yucca elata</i>                    | 141                         |
| 35 |                           | <i>Yucca torreyi</i>                  | 47                          |
| 36 | <b>Zygophyllaceae</b>     | <i>Larrea tridentata</i>              | 698                         |
| 37 | <b>Cricetidae</b>         | <i>Peromyscus nasutus</i>             | 98                          |
| 38 |                           | <i>Peromyscus pectoralis</i>          | 791                         |
| 39 |                           | <i>Sigmodon ochrognathus</i>          | 124                         |
| 40 | <b>Heteromyidae</b>       | <i>Chaetodipus nelsoni</i>            | 744                         |
| 41 | <b>Muridae</b>            | <i>Onychomys arenicola</i>            | 345                         |

## **V.2. Modelos de nicho ecológico**

A partir de los registros georreferenciados de la BD y capas digitales de variables abióticas se obtuvieron modelos de distribución de cada una de las especies MaxEnt. Este algoritmo, es catalogado como un método de inteligencia artificial el cual se basa en el principio de máxima entropía para calcular la distribución geográfica más probable para una especie, donde el modelo resultante, expresa el valor de idoneidad (con valores continuos de 0-1, para cada una de las celdas) para el establecimiento de la especie; siendo la idoneidad, una función de entre las variables ambientales y topográficas, con los datos de presencia (Phillips *et al.*, 2006). MaxEnt se corrió con los siguientes criterios: 80% de los registros de ocurrencia como puntos de entrenamiento y 20% como puntos de validación, 1000 iteraciones para cada corrida y 20 replicas, desactivación de clamping y extrapolación, lo anterior con la finalidad de mantener constantes los valores extremos de las variables que tengan un rango diferente en condiciones climáticas futuras. Para efectos del presente trabajo, solo se trabajó con el modelo promedio.

Las capas digitales climáticas actuales fueron obtenidas del portal electrónico WorldClim ([www.worldclim.org/](http://www.worldclim.org/)), las cuales son derivadas de valores mensuales de precipitación, temperatura máxima y mínima y que representan el comportamiento del clima para el periodo comprendido de 1950-2000 (Hijmans *et al.*, 2005). En el caso de las capas de tiempos futuros se emplearon las variables ambientales correspondientes a las familias de emisiones de gases de efecto invernadero A2 y B2 (IPCC, 2000), obtenidas del portal de datos climáticos CCAFS (<http://www.ccafs-climate.org/data/>) tomando como base el modelo de circulación general (MCG) CGCM2 (ver Cuadro II). Ambas familias se enfocan en un desarrollo regional, considerando valores intermedios de crecimiento de GEI y han sido empleadas en estudios de impacto por cambio y variabilidad climática para México (Conde *et al.*, 2006). Mientras que las topográficas, fueron obtenidas del portal USGS ([eros.usgs.gov](http://eros.usgs.gov)). Todas las capas digitales cuentan con una resolución espacial de treinta segundos de arco.

Se considera que el MCG CGCM2 es un buen indicador para los modelos de cambio climático en América del Norte (Sawada *et al.*, 2004), además ha sido utilizado por autores como Chu *et al.*, (2005), Ochoa-Ochoa *et al.*, (2012) y Kim *et al.*, (2002) para evaluar diferentes aspectos de la biodiversidad presente en esta zona.

*Cuadro II. Características de los escenarios A2 y B2 (IPCC, 2000).*

| <b>Escenario A2</b>  | <b>Escenario B2</b>  |
|--|--|
| Este escenario describe un mundo muy heterogéneo. Sus características más distintivas son la autosuficiencia y la conservación de las identidades locales.   | El escenario B2 describe un mundo en el que predominan las soluciones locales a la sostenibilidad económica, social y medioambiental.  |
| Las pautas de fertilidad en el conjunto de las regiones convergen muy lentamente, con lo que se obtiene una población mundial en continuo crecimiento.   | Es un mundo cuya población aumenta progresivamente a un ritmo menor que en A2, con unos niveles de desarrollo económico intermedios, y con un cambio tecnológico menos rápido y más diverso. |
| El desarrollo económico está orientado básicamente a las regiones, y el crecimiento económico por habitante así como el cambio tecnológico están más fragmentados y son más lentos que en otras líneas evolutivas. | Aunque este escenario está también orientado a la protección del medio ambiente y a la igualdad social, se centra principalmente en los niveles local y regional.                            |

De acuerdo con diversos autores (Araujo y Guisan, 2006; Guisan *et al.*, 2006; Václavík *et al.*, 2012) una de las principales problemáticas ligada a la generación de modelos es la autocorrelación de las variables ambientales. El proceso de selección de variables es especialmente relevante cuando el objetivo del modelo es evaluar cambios en los parámetros que caracterizan una especie respecto a otra(s) o bien entre sitios o condiciones climáticas representativas de distintos escenarios; ya que las inferencias de cambio son dependientes del conjunto de datos ambientales utilizados (Peterson, 2011). Esta selección puede lograrse a través del análisis de las correlaciones entre las variables, donde se realiza la eliminación de aquellas que presenten una alta correlación (información redundante), evitando así el sobreajuste del modelo (Peterson *et al.*, 2007).

Lo anterior es especialmente relevante cuando lo que se busca es proyectar dicha caracterización a distintas situaciones geográficas o climáticas (Peterson, 2011). Entre los estudios que bajo escenarios de cambio, ya sea climático o geográfico, ajustan el conjunto de variables a partir de un análisis de correlaciones, destacan los de Martínez-Meyer y Peterson (2006); Elith *et al.* (2010); Nenzén y Araujo (2011); Synes y Osborne (2011); entre otros.

Los conjuntos de variables utilizados en los ENM fueron definidos a partir de un análisis de correlación de Spearman, y de un análisis de componentes principales (ACP), en el software estadístico de uso libre R Project (ver anexo I). Adicionalmente al ACP se realizó una prueba de Jackknife, en MaxEnt, donde en cada oportunidad se excluye una variable y se crea un modelo de las restantes (Phillips *et al.*, 2004), este procedimiento permite identificar la contribución única de cada variable al modelo, el resultado de esta prueba permitió identificar aquellas variables que por proporcionar información única es recomendable no eliminar, evitando el desajuste y pérdida del poder de predicción de los modelos.

El conjunto de variables resultantes de la selección fue la siguiente: para especies vegetales, temperatura promedio anual (Bio1), estacionalidad de la temperatura (Bio4), temperatura máxima promedio del periodo más cálido (Bio5), temperatura promedio del cuatrimestre más cálido (Bio10), temperatura promedio del cuatrimestre más frío (Bio11), precipitación anual (Bio12), precipitación del periodo más lluvioso (Bio13) y precipitación del cuatrimestre más seco (Bio17). En el caso de los roedores, temperatura promedio anual (Bio1), isothermalidad (Bio3), estacionalidad de la temperatura (Bio4), temperatura promedio del cuatrimestre más cálido (Bio10), temperatura promedio del cuatrimestre más frío (Bio11), precipitación anual (Bio12) y precipitación del cuatrimestre más seco (Bio17).

Para estimar la capacidad de predicción de cada modelo, se utilizó el criterio de área bajo la curva (AUC), el cual representa la capacidad de discriminación de una presencia contra la capacidad de discriminación de una ausencia (Dodd y Pepe 2003). El AUC indica para un punto de presencia y uno aleatorio seleccionados al azar, la probabilidad de que el valor de idoneidad previsto por el modelo para el punto de presencia sea mayor que el previsto para el punto aleatorio. Es una medida directa de la capacidad de discriminación del modelo, que toma valores próximos a 1 cuando existe un buen ajuste con los datos de evaluación (Phillips y Dudik, 2008), donde modelos con buena precisión tienen valores entre 0.7 y 0.9, de acuerdo con lo anterior, se consideró como valor mínimo el 0.8 (Thullier *et al.*, 2009).

Los modelos resultantes fueron refinados con el valor de probabilidad de presencia asociado al 10 percentil y transformados en mapas binarios, donde 1 denota presencia y 0 ausencia. Este umbral representa que, por lo menos el diez por ciento de los datos utilizados son susceptibles a error. Todos los mapas fueron visualizados y manipulados a través del SIG ArcView 3.2.

### **V.3. Cuantificación y evaluación de las modificaciones a la distribución de las especies como efecto del cambio climático.**

Para determinar el porcentaje de cambio en la distribución de las especies, se cuantificó el número de píxeles de presencia obtenido por cada ENM, y se les aplicó la siguiente fórmula: **% de cambio** =  $(t1-t0/t0) \times 100$ , donde de acuerdo con Gutiérrez Estrada, (2010)  $t0$  denota el número de píxeles de presencia para el tiempo actual y  $t1$ , el número de píxeles de presencia para cada horizonte de tiempo (2050 y 2080), este procedimiento se efectuó para cada especie, para los distintos tiempos y para ambos escenarios.

De acuerdo con los resultados de dicha cuantificación, las especies estudiadas fueron clasificadas en cuatro patrones de respuesta: **ganancia**, incluyendo a aquellas especies que presentaron incrementos en su área de distribución mayores al 5% respecto al tiempo actual, **pérdida**, incluyó a aquellas especies que presentaron disminuciones en su área de distribución menores al 5% respecto al tiempo actual; **cambio no significativo**, patrón de respuesta referido a aquellas especies que no mostraron modificaciones mayores a al 5% de su actual área de distribución actual.; y finalmente **inestable**, que incluye a aquellas especies que mostraron ganancias o pérdidas de manera alternada para los diferentes tiempos y escenarios.

## VI. Resultados

### VI.1. Distribución actual

A continuación se muestran los mapas de ocurrencia para las especies analizadas agrupadas por familias con base en los puntos de recolecta de la BD.

#### Vegetales

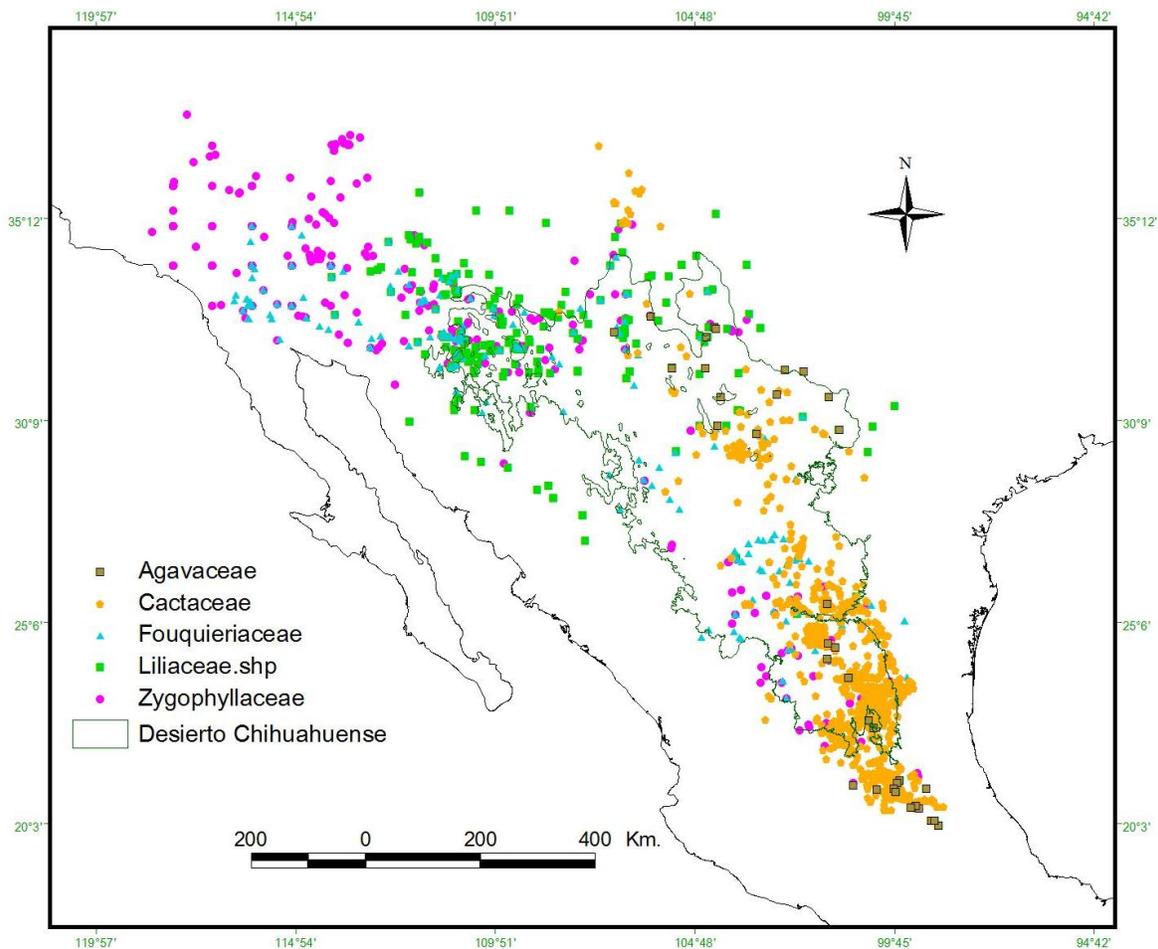
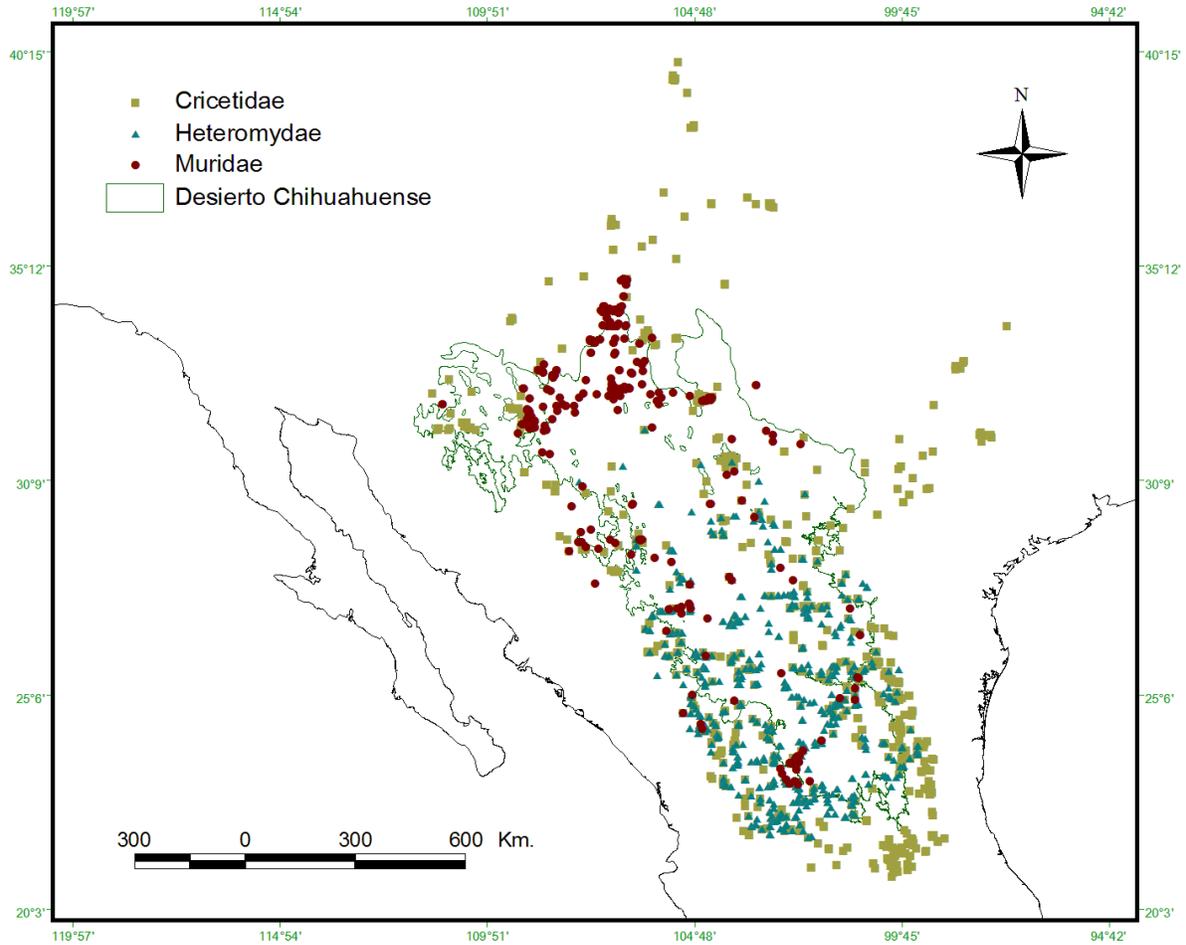


Figura III. Mapa de ocurrencia de las familias Agavaceae (1 especie) Cactaceae (29 especies) Fouquieriaceae (2 especies) Liliaceae (3 especies) y Zygothylaceae (1 especie).

**Roedores**



*Figura IV. Mapa de ocurrencia de las familias Cricetidae (3 especies), Heteromyidae (1 especie) y Muridae (1 especie).*

## VI.2 Modelos de distribución actual

La distribución potencial obtenida por los modelos fue coincidente con los límites de distribución conocida de cada una de las especies, como por ejemplo, el caso de *Larrea tridentata*, y *Sigmodon ochrognathus*, donde los modelos de distribución coincidían con lo reportado por la literatura y para todos los casos, presentaron valores de AUC mayores a 0.85 (Ver Cuadro III y IV). Este comportamiento se presentó en todas las especies, de modo que ninguno de estos arrojó distribuciones inconsistentes. En la Cuadro III y IV se presentan las cuantificaciones del número de píxeles (Km<sup>2</sup>) para cada especie de vegetación y roedores.

### Vegetales

*Cuadro III. Cuantificación del área de distribución potencial actual para las especies vegetales.*

| <b>Familia</b>             | <b>Especie</b>                     | <b>Km<sup>2</sup></b> | <b>AUC</b> |
|----------------------------|------------------------------------|-----------------------|------------|
| <b>Agavaceae</b>           | <i>Agave lechuguilla</i>           | 1,364,690             | 0.967      |
| <b>Cactaceae</b>           | <i>Ariocarpus fissuratus</i>       | 775,552               | 0.985      |
|                            | <i>Ariocarpus retusus</i>          | 130,455               | 0.991      |
|                            | <i>Astrophytum capricorne</i>      | 60,721                | 0.999      |
|                            | <i>Astrophytum myrostigma</i>      | 32,379                | 0.995      |
|                            | <i>Astrophytum ornatun</i>         | 48,070                | 0.988      |
|                            | <i>Coryphanta erecta</i>           | 46,551                | 0.993      |
|                            | <i>Echinocereus pentalophus</i>    | 144,990               | 0.989      |
|                            | <i>Ferocactus glaucescens</i>      | 712,541               | 0.985      |
|                            | <i>Ferocactus pilosus</i>          | 66,422                | 0.99       |
|                            | <i>Grusonia bradtiana</i>          | 421,807               | 0.974      |
|                            | <i>Leuchtenbergia principis</i>    | 88,154                | 0.997      |
|                            | <i>Lophophora williamsii</i>       | 479,267               | 0.991      |
|                            | <i>Mammillaria bocasana</i>        | 24,999                | 0.997      |
|                            | <i>Mammillaria compressa</i>       | 50,778                | 0.991      |
|                            | <i>Mammillaria elongata</i>        | 60,206                | 0.990      |
|                            | <i>Mammillaria formosa</i>         | 85,343                | 0.989      |
|                            | <i>Mammillaria longimamma</i>      | 379,181               | 0.996      |
|                            | <i>Mammillaria muehlenpfordtii</i> | 88,923                | 0.999      |
|                            | <i>Mammillaria pottsii</i>         | 354,156               | 0.990      |
|                            | <i>Mammilloidia candida</i>        | 35,520                | 0.990      |
| <i>Opuntia stenopetala</i> | 112,034                            | 0.988                 |            |

Cuadro III. Cuantificación del área de distribución potencial actual para las especies vegetales (Continuación).

| <b>Familia</b>        | <b>Especie</b>                       | <b>Km<sup>2</sup></b> | <b>AUC</b> |
|-----------------------|--------------------------------------|-----------------------|------------|
|                       | <i>Sclerocactus mariposensis</i>     | 133,586               | 0.994      |
|                       | <i>Sclerocactus papyracanthus</i>    | 722,278               | 0.992      |
|                       | <i>Stenocactus coptonogus</i>        | 66,824                | 0.997      |
|                       | <i>Thelocactus conothelos</i>        | 30,561                | 0.997      |
|                       | <i>Thelocactus hexaedrophorus</i>    | 88,544                | 0.993      |
|                       | <i>Thelocactus rinconensis</i>       | 184,826               | 0.996      |
|                       | <i>Turbincarpus pseudopectinatus</i> | 33,645                | 0.998      |
|                       | <i>Turbincarpus schmiedickeanus</i>  | 48,929                | 0.997      |
| <b>Fouquieriaceae</b> | <i>Fouquieria splendens</i>          | 1,481,776             | 0.964      |
|                       | <i>Fouquieria shrevei</i>            | 116,434               | 0.994      |
| <b>Liliaceae</b>      | <i>Dasyilirion wheeleri</i>          | 2,104,618             | 0.976      |
|                       | <i>Yucca elata</i>                   | 1,146,527             | 0.976      |
|                       | <i>Yucca torreyi</i>                 | 1,175,270             | 0.986      |
| <b>Zygophyllaceae</b> | <i>Larrea tridentata</i>             | 1,256,510             | 0.960      |

### Roedores

Cuadro IV. Cuantificación del área de distribución actual para las especies de roedores

| <b>Familia</b>      | <b>Especie</b>               | <b>Km<sup>2</sup></b> | <b>AUC</b> |
|---------------------|------------------------------|-----------------------|------------|
| <b>Cricetidae</b>   | <i>Peromyscus nasutus</i>    | 1,815,187             | 0.972      |
|                     | <i>Peromyscus pectoralis</i> | 1,337,471             | 0.941      |
|                     | <i>Sigmodon ochrognathus</i> | 784,847               | 0.980      |
| <b>Heteromyidae</b> | <i>Chaetodipus nelsoni</i>   | 721,555               | 0.961      |
| <b>Muridae</b>      | <i>Onychomys arenicola</i>   | 868,298               | 0.967      |

### **VI.3 Modelos de distribución a futuro**

#### **VI.3.1 Escenario A2: Horizontes de tiempo 2050 y 2080**

**Plantas.-** Para el primer periodo de tiempo analizado (actual-2050) las respuestas de las especies se clasificaron en cambio positivo y negativo, en 25 de las 36 especies el sentido del cambio fue positivo, llegando a registrar valores de hasta 111.984% (*Sclerocactus papyracanthus*); para 11 de las especies el sentido del cambio fue negativo, llegando a registrar valores de hasta el -21.416% (*Grusonia bradtiana*). Para el siguiente horizonte de tiempo (actual-2080), el porcentaje de cambio para 20 de las especies fue positivo, con valores de hasta un 104.835% (*S. papyracanthus*), mientras que para 16 de las especies el sentido del cambio fue negativo, llegando a ser de hasta un -43.188% (*Mammillaria longimamma*) (ver Cuadro V).

**Roedores.-** Para el primer periodo de tiempo analizado (actual-2050) *Peromyscus pectoralis* registró cambios positivos (16.666%); *Peromyscus nasutus* y *Onychomys arenicola* registraron porcentajes de cambio negativos (-22.605 y -7.770 respectivamente); para *Sigmodon ochrognathus* y *Chaetodipus nelsoni* los porcentajes de cambio no fueron significativos. Para el periodo de tiempo actual-2080, *P. pectoralis* y *S. Ochrognathus* registraron porcentajes de cambio positivo (18.212 y 14.118 respectivamente) *P. nasutus*, *C. nelsoni* y *O. arenicola* presentaron porcentajes de cambio negativos, llegando a ser de hasta el -28.907 (*P. nasutus*) (ver Cuadro VI).

Cuadro V. Cuantificación y porcentaje de cambio en el área de distribución de las especies vegetales para los horizontes de tiempo 2050 y 2080, escenario A2.

| <b>Familia</b>   | <b>Especie</b>                     | <b>2050<br/>(Km<sup>2</sup>)</b> | <b>%<br/>de cambio</b> | <b>2080<br/>(Km<sup>2</sup>)</b> | <b>%<br/>de cambio</b> |
|------------------|------------------------------------|----------------------------------|------------------------|----------------------------------|------------------------|
| <b>Agavaceae</b> | <i>Agave lechuguilla</i>           | 1,583,116                        | 16.006                 | 1,306,316                        | -4.277                 |
| <b>Cactaceae</b> | <i>Ariocarpus fissuratus</i>       | 805,601                          | 3.875                  | 674,004                          | -13.094                |
|                  | <i>Ariocarpus retusus</i>          | 152,225                          | 16.688                 | 154,681                          | 18.570                 |
|                  | <i>Astrophytum capricorne</i>      | 54,366                           | -10.466                | 48,421                           | -20.257                |
|                  | <i>Astrophytum myrostigma</i>      | 34,000                           | 5.006                  | 51,802                           | 59.986                 |
|                  | <i>Astrophytum ornatun</i>         | 50,997                           | 6.089                  | 58,192                           | 21.057                 |
|                  | <i>Coryphanta erecta</i>           | 59,457                           | 27.724                 | 47,323                           | 1.658                  |
|                  | <i>Echinocereus pentalophus</i>    | 163,117                          | 12.502                 | 166,341                          | 14.726                 |
|                  | <i>Ferocactus glaucescens</i>      | 844,166                          | 18.473                 | 811,235                          | 13.851                 |
|                  | <i>Ferocactus pilosus</i>          | 62,484                           | -5.929                 | 60,147                           | -9.447                 |
|                  | <i>Grusonia bradtiana</i>          | 331,474                          | -21.416                | 243,335                          | -42.311                |
|                  | <i>Leuchtenbergia principis</i>    | 92,375                           | 4.788                  | 89,441                           | 1.460                  |
|                  | <i>Lophophora williamsii</i>       | 524,639                          | 9.467                  | 502,604                          | 4.869                  |
|                  | <i>Mammillaria bocasana</i>        | 27,898                           | 11.596                 | 15,981                           | -36.073                |
|                  | <i>Mammillaria compressa</i>       | 83,660                           | 64.756                 | 51,781                           | 1.975                  |
|                  | <i>Mammillaria elongata</i>        | 69,089                           | 14.754                 | 62,453                           | 3.732                  |
|                  | <i>Mammillaria formosa</i>         | 90,742                           | 6.326                  | 78,104                           | -8.482                 |
|                  | <i>Mammillaria longimamma</i>      | 387,311                          | 2.144                  | 215,422                          | -43.188                |
|                  | <i>Mammillaria muehlenpfordtii</i> | 149,840                          | 68.505                 | 103,091                          | 15.933                 |

Cuadro V. Cuantificación y porcentaje de cambio en el área de distribución de las especies vegetales para los horizontes de tiempo 2050 y 2080, escenario A2  
 (continuación).

| <b>Familia</b>        | <b>Especie</b>                        | <b>2050<br/>(Km<sup>2</sup>)</b> | <b>%<br/>de cambio</b> | <b>2080<br/>(Km<sup>2</sup>)</b> | <b>%<br/>de cambio</b> |
|-----------------------|---------------------------------------|----------------------------------|------------------------|----------------------------------|------------------------|
| <b>Cactaceae</b>      | <i>Mammillaria pottsii</i>            | 335,422                          | -5.290                 | 316,466                          | -10.642                |
|                       | <i>Mammilloidya candida</i>           | 43,787                           | 23.274                 | 32,940                           | -7.264                 |
|                       | <i>Opuntia stenopetala</i>            | 91,705                           | -18.145                | 115,381                          | 2.987                  |
|                       | <i>Sclerocactus mariposensis</i>      | 120,957                          | -9.454                 | 115,878                          | -13.256                |
|                       | <i>Sclerocactus papyracanthus</i>     | 1,531,117                        | 111.984                | 1,479,479                        | 104.835                |
|                       | <i>Stenocactus coptonogus</i>         | 78,021                           | 16.756                 | 79,014                           | 18.242                 |
|                       | <i>Thelocactus conothelos</i>         | 39,907                           | 30.581                 | 36,485                           | 19.384                 |
|                       | <i>Thelocactus hexaedrophorus</i>     | 84,792                           | -4.237                 | 124,445                          | 40.546                 |
|                       | <i>Thelocactus rinconensis</i>        | 304,947                          | 64.991                 | 245,769                          | 32.973                 |
|                       | <i>Turbinicarpus pseudopectinatus</i> | 49,246                           | 46.369                 | 42,636                           | 26.723                 |
|                       | <i>Turbinicarpus schmiedickeanus</i>  | 47,599                           | -2.718                 | 27,978                           | -42.819                |
| <b>Fouquieriaceae</b> | <i>Fouquieria splendens</i>           | 1,284,467                        | -13.316                | 1,427,104                        | -3.690                 |
|                       | <i>Fouquieria shrevei</i>             | 110,341                          | -5.233                 | 91,748                           | -21.202                |
| <b>Liliaceae</b>      | <i>Dasylirion wheeleri</i>            | 1,944,643                        | -7.601                 | 1,989,267                        | -5.481                 |
|                       | <i>Yucca elata</i>                    | 1,152,405                        | 0.513                  | 1,258,295                        | 9.748                  |
|                       | <i>Yucca torreyi</i>                  | 1,243,319                        | 5.790                  | 1,097,906                        | -6.583                 |
| <b>Zygophyllaceae</b> | <i>Larrea tridentata</i>              | 1,710,082                        | 36.098                 | 1,747,120                        | 39.045                 |

Cuadro VI. Cuantificación y porcentaje de cambio en el área de distribución de las especies de roedores para los horizontes de tiempo 2050 y 2080, escenario A2.

| <b>Familia</b>      | <b>Especie</b>               | <b>2050<br/>(Km<sup>2</sup>)</b> | <b>%<br/>de cambio</b> | <b>2080<br/>(Km<sup>2</sup>)</b> | <b>%<br/>de cambio</b> |
|---------------------|------------------------------|----------------------------------|------------------------|----------------------------------|------------------------|
| <b>Cricetidae</b>   | <i>Peromyscus nasutus</i>    | 1,404,890                        | -22.604                | 1,290,472                        | -28.907                |
|                     | <i>Peromyscus pectoralis</i> | 1,560,374                        | 16.666                 | 1,581,053                        | 18.212                 |
|                     | <i>Sigmodon ochrognathus</i> | 812,227                          | 3.489                  | 895,652                          | 14.118                 |
| <b>Heteromyidae</b> | <i>Chaetodipus nelsoni</i>   | 699,406                          | -3.070                 | 683,614                          | -5.258                 |
| <b>Muridae</b>      | <i>Onychomys arenicola</i>   | 800,835                          | -7.770                 | 755,568                          | -12.983                |

### **VI.3.2 Escenario B2: Horizontes de tiempo 2050 y 2080**

**Plantas.-** Para el primer periodo de tiempo analizado (actual-2050) se observa que 22 de las 36 especies vegetales tuvieron porcentajes de cambio positivos, alcanzando hasta un 42.929% (*Larrea tridentata*), para 14 especies el sentido del cambio fue negativo, llegando a ser hasta del -39.747 (*Mammilloya candida*). Para el siguiente horizonte de tiempo (actual-2080), el porcentaje de cambio para 20 especies fue positivo, registrando valores hasta del 137.957% (*Sclerocactus papyracanthus*), mientras que para 16 especies el porcentaje de cambio fue negativo, alcanzando hasta un -38.914% (*Agave lechuguilla*) (ver Cuadro VII).

**Roedores.-** Para el primer horizonte de tiempo (actual-2050), *Peromyscus pectoralis* presentó un porcentaje de cambio positivo (18.581%), en cuanto a aquellas especies con porcentajes de cambio negativos, solo en el caso de *Onychomys arenicola* fue significativo (-13.214%). Para el periodo de tiempo actual-2080, cuatro especies (*Peromyscus nasutus*, *Peromyscus pectoralis*, *Sigmodon ochrognathus* y *Onychomys arenicola*) registraron porcentajes de cambio positivos alcanzando valores de hasta el 27.130% (*P. pectoralis*) (ver Cuadro VIII).

Cuadro VII Cuantificación y porcentaje de cambio en el área de distribución de las especies vegetales para los horizontes de tiempo 2050 y 2080, escenario B2.

| Familia          | Especie                            | 2050<br>(Km <sup>2</sup> ) | % de<br>cambio | 2080<br>(Km <sup>2</sup> ) | % de<br>cambio |
|------------------|------------------------------------|----------------------------|----------------|----------------------------|----------------|
| <b>Agavaceae</b> | <i>Agave lechuguilla</i>           | 1,719,040                  | 25.966         | 833,630                    | -38.914        |
| <b>Cactaceae</b> | <i>Ariocarpus fissuratus</i>       | 803,509                    | 3.605          | 683,817                    | -11.828        |
|                  | <i>Ariocarpus retusus</i>          | 160,449                    | 22.992         | 163,914                    | 25.648         |
|                  | <i>Astrophytum capricorne</i>      | 55,209                     | -9.078         | 66,359                     | 9.285          |
|                  | <i>Astrophytum myrostigma</i>      | 23,002                     | -28.960        | 32,571                     | 0.593          |
|                  | <i>Astrophytum ornatun</i>         | 51,770                     | 7.697          | 91,966                     | 91.317         |
|                  | <i>Coryphanta erecta</i>           | 61,493                     | 32.098         | 57,695                     | 23.939         |
|                  | <i>Echinocereus pentalophus</i>    | 155,289                    | 7.103          | 187,918                    | 29.608         |
|                  | <i>Ferocactus glaucescens</i>      | 854,835                    | 19.970         | 946,236                    | 32.797         |
|                  | <i>Ferocactus pilosus</i>          | 61,622                     | -7.227         | 58,914                     | -11.303        |
|                  | <i>Grusonia bradtiana</i>          | 294,816                    | -30.106        | 333,068                    | -21.038        |
|                  | <i>Leuchtenbergia principis</i>    | 91,118                     | 3.362          | 77,973                     | -11.549        |
|                  | <i>Lophophora williamsii</i>       | 482,344                    | 0.642          | 469,849                    | -1.965         |
|                  | <i>Mammillaria bocasana</i>        | 21,362                     | -14.549        | 23,343                     | -6.624         |
|                  | <i>Mammillaria compressa</i>       | 56,436                     | 11.143         | 68,260                     | 34.428         |
|                  | <i>Mammillaria elongata</i>        | 70,440                     | 16.998         | 90,246                     | 49.895         |
|                  | <i>Mammillaria formosa</i>         | 89,384                     | 4.735          | 84,567                     | -0.909         |
|                  | <i>Mammillaria longimamma</i>      | 232,593                    | -38.659        | 334,747                    | -11.718        |
|                  | <i>Mammillaria muehlenpfordtii</i> | 68,919                     | -22.496        | 88,003                     | -1.035         |
|                  | <i>Mammillaria pottsii</i>         | 297,390                    | -16.029        | 400,936                    | 13.209         |
|                  | <i>Mammilloidia candida</i>        | 49,638                     | 39.747         | 49,005                     | 37.965         |
|                  | <i>Opuntia stenopetala</i>         | 107,109                    | -4.396         | 122,255                    | 9.123          |

Cuadro VII Cuantificación y porcentaje de cambio en el área de distribución de las especies vegetales para los horizontes de tiempo 2050 y 2080, escenario B2 (continuación).

| <b>Familia</b>        | <b>Especie</b>                        | <b>2050<br/>(Km<sup>2</sup>)</b> | <b>% de<br/>cambio</b> | <b>2080<br/>(Km<sup>2</sup>)</b> | <b>% de<br/>cambio</b> |
|-----------------------|---------------------------------------|----------------------------------|------------------------|----------------------------------|------------------------|
| <b>Cactaceae</b>      | <i>Sclerocactus mariposensis</i>      | 133,544                          | -0.031                 | 155,881                          | 16.690                 |
|                       | <i>Sclerocactus papyracanthus</i>     | 907,682                          | 25.669                 | 1,718,714                        | 137.957                |
|                       | <i>Stenocactus coptonogus</i>         | 76,378                           | 14.297                 | 67,455                           | 0.944                  |
|                       | <i>Thelocactus conothelos</i>         | 36,379                           | 19.037                 | 32,948                           | 7.811                  |
|                       | <i>Thelocactus hexaedrophorus</i>     | 82,195                           | -7.170                 | 86,652                           | -2.137                 |
|                       | <i>Thelocactus rinconensis</i>        | 226,989                          | 22.812                 | 293,797                          | 58.959                 |
|                       | <i>Turbinicarpus pseudopectinatus</i> | 39,194                           | 16.493                 | 50,551                           | 50.248                 |
|                       | <i>Turbinicarpus schmidickeanus</i>   | 30,503                           | -37.659                | 36,900                           | -24.585                |
| <b>Fouquieriaceae</b> | <i>Fouquieria shrevei</i>             | 115,196                          | -1.063                 | 79,520                           | -31.704                |
|                       | <i>Fouquieria splendens</i>           | 1,374,890                        | -7.213                 | 1,206,179                        | -18.599                |
| <b>Liliaceae</b>      | <i>Dasyllirion wheeleri</i>           | 2,242,300                        | 6.542                  | 1,697,510                        | -19.344                |
|                       | <i>Yucca elata</i>                    | 1,173,218                        | 2.328                  | 1,185,837                        | 3.429                  |
|                       | <i>Yucca torreyi</i>                  | 1,382,837                        | 17.661                 | 958,996                          | -18.402                |
| <b>Zygophyllaceae</b> | <i>Larrea tridentata</i>              | 1,795,913                        | 42.929                 | 1,587,528                        | 26.344                 |

Cuadro VIII. Cuantificación y porcentaje de cambio en el área de distribución de las especies de roedores para los horizontes de tiempo 2050 y 2080, escenario B2.

| <b>Familia</b>      | <b>Especie</b>               | <b>2050<br/>(Km<sup>2</sup>)</b> | <b>% de<br/>cambio</b> | <b>2080<br/>(Km<sup>2</sup>)</b> | <b>% de<br/>cambio</b> |
|---------------------|------------------------------|----------------------------------|------------------------|----------------------------------|------------------------|
| <b>Cricetidae</b>   | <i>Peromyscus nasutus</i>    | 1,825,921                        | 0.591                  | 1,979,430                        | 9.048                  |
|                     | <i>Peromyscus pectoralis</i> | 1,585,982                        | 18.581                 | 1,700,326                        | 27.130                 |
|                     | <i>Sigmodon ochrognathus</i> | 774,638                          | -1.301                 | 878,323                          | 11.910                 |
| <b>Heteromyidae</b> | <i>Chaetodipus nelsoni</i>   | 711,951                          | -1.331                 | 708,400                          | -1.823                 |
| <b>Muridae</b>      | <i>Onychomys arenicola</i>   | 753,558                          | -13.214                | 919,106                          | 5.851                  |

#### VI.4 Evaluación del cambio

Al analizar la respuesta de las especies con base en sus porcentajes de cambio e integrando ambos periodos de tiempo, estas fueron clasificadas en torno a cuatro patrones: ganancia, pérdida, cambio no significativo e inestable.

##### VI.4.1 Escenario A2

**Ganancia.-** Del total de especies analizadas, 19 fueron catalogadas bajo este patrón de respuesta, de las cuales 10 (*Ariocarpus retusus-Para ver modelo, consultar anexo II-*, *Echinocereus pentalophus*, *Ferocactus glaucescens*, *Larrea tridentata*, *Mammillaria muehlenpfordtii*, *Sclerocactus papyracanthus*, *Stenocactus coptonogus*, *Thelocactus conothelos*, *Thelocactus rinconensis* y *Turbinicarpus pseudopectinatus*) presentaron aumentos en sus áreas de distribución, para ambos periodos de tiempo y nueve (*Agave lechuguilla*, *Astrophytum myrostigma*, *Astrophytum ornatum*, *Coryphanta erecta*, *Lophophora williamsii*, *Mammillaria compressa*, *Mammillaria elongata*, *Thelocactus hexaedrophorus* y *Yucca elata*) presentaron incrementos en sus áreas de distribución en solo un horizonte de tiempo, ya sea 2050 o 2080 (ver Cuadro IX).

Cuadro IX. Especies vegetales con patrón de respuesta de ganancia, bajo el escenario A2.

| Espece                             | Actual (Km <sup>2</sup> ) | 2050 (Km <sup>2</sup> ) | % de cambio | 2080 (Km <sup>2</sup> ) | % de cambio |
|------------------------------------|---------------------------|-------------------------|-------------|-------------------------|-------------|
| <i>Agave lechuguilla</i>           | 1,364,690                 | 1,583,116               | 16.006      | 1,306,316               | -4.277      |
| <i>Ariocarpus retusus</i>          | 130,455                   | 152,225                 | 16.688      | 154,681                 | 18.570      |
| <i>Astrophytum myrostigma</i>      | 32,379                    | 34,000                  | 5.006       | 51,802                  | 59.986      |
| <i>Astrophytum ornatun</i>         | 48,070                    | 50,997                  | 6.089       | 58,192                  | 21.057      |
| <i>Coryphanta erecta</i>           | 46,551                    | 59,457                  | 27.724      | 47,323                  | 1.658       |
| <i>Echinocereus pentalophus</i>    | 144,990                   | 163,117                 | 12.502      | 166,341                 | 14.726      |
| <i>Ferocactus glaucescens</i>      | 712,541                   | 844,166                 | 18.473      | 811,235                 | 13.851      |
| <i>Larrea tridentata</i>           | 1,256,510                 | 1,710,082               | 36.098      | 1,747,120               | 39.045      |
| <i>Lophophora williamsii</i>       | 479,267                   | 524,639                 | 9.467       | 502,604                 | 4.869       |
| <i>Mammillaria compressa</i>       | 50,778                    | 83,660                  | 64.756      | 51,781                  | 1.975       |
| <i>Mammillaria elongata</i>        | 60,206                    | 69,089                  | 14.754      | 62,453                  | 3.732       |
| <i>Mammillaria muehlenpfordtii</i> | 88,923                    | 149,840                 | 68.505      | 103,091                 | 15.933      |
| <i>Sclerocactus papyracanthus</i>  | 722,278                   | 1,531,117               | 111.984     | 1,479,479               | 104.835     |
| <i>Stenocactus coptonogus</i>      | 66,824                    | 78,021                  | 16.756      | 79,014                  | 18.242      |

Cuadro IX. Especies vegetales con patrón de respuesta de ganancia, bajo el escenario A2 (Continuación).

| Especie                              | Actual (Km <sup>2</sup> ) | 2050 (Km <sup>2</sup> ) | % de cambio | 2080 (Km <sup>2</sup> ) | % de cambio |
|--------------------------------------|---------------------------|-------------------------|-------------|-------------------------|-------------|
| <i>Thelocactus conothelos</i>        | 30,561                    | 39,907                  | 30.581      | 36,485                  | 19.384      |
| <i>Thelocactus hexaedrophorus</i>    | 88,544                    | 84,792                  | -4.237      | 124,445                 | 40.546      |
| <i>Thelocactus rinconensis</i>       | 184,826                   | 304,947                 | 64.991      | 245,769                 | 32.973      |
| <i>Turbincarpus pseudopectinatus</i> | 33,645                    | 49,246                  | 46.369      | 42,636                  | 26.723      |
| <i>Yucca elata</i>                   | 1,146,527                 | 1,152,405               | 0.513       | 1,258,295               | 9.748       |

En el caso de las especies de roedores, se obtuvo que *Peromyscus pectoralis* registró aumentos en su distribución potencial en ambos tiempos, mientras que *Sigmodon ochrognathu*, registró su mayor incremento para el horizonte de tiempo 2080 (ver Cuadro X).

Cuadro X. Especies de roedores con patrón de respuesta de ganancia, bajo el escenario A2.

| Especie                      | Actual (Km <sup>2</sup> ) | 2050 (Km <sup>2</sup> ) | % de cambio | 2080 (Km <sup>2</sup> ) | % de cambio |
|------------------------------|---------------------------|-------------------------|-------------|-------------------------|-------------|
| <i>Peromyscus pectoralis</i> | 1,337,471                 | 1,560,374               | 16.666      | 1,581,053               | 18.212      |
| <i>Sigmodon ochrognathus</i> | 784,847                   | 812,227                 | 3.489       | 895,652                 | 14.118      |

**Pérdida.-** Este patrón describe el comportamiento de 12 especies vegetales de las cuales siete (*Astrophytum capricorne*, *Dasyilirion wheeleri*, *Ferocactus pilosus*, *Fouquieria shrevei*-Para ver modelo, consultar anexo II-, *Grusonia bradtiana*, *Mammillaria pottsii*, y *Sclerocactus mariposensis*) presentaron pérdidas potenciales para ambos tiempos, mientras que cinco de ellas (*Ariocarpus fissuratus*, *Fouquieria splendens*, *Mammillaria longimamma*, *Opunti stenopetala* y *Turbincarpus schmidickeanus*) presentaron disminuciones en sus áreas de distribución en solo un horizonte de tiempo, ya sea 2050 o 2080 (ver Cuadro XI).

Cuadro XI. Especies vegetales con patrón de respuesta de pérdida, bajo el escenario A2.

| Especie                       | Actual (Km <sup>2</sup> ) | 2050 (Km <sup>2</sup> ) | % de cambio | 2080 (Km <sup>2</sup> ) | % de cambio |
|-------------------------------|---------------------------|-------------------------|-------------|-------------------------|-------------|
| <i>Ariocarpus fissuratus</i>  | 775,552                   | 805,601                 | 3.875       | 674,004                 | -13.094     |
| <i>Astrophytum capricorne</i> | 60,721                    | 54,366                  | -10.466     | 48,421                  | -20.257     |
| <i>Dasyilirion wheeleri</i>   | 2,104,618                 | 1,944,643               | -7.601      | 1,989,267               | -5.481      |
| <i>Ferocactus pilosus</i>     | 66,422                    | 62,484                  | -5.929      | 60,147                  | -9.447      |
| <i>Fouquieria splendens</i>   | 1,481,776                 | 1,284,467               | -13.316     | 1,427,104               | -3.690      |
| <i>Fouquieria shrevei</i>     | 116,434                   | 110,341                 | -5.233      | 91,748                  | -21.202     |

Cuadro XI. Especies vegetales con patrón de respuesta de pérdida, bajo el escenario A2 (Continuación).

| Especie                             | Actual (Km <sup>2</sup> ) | 2050 (Km <sup>2</sup> ) | % de cambio | 2080 (Km <sup>2</sup> ) | % de cambio |
|-------------------------------------|---------------------------|-------------------------|-------------|-------------------------|-------------|
| <i>Grusonia bradtiana</i>           | 421,807                   | 331,474                 | -21.416     | 243,335                 | -42.311     |
| <i>Mammillaria longimamma</i>       | 379,181                   | 387,311                 | 2.144       | 215,422                 | -43.188     |
| <i>Mammillaria pottsii</i>          | 354,156                   | 335,422                 | -5.290      | 316,466                 | -10.642     |
| <i>Opuntia stenopetala</i>          | 112,034                   | 91,705                  | -18.145     | 115,381                 | 2.987       |
| <i>Sclerocactus mariposensis</i>    | 133,586                   | 120,957                 | -9.454      | 115,878                 | -13.256     |
| <i>Turbinicarpus schmidickeanus</i> | 48,929                    | 47,599                  | -2.718      | 27,978                  | -42.819     |

Dos especies de roedores (*Onychomys arenicola* y *Peromyscus nasutus*) registraron pérdidas en su distribución potencial para ambos tiempos, mientras que *Chaetodipus nelsoni*, registró pérdidas por encima del 5% solo para el horizonte de tiempo 2080 (ver Cuadro X).

Cuadro XII. Especies de roedores con patrón de respuesta de pérdida, bajo el escenario A2.

| Especie                    | Actual (Km <sup>2</sup> ) | 2050 (Km <sup>2</sup> ) | % de cambio | 2080 (Km <sup>2</sup> ) | % de cambio |
|----------------------------|---------------------------|-------------------------|-------------|-------------------------|-------------|
| <i>Chaetodipus nelsoni</i> | 721,555                   | 699,406                 | -3.070      | 683,614                 | -5.258      |
| <i>Onychomys arenicola</i> | 868,298                   | 800,835                 | -7.770      | 755,568                 | -12.983     |
| <i>Peromyscus nasutus</i>  | 1,815,187                 | 1,404,890               | -22.604     | 1,290,472               | -28.907     |

**Cambio no significativo.-** La única especie que presentó cambios no significativos bajo este escenario fue *Leuchtenbergia principis*.

Cuadro XIII. Especies vegetales con patrón de respuesta sin cambio significativo, bajo el escenario A2.

| Especie                         | Actual (Km <sup>2</sup> ) | 2050 (Km <sup>2</sup> ) | % de cambio | 2080 (Km <sup>2</sup> ) | % de cambio |
|---------------------------------|---------------------------|-------------------------|-------------|-------------------------|-------------|
| <i>Leuchtenbergia principis</i> | 88,154                    | 92,375                  | 4.788       | 89,441                  | 1.460       |

**Inestable.-** Las especies clasificadas dentro de este patrón mostraron cambios oscilantes para ambos tiempos, es decir aumentos durante el periodo actual-2050 y pérdidas durante el periodo actual-2080 o viceversa. En este caso para cuatro especies (*Mammillaria bocasana-Para ver modelo, consultar anexo II-*, *Mammillaria Formosa*, *Mammilloidia candida* y *Yucca Torreyi*) los cambios para el 2050 reflejan aumentos, mientras que para el 2080 disminuciones potenciales de área (ver Cuadro XIV).

*Cuadro XIV. Especies vegetales con patrón de respuesta inestable, bajo el escenario A2.*

| <b>Especie</b>              | <b>Actual<br/>(Km<sup>2</sup>)</b> | <b>2050<br/>(Km<sup>2</sup>)</b> | <b>% de<br/>cambio</b> | <b>2080<br/>(Km<sup>2</sup>)</b> | <b>% de<br/>cambio</b> |
|-----------------------------|------------------------------------|----------------------------------|------------------------|----------------------------------|------------------------|
| <i>Mammillaria bocasana</i> | 24,999                             | 27,898                           | 11.596                 | 15,981                           | -36.073                |
| <i>Mammillaria formosa</i>  | 85,343                             | 90,742                           | 6.326                  | 78,104                           | -8.482                 |
| <i>Mammilloidya candida</i> | 35,520                             | 43,787                           | 23.274                 | 32,940                           | -7.264                 |
| <i>Yucca torreyi</i>        | 1,175,270                          | 1,243,319                        | 5.790                  | 1,097,906                        | -6.583                 |

#### VI.4.2 Escenario B2

**Ganancia.-** Del total de especies analizadas, 16 fueron catalogadas bajo este patrón de respuesta, de las cuales 13 (*Ariocarpus retusus*, *Astrophytum ornatum*, *Coryphanta erecta*, *Echinocereus pentalophus*, *Ferocactus glaucescens*, *Larrea tridentata*, *Mammillaria compressa*, *Mammillaria elongata*, *Mammilloidya candida*, *Sclerocactus papyracanthus*, *Thelocactus conothelos*, *Thelocactus rinconensis* y *Turbinicarpus pseudopectinatus*) presentaron aumentos, en sus áreas de distribución potencial, para ambos periodos de tiempo y tres (*Opuntia stenopetala*, *Sclerocactus mariposensis* y *Stenocactus coptonogus*) presentaron incrementos en sus áreas de distribución en solo un horizonte de tiempo, ya sea 2050 o 2080 (ver Cuadro XV).

Cuadro XV. Especies vegetales con patrón de respuesta de ganancia, bajo el escenario B2.

| Especie                               | Actual (Km <sup>2</sup> ) | 2050 (Km <sup>2</sup> ) | % de cambio | 2080 (Km <sup>2</sup> ) | % de cambio |
|---------------------------------------|---------------------------|-------------------------|-------------|-------------------------|-------------|
| <i>Ariocarpus retusus</i>             | 130,455                   | 160,449                 | 22.992      | 163,914                 | 25.648      |
| <i>Astrophytum ornatum</i>            | 48,070                    | 51,770                  | 7.697       | 91,966                  | 91.317      |
| <i>Coryphanta erecta</i>              | 46,551                    | 61,493                  | 32.098      | 57,695                  | 23.939      |
| <i>Echinocereus pentalophus</i>       | 144,990                   | 155,289                 | 7.103       | 187,918                 | 29.608      |
| <i>Ferocactus glaucescens</i>         | 712,541                   | 854,835                 | 19.970      | 946,236                 | 32.797      |
| <i>Larrea tridentata</i>              | 1,256,510                 | 1,795,913               | 42.929      | 1,587,528               | 26.344      |
| <i>Mammillaria compressa</i>          | 50,778                    | 56,436                  | 11.143      | 68,260                  | 34.428      |
| <i>Mammillaria elongata</i>           | 60,206                    | 70,440                  | 16.998      | 90,246                  | 49.895      |
| <i>Mammilloidya candida</i>           | 35,520                    | 49,638                  | 39.747      | 49,005                  | 37.965      |
| <i>Opuntia stenopetala</i>            | 112,034                   | 107,109                 | -4.396      | 122,255                 | 9.123       |
| <i>Sclerocactus mariposensis</i>      | 133,586                   | 133,544                 | -0.031      | 155,881                 | 16.690      |
| <i>Sclerocactus papyracanthus</i>     | 722,278                   | 907,682                 | 25.669      | 1,718,714               | 137.957     |
| <i>Stenocactus coptonogus</i>         | 66,824                    | 76,378                  | 14.297      | 67,455                  | 0.944       |
| <i>Thelocactus conothelos</i>         | 30,561                    | 36,379                  | 19.037      | 32,948                  | 7.811       |
| <i>Thelocactus rinconensis</i>        | 184,826                   | 226,989                 | 22.812      | 293,797                 | 58.959      |
| <i>Turbinicarpus pseudopectinatus</i> | 33,645                    | 39,194                  | 16.493      | 50,551                  | 50.248      |

En el caso de las especies de roedores, se obtuvo que *Peromyscus pectoralis* registró aumentos en su distribución potencial en ambos tiempos, mientras que *Peromyscus nasutus* y *Sigmodon ochrignathus*, registraron aumentos solo para el horizonte de tiempo 2050 (ver Cuadro XVI).

Cuadro XVI Especies de roedores con patrón de respuesta de ganancia, bajo el escenario B2.

| Especie                      | Actual (Km <sup>2</sup> ) | 2050 (Km <sup>2</sup> ) | % de cambio | 2080 (Km <sup>2</sup> ) | % de cambio |
|------------------------------|---------------------------|-------------------------|-------------|-------------------------|-------------|
| <i>Peromyscus nasutus</i>    | 1,815,187                 | 1,825,921               | 0.591       | 1,979,430               | 9.048       |
| <i>Peromyscus pectoralis</i> | 1,337,471                 | 1,585,982               | 18.581      | 1,700,326               | 27.130      |
| <i>Sigmodon ochrognathus</i> | 784,847                   | 774,638                 | -1.301      | 878,323                 | 11.910      |

**Pérdida.-** Este patrón describe el comportamiento de 13 especies vegetales de las cuales seis (*Ferocactus pilosus*, *Fouquieria splendens*, *Grusonia bradtiana*, *Mammillaria bocasana*, *Mammillaria longimamma* y *Turbnicarpus schmiedickeanus*) presentaron pérdidas potenciales para ambos tiempos, mientras que siete de ellas (*Ariocarpus fissuratus*, *Astrophytum myrostigma*, *Dasyilirion wheeleri*, *Fouquieria shrevei*, *Leuchtenbergia principis*, *Mammillaria muehlenpfordtii* y *Thelocactus hexaedrophorus*) registraron disminuciones significativas en las áreas de distribución en solo un horizonte de tiempo, ya sea 2050 o 2080 (ver Cuadro XI).

Cuadro XVII. Especies vegetales con patrón de respuesta de pérdida, bajo el escenario B2.

| Especie                             | Actual (Km <sup>2</sup> ) | 2050 (Km <sup>2</sup> ) | % de cambio | 2080 (Km <sup>2</sup> ) | % de cambio |
|-------------------------------------|---------------------------|-------------------------|-------------|-------------------------|-------------|
| <i>Ariocarpus fissuratus</i>        | 775,552                   | 803,509                 | 3.605       | 683,817                 | -11.828     |
| <i>Astrophytum myrostigma</i>       | 32,379                    | 23,002                  | -28.960     | 32,571                  | 0.593       |
| <i>Dasyilirion wheeleri</i>         | 2,104,618                 | 2,242,300               | 6.542       | 1,697,510               | -19.344     |
| <i>Ferocactus pilosus</i>           | 66,422                    | 61,622                  | -7.227      | 58,914                  | -11.303     |
| <i>Fouquieria splendens</i>         | 1,481,776                 | 1,374,890               | -7.213      | 1,206,179               | -18.599     |
| <i>Fouquieria shrevei</i>           | 116,434                   | 115,196                 | -1.063      | 79,520                  | -31.704     |
| <i>Grusonia bradtiana</i>           | 421,807                   | 294,816                 | -30.106     | 333,068                 | -21.038     |
| <i>Leuchtenbergia principis</i>     | 88,154                    | 91,118                  | 3.362       | 77,973                  | -11.549     |
| <i>Mammillaria bocasana</i>         | 24,999                    | 21,362                  | -14.549     | 23,343                  | -6.624      |
| <i>Mammillaria longimamma</i>       | 379,181                   | 232,593                 | -38.659     | 334,747                 | -11.718     |
| <i>Mammillaria muehlenpfordtii</i>  | 88,923                    | 68,919                  | -22.496     | 88,003                  | -1.035      |
| <i>Thelocactus hexaedrophorus</i>   | 88,544                    | 82,195                  | -7.170      | 86,652                  | -2.137      |
| <i>Turbnicarpus schmiedickeanus</i> | 48,929                    | 30,503                  | -37.659     | 36,900                  | -24.585     |

**Cambio no significativo.-** Solo tres especies vegetales (*Lophophora williamsii*, *Mammillaria formosa* y *Yucca elata*) presentaron modificaciones no significativas bajo este escenario, pues sus porcentajes de cambio para cada horizonte de tiempo fueron menores al 5% como se puede ver en

la Cuadro XVIII. Solo una especie de roedor presentó este patrón de respuesta (*Chaetodipus nelsoni*) (ver Cuadro XIX).

Cuadro XVIII. Especies vegetales con patrón de respuesta sin cambio significativo, bajo el escenario B2.

| Especie                      | Actual (Km <sup>2</sup> ) | 2050 (Km <sup>2</sup> ) | % de cambio | 2080 (Km <sup>2</sup> ) | % de cambio |
|------------------------------|---------------------------|-------------------------|-------------|-------------------------|-------------|
| <i>Lophophora williamsii</i> | 479,267                   | 482,344                 | 0.642       | 469,849                 | -1.965      |
| <i>Mammillaria formosa</i>   | 85,343                    | 89,384                  | 4.735       | 84,567                  | -0.909      |
| <i>Yucca elata</i>           | 1,146,527                 | 1,173,218               | 2.328       | 1,185,837               | 3.429       |

Cuadro XIX. Especie de roedor con patrón de respuesta sin cambio significativo, bajo el escenario B2.

| Especie                    | Actual (Km <sup>2</sup> ) | 2050 (Km <sup>2</sup> ) | % de cambio | 2080 (Km <sup>2</sup> ) | % de cambio |
|----------------------------|---------------------------|-------------------------|-------------|-------------------------|-------------|
| <i>Chaetodipus nelsoni</i> | 721,555                   | 711,951                 | -1.331      | 708,400                 | -1.823      |

**Inestable.-** Las especies bajo este patrón de respuesta mostraron cambios oscilantes para ambos tiempos, es decir aumentos durante el periodo actual-2050 y pérdidas durante el periodo actual-2080 como es el caso de *Agave lechuguilla* y *Yucca torreyi*, mientras que *Astrophytum capricorne* y *Mammillaria pottsii*, registraron el comportamiento opuesto, es decir pérdidas potenciales de área para el horizonte de tiempo actual-2050 y ganancias para el periodo actual-2080 (ver Cuadro XX). Sólo una especie de roedor (*Onychomys arenicola*) fue clasificada bajo este patrón de respuesta (ver Cuadro XXI).

Cuadro XX Especies vegetales con patrón de respuesta inestable, bajo el escenario B2.

| Especie                       | Actual (Km <sup>2</sup> ) | 2050 (Km <sup>2</sup> ) | % de cambio | 2080 (Km <sup>2</sup> ) | % de cambio |
|-------------------------------|---------------------------|-------------------------|-------------|-------------------------|-------------|
| <i>Agave lechuguilla</i>      | 1,364,690                 | 1,719,040               | 25.966      | 833,630                 | -38.914     |
| <i>Astrophytum capricorne</i> | 60,721                    | 55,209                  | -9.078      | 66,359                  | 9.285       |
| <i>Mammillaria pottsii</i>    | 354,156                   | 297,390                 | -16.029     | 400,936                 | 13.209      |
| <i>Yucca torreyi</i>          | 1,175,270                 | 1,382,837               | 17.661      | 958,996                 | -18.402     |

Cuadro XXI. Especies de roedores con patrón de respuesta inestable, bajo el escenario B2.

| Especie                    | Actual (Km <sup>2</sup> ) | 2050 (Km <sup>2</sup> ) | % de cambio | 2080 (Km <sup>2</sup> ) | % de cambio |
|----------------------------|---------------------------|-------------------------|-------------|-------------------------|-------------|
| <i>Onychomys arenicola</i> | 868,298                   | 753,558                 | -13.214     | 919,106                 | 5.851       |

De acuerdo con lo anterior, y a manera de resumen, se observa que en el caso de las modificaciones en el área de distribución de las especies **vegetales**, bajo el escenario **A2** un 52.78% (19) de ellas presentó una tendencia hacia la ganancia de área de distribución potencial, un 33.33% (12) exhibió patrones referentes a la pérdida, 11.11% (4) mostró un comportamiento oscilante ante los posibles cambios en el clima, y solo un 2.78% (1) de las especies mantendrá sin afectaciones considerables su área de distribución (ver Cuadro XXII). En cuanto a la respuesta presentada por las especies de **roedores** ante el cambio climático, se observa que bajo este mismo escenario, un 40% (2) de las especies podrá presentar ganancias potenciales de área importantes y un 60% (3) pérdidas; ninguna especie presentó un patrón de respuesta inestable o de cambio no significativo por lo que ninguna de estas cinco especies mantendrá su área de distribución constante a lo largo del tiempo, siendo entonces el cambio climático un factor importante de modificación en el área de distribución de estas cinco especies bajo este escenario (ver Cuadro XXII).

En cuanto a la respuesta de las especies **vegetales** bajo el escenario **B2** un 44.4% (16) presentó una respuesta hacia la ganancia de área de distribución potencial, un 36.1% (13) de las especies mostró un patrón de respuesta de pérdida, un 11.1% (4) exhibió un comportamiento oscilante ante los posibles cambios en el clima, y un 8.3% (3) de las especies se mantendrá sin afectaciones considerables en su área de distribución (ver Cuadro XXIII). Mientras que en lo referido a la respuesta presentada por los **roedores** bajo este mismo escenario, los modelos obtenidos proyectan que el 60% (3) de las especies podrán presentar ganancias potenciales de área, un 20% (1) podrá presentar un comportamiento oscilante en su área de distribución potencial, y un 20% (1) podrá mantener de manera constante su área de distribución a lo largo de los periodos de tiempo analizados, bajo este escenario ninguna especie se catalogó con el patrón de respuesta de pérdida (ver Cuadro XXIII).

A continuación se muestra la lista de especies analizadas con su correspondiente patrón de respuesta obtenido para el escenario de cambio climático A2, expresando los porcentajes de cambio para cada horizonte de tiempo (2050 y 2080).

Cuadro XXII. Lista de especies vegetales y de roedores con el patrón de respuesta obtenido bajo el escenario A2.

| Especie                                | Actual    | Escenario A2     |                  | Patrón de respuesta |         |           |                         |
|--|-----------|------------------|------------------|---------------------|---------|-----------|-------------------------|
|  |           | % de cambio 2050 | % de cambio 2080 | Ganancia            | Pérdida | Oscilante | Cambio no significativo |
| <i>Agave lechuguilla</i>               | 1,364,690 | 16.006           | -4.277           | x                   |         |           |                         |
| <i>Ariocarpus retusus</i>              | 130,455   | 16.688           | 18.570           | x                   |         |           |                         |
| <i>Astrophytum myrostigma</i>          | 32,379    | 5.006            | 59.986           | x                   |         |           |                         |
| <i>Astrophytum ornatum</i>             | 48,070    | 6.089            | 21.057           | x                   |         |           |                         |
| <i>Coryphanta erecta</i>               | 46,551    | 27.724           | 1.658            | x                   |         |           |                         |
| <i>Echinocereus pentalophus</i>        | 144,990   | 12.502           | 14.726           | x                   |         |           |                         |
| <i>Ferocactus glaucescens</i>          | 712,541   | 18.473           | 13.851           | x                   |         |           |                         |
| <i>Larrea tridentata</i>               | 1,256,510 | 36.098           | 39.045           | x                   |         |           |                         |
| <i>Lophophora williamsii</i>           | 479,267   | 9.467            | 4.869            | x                   |         |           |                         |
| <i>Mammillaria compressa</i>           | 50,778    | 64.756           | 1.975            | x                   |         |           |                         |
| <i>Mammillaria elongata</i>            | 60,206    | 14.754           | 3.732            | x                   |         |           |                         |
| <i>Mammillaria muehlenpfordtii</i>     | 88,923    | 68.505           | 15.933           | x                   |         |           |                         |
| <i>Sclerocactus papyracanthus</i>      | 722,278   | 111.984          | 104.835          | x                   |         |           |                         |
| <i>Stenocactus coptonogus</i>          | 66,824    | 16.756           | 18.242           | x                   |         |           |                         |
| <i>Thelocactus conothelos</i>          | 30,561    | 30.581           | 19.384           | x                   |         |           |                         |
| <i>Thelocactus hexaedrophorus</i>      | 88,544    | -4.237           | 40.546           | x                   |         |           |                         |
| <i>Thelocactus rinconensis</i>         | 184,826   | 64.991           | 32.973           | x                   |         |           |                         |
| <i>Turbiniacarpus pseudopectinatus</i> | 33,645    | 46.369           | 26.723           | x                   |         |           |                         |
| <i>Yucca elata</i>                     | 1,146,527 | 0.513            | 9.748            | x                   |         |           |                         |

Cuadro XXII. Lista de especies vegetales y de roedores con el patrón de respuesta obtenido bajo el escenario A2 (Continuación).

|                                 | Especie                              | Actual    | Escenario A2     |                  | Patrón de respuesta |         |           | Cambio no significativo |
|---------------------------------|--------------------------------------|-----------|------------------|------------------|---------------------|---------|-----------|-------------------------|
|                                 |                                      |           | % de cambio 2050 | % de cambio 2080 | Ganancia            | Pérdida | Oscilante |                         |
| Vegetales                       | <i>Ariocarpus fissuratus</i>         | 775,552   | 3.875            | -13.094          |                     | x       |           |                         |
|                                 | <i>Astrophytum capricorne</i>        | 60,721    | -10.466          | -20.257          |                     | x       |           |                         |
|                                 | <i>Dasyliirion wheeleri</i>          | 2,104,618 | -7.601           | -5.481           |                     | x       |           |                         |
|                                 | <i>Ferocactus pilosus</i>            | 66,422    | -5.929           | -9.447           |                     | x       |           |                         |
|                                 | <i>Fouquieria splendens</i>          | 1,481,776 | -13.316          | -3.690           |                     | x       |           |                         |
|                                 | <i>Fouquieria shrevei</i>            | 116,434   | -5.233           | -21.202          |                     | x       |           |                         |
|                                 | <i>Grusonia bradtiana</i>            | 421,807   | -21.416          | -42.311          |                     | x       |           |                         |
|                                 | <i>Mammillaria longimamma</i>        | 379,181   | 2.144            | -43.188          |                     | x       |           |                         |
|                                 | <i>Mammillaria pottsii</i>           | 354,156   | -5.290           | -10.642          |                     | x       |           |                         |
|                                 | <i>Opuntia stenopetala</i>           | 112,034   | -18.145          | 2.987            |                     | x       |           |                         |
|                                 | <i>Sclerocactus mariposensis</i>     | 133,586   | -9.454           | -13.256          |                     | x       |           |                         |
|                                 | <i>Turbinicarpus schmiedickeanus</i> | 48,929    | -2.718           | -42.819          |                     | x       |           |                         |
|                                 | <i>Mammillaria bocasana</i>          | 24,999    | 11.596           | -36.073          |                     |         | x         |                         |
|                                 | <i>Mammillaria formosa</i>           | 85,343    | 6.326            | -8.482           |                     |         | x         |                         |
|                                 | <i>Mammilloidia candida</i>          | 35,520    | 23.274           | -7.264           |                     |         | x         |                         |
|                                 | <i>Yucca torreyi</i>                 | 1,175,270 | 5.790            | -6.583           |                     |         | x         |                         |
| <i>Leuchtenbergia principis</i> | 88,154                               | 4.788     | 1.460            |                  |                     |         | x         |                         |
| Roedores                        | <i>Peromyscus pectoralis</i>         | 1,337,471 | 16.666           | 18.212           | x                   |         |           |                         |
|                                 | <i>Sigmodon ochrognathus</i>         | 784,847   | 3.489            | 14.118           | x                   |         |           |                         |
|                                 | <i>Chaetodipus nelsoni</i>           | 721,555   | -3.070           | -5.258           |                     | x       |           |                         |
|                                 | <i>Onychomys arenicola</i>           | 868,298   | -7.770           | -12.983          |                     | x       |           |                         |
|                                 | <i>Peromyscus nasutus</i>            | 1,815,187 | -22.604          | -28.907          |                     | x       |           |                         |

De igual forma que en el caso anterior, a continuación se muestra la lista de especies analizadas con su correspondiente patrón de respuesta obtenido para el escenario de cambio climático B2, expresando los porcentajes de cambio para cada horizonte de tiempo (2050 y 2080).

Cuadro XXIII. Lista de especies vegetales y de roedores con el patrón de respuesta obtenido bajo el escenario B2.

| Especie                               | Actual    | Escenario B2     |                  | Patrón de respuesta |         |           |                         |
|---------------------------------------|-----------|------------------|------------------|---------------------|---------|-----------|-------------------------|
|                                       |           | % de cambio 2050 | % de cambio 2080 | Ganancia            | Pérdida | Oscilante | Cambio no significativo |
| <i>Ariocarpus retusus</i>             | 130,455   | 22.992           | 25.648           | x                   |         |           |                         |
| <i>Astrophytum ornatum</i>            | 48,070    | 7.697            | 91.317           | x                   |         |           |                         |
| <i>Coryphanta erecta</i>              | 46,551    | 32.098           | 23.939           | x                   |         |           |                         |
| <i>Echinocereus pentalophus</i>       | 144,990   | 7.103            | 29.608           | x                   |         |           |                         |
| <i>Ferocactus glaucescens</i>         | 712,541   | 19.970           | 32.797           | x                   |         |           |                         |
| <i>Larrea tridentata</i>              | 1,256,510 | 42.929           | 26.344           | x                   |         |           |                         |
| <i>Mammillaria compressa</i>          | 50,778    | 11.143           | 34.428           | x                   |         |           |                         |
| <i>Mammillaria elongata</i>           | 60,206    | 16.998           | 49.895           | x                   |         |           |                         |
| <i>Mammilloidia candida</i>           | 35,520    | 39.747           | 37.965           | x                   |         |           |                         |
| <i>Opuntia stenopetala</i>            | 112,034   | -4.396           | 9.123            | x                   |         |           |                         |
| <i>Sclerocactus mariposensis</i>      | 133,586   | -0.031           | 16.690           | x                   |         |           |                         |
| <i>Sclerocactus papyracanthus</i>     | 722,278   | 25.669           | 137.957          | x                   |         |           |                         |
| <i>Stenocactus coptonogus</i>         | 66,824    | 14.297           | 0.944            | x                   |         |           |                         |
| <i>Thelocactus conothelos</i>         | 30,561    | 19.037           | 7.811            | x                   |         |           |                         |
| <i>Thelocactus rinconensis</i>        | 184,826   | 22.812           | 58.959           | x                   |         |           |                         |
| <i>Turbinicarpus pseudopectinatus</i> | 33,645    | 16.493           | 50.248           | x                   |         |           |                         |
| <i>Ariocarpus fissuratus</i>          | 775,552   | 3.605            | -11.828          |                     | x       |           |                         |
| <i>Astrophytum myrostigma</i>         | 32,379    | -28.960          | 0.593            |                     | x       |           |                         |
| <i>Dasyilirion wheeleri</i>           | 2,104,618 | 6.542            | -19.344          |                     | x       |           |                         |

Cuadro XXIII. Lista de especies vegetales y de roedores con el patrón de respuesta obtenido bajo el escenario B2 (Continuación).

|                    | Especie                             | Actual    | Escenario B2     |                  | Patrón de respuesta |         |           | Cambio no significativo |
|--------------------|-------------------------------------|-----------|------------------|------------------|---------------------|---------|-----------|-------------------------|
|                    |                                     |           | % de cambio 2050 | % de cambio 2080 | Ganancia            | Perdida | Oscilante |                         |
| Vegetales          | <i>Ferocactus pilosus</i>           | 66,422    | -7.227           | -11.303          |                     | x       |           |                         |
|                    | <i>Fouquieria splendens</i>         | 1,481,776 | -7.213           | -18.599          |                     | x       |           |                         |
|                    | <i>Fouquieria shrevei</i>           | 116,434   | -1.063           | -31.704          |                     | x       |           |                         |
|                    | <i>Grusonia bradtiana</i>           | 421,807   | -30.106          | -21.038          |                     | x       |           |                         |
|                    | <i>Leuchtenbergia principis</i>     | 88,154    | 3.362            | -11.549          |                     | x       |           |                         |
|                    | <i>Mammillaria bocasana</i>         | 24,999    | -14.549          | -6.624           |                     | x       |           |                         |
|                    | <i>Mammillaria longimamma</i>       | 379,181   | -38.659          | -11.718          |                     | x       |           |                         |
|                    | <i>Mammillaria muehlenpfordtii</i>  | 88,923    | -22.496          | -1.035           |                     | x       |           |                         |
|                    | <i>Thelocactus hexaedrophorus</i>   | 88,544    | -7.170           | -2.137           |                     | x       |           |                         |
|                    | <i>Turbincarpus schmiedickeanus</i> | 48,929    | -37.659          | -24.585          |                     | x       |           |                         |
|                    | <i>Agave lechuguilla</i>            | 1,364,690 | 25.966           | -38.914          |                     |         | x         |                         |
|                    | <i>Astrophytum capricorne</i>       | 60,721    | -9.078           | 9.285            |                     |         | x         |                         |
|                    | <i>Mammillaria potsii</i>           | 354,156   | -16.029          | 13.209           |                     |         | x         |                         |
|                    | <i>Yucca torreyi</i>                | 1,175,270 | 17.661           | -18.402          |                     |         | x         |                         |
|                    | <i>Lophophora williamsii</i>        | 479,267   | 0.642            | -1.965           |                     |         |           | x                       |
|                    | <i>Mammillaria formosa</i>          | 85,343    | 4.735            | -0.909           |                     |         |           | x                       |
| <i>Yucca elata</i> | 1,146,527                           | 2.328     | 3.429            |                  |                     |         | x         |                         |
| Roedores           | <i>Peromyscus nasutus</i>           | 1,815,187 | 0.591            | 9.048            | x                   |         |           |                         |
|                    | <i>Peromyscus pectoralis</i>        | 1,337,471 | 18.581           | 27.130           | x                   |         |           |                         |
|                    | <i>Sigmodon ochrognathus</i>        | 784,847   | -1.301           | 11.910           | x                   |         |           |                         |
|                    | <i>Onychomys arenicola</i>          | 868,298   | -13.214          | 5.851            |                     |         | x         |                         |
|                    | <i>Chaetodipus nelsoni</i>          | 721,555   | -1.331           | -1.823           |                     |         |           | x                       |

## **VII. Discusión**

El objetivo principal de este estudio fue estimar el potencial de cambio en las áreas de distribución de especies vegetales y de roedores pertenecientes al Desierto Chihuahuense, como resultado del cambio climático bajo los escenarios A2 y B2 para lo cual se cuantificó el número de pixeles resultantes de los modelos de nicho ecológico generados.

Al analizar la respuesta de cada grupo de estudio en relación con los escenarios de cambio climático, se observó que en el caso de las especies vegetales, un número mayor de especies presentaron ganancias bajo el escenario A2, en comparación con el escenario B2, (19 y 16 especies respectivamente). En el caso de las pérdidas, ambos escenarios mostraron similitudes, bajo el escenario A2, 12 especies mostraron este patrón en relación con las 13 especies que lo exhibieron para el escenario segundo escenario (B2). En lo referido al patrón de respuesta cambio no significativo, bajo el escenario más conservador (B2) el número de especies fue mayor respecto al escenario A2 (tres y una especie respectivamente). En cuanto a la respuesta oscilante, el mismo número de especies presentaron este patrón en ambos escenarios (ver resultados p. 49). Mientras que en el caso de los roedores, dos especies obtuvieron ganancias potenciales de área, bajo el escenario A2, y tres especies presentaron esta respuesta bajo el escenario B2. En lo referido a las pérdidas, solo se obtuvieron bajo el escenario A2. En cuanto a las respuestas cambio no significativo y oscilante, solo se obtuvieron bajo el escenario B2 (ver resultados p. 49). Estas diferencias en cuanto al número de especies que se presentaron en cada patrón de respuesta puede ser resultado de los supuestos climáticos y sociales que asumen cada escenario, aunado a la ecología de las especies, cabe mencionar que para estos dos grupos, el cambio climático será un factor que promueva en su mayoría la expansión de su área de distribución, más que la reducción de la misma.

En cuanto a la respuesta de las especies en función del tiempo proyectado, para ambos grupos se obtuvo que para el 2050, la magnitud del cambio (ganancia/pérdida) es menor respecto al horizonte de tiempo 2080. Sin embargo, independientemente del escenario y horizonte de tiempo modelado, en términos generales se pudo observar que el 90% de las especies vegetales y el 80% en el caso de las especies de roedores, tienen potencial para presentar modificaciones en su área de distribución. Sólo un número reducido de especies mantendrá su área de distribución relativamente constante en respuesta a las modificaciones climáticas. Estos resultados coinciden con lo obtenido por

Ballesteros-Barrera (2008), quién reporta potenciales modificaciones en el área de distribución en diversos taxones vegetales del Desierto Chihuahuense, como efecto del cambio climático.

Algunos autores mencionan que el matorral xerófilo será uno de los tipos de vegetación con mayor impacto en su biodiversidad como resultado del cambio climático (INE-SEMARNAT, 2006; Hernández, 2006) sin embargo en esta comunidad vegetal se distribuyen especies como *Agave lechuguilla*, *Larrea tridentata*, *Yucca elata* y *Yucca torreyi*, las cuales son consideradas de distribución amplia y de las que se espera tendrán mayor tolerancia al cambio climático (Jhonson, 1998) y que pueden brindar indicios sobre el posible comportamiento de esta comunidad vegetal en un futuro sin embargo, de acuerdo con los resultados aquí obtenidos, éstas especies no tienen una respuesta homogénea o similar de frente al cambio climático, limitando la posibilidad de realizar una aproximación sobre la respuesta del matorral xerófilo a nivel de comunidad, donde además deben considerarse las diferentes interacciones bióticas que mantienen las especies que habitan esta región, como resultado de ser una entidad biológica compleja y dinámica (Gian-Reto, 2010; Gilman *et al.*, 2010).

Si bien las especies aquí analizadas presentarán modificaciones en su área de distribución, es importante mencionar que muestran una respuesta diferenciada ante el cambio climático. Se observa que para más del 45% de las especies (vegetales y roedores) se proyectan aumentos en sus áreas de distribución, mientras que para el 30% se proyectan disminuciones. Para Martínez-Meyer (2005), esta respuesta diferenciada es producto del establecimiento de condiciones ambientales adecuadas que facilitan la expansión o bien, de condiciones limitantes que restringen el área de distribución de las especies. Dicho planteamiento está directamente relacionado con las características intrínsecas de cada uno de los taxones, *i.e.* fisiología, historia de vida, historia evolutiva, etc. (Martínez-Meyer, 2005).

Para las especies vegetales, los resultados aquí obtenidos contrastan con lo reportado para la Reserva de la Biosfera Tehuacán-Cuicatlán, para la cual se modeló la distribución de 20 especies de cactáceas endémicas bajo escenarios de cambio climático (Téllez-Valdés y Dávila-Aranda, 2003). Estos autores mencionan que tras modelar su distribución potencial, estas especies tienen potencial para reducir su distribución en más del 50% del área. Para el caso del presente análisis, el mayor potencial de pérdida es del 43.18% en el caso de *Mammillaria longimamma* (Cuadro XI). Otro caso en el que la respuesta ante el cambio climático es en el mismo sentido, pero referido a la ganancia

es el es el reportado por Butler *et al.* (2012). Estos autores analizan la respuesta de *Echinocereus reichenbachii* ante tres distintos escenarios de cambio climático y dos horizontes de tiempo (2050 y 2080), donde para todos los escenarios encuentran incrementos potenciales de área.

Cabe destacar que pese a que Téllez-Valdés y Dávila-Aranda (2003) analizan el impacto del cambio climático sobre la distribución de cactáceas, (y otras especies) debido a las diferencias en términos del tamaño de área y homogeneidad ambiental, los universos de análisis son poco comparables con el presente estudio. En el caso del trabajo de Téllez-Valdés y Dávila-Aranda (2003), la distribución de las especies es especialmente restringida y asociada a una historia biogeográfica de aislamiento (Morrone, 2005; Rzedowsky, 1973), lo cual pudiera estar asociado a estrategias de sobrevivencia especialistas; mientras que en el Desierto Chihuahuense, al tratarse de una región mucho más grande y diversa ambiental y biogeográficamente, las especies muestran respuestas diferenciadas que pudieran estar asociadas, en relación con la región de Tehuacán-Cuicatlán, como generalistas.

Para el caso de los mamíferos, estudios previos reportan la respuesta en las modificaciones en el área de distribución de mamíferos en zonas áridas y semiáridas de América del Norte ante el cambio climático, como es el caso de Cameron y Scheel (2001). Estos autores modelaron la respuesta de 59 especies de roedores distribuidos en el estado de Texas bajo dos escenarios de cambio climático, obteniendo respuestas diferenciadas, en donde el 46% de las especies tendrán modificaciones en sus áreas de distribución, y de éstas el 60 % presentarán ganancias, mientras que el 40 % restante tendrá pérdidas en su distribución potencial. Es importante mencionar que las cinco especies aquí analizadas, fueron empleadas por dichos autores, donde sólo dos (*Chaetodipus nelsoni* y *Peromyscus pectoralis*), muestran coincidencias con lo reportado por Cameron y Scheel (2001) (Cuadro XII). Lo anterior puede deberse a que estos autores utilizan para sus modelos registros únicamente pertenecientes al estado de Texas, limitando ambientalmente a las especies, por lo que su universo de análisis es poco comparable con el aquí presentado, debido a que la distribución de las especies no esta restringida a limites geopolíticos.

Hasta el momento se ha hecho mención de las especies que obtuvieron aumentos o disminuciones potenciales de área, sin embargo, es de particular interés el caso de aquellas que presentaron un patrón de respuesta inestable. Bajo esta categoría se encuentran ocho especies, de las cuales destaca *Mammilloidia candida*, por presentar un aumento potencial de área y un posterior

decremento (Cuadro XIV), mientras que *Mammillaria bocasana*, y *Onychomys arenicola* presentaron el comportamiento contrario (Cuadros XX y XXI). Estas especies de acuerdo con lo anterior, podrían ser clasificadas como especies que presentarán ganancias y pérdidas potenciales de área respectivamente. En lo referido al resto de los taxones (*Agave lechuguilla*, *Astrophytum capricorne*, *Mammillaria formosa*, *M. pottsii* y *Yucca torreyi*), se puede observar un alto grado de incertidumbre, pues sus porcentajes de cambio para cada horizonte de tiempo son similares (Cuadros XVI y XX). Lo anterior representa una limitante para poder determinar una respuesta clara de estas especies ante el cambio climático. Este patrón de respuesta también ha sido reportado en especies de aves de la familia *Cracidae* por Peterson *et al.*, (2011), sin embargo estos autores no hacen mención alguna sobre sus posibles causas. En el caso de los resultados aquí obtenidos se observa que el grado de inestabilidad está directamente relacionado con el escenario de cambio climático, siendo el de mayor incertidumbre el B2. Lo anterior sugiere que es la incertidumbre de los escenarios climáticos la fuente de esta respuesta (Palma-Grayeb *et al.*, 2008). En donde un modelo que proyecte disminuciones regionales en las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) debido a un desarrollo económico sustentable es más incierto.

En lo que respecta a la incertidumbre de los periodos de tiempo, en los resultados aquí presentados se observa que los modelos asociados al tiempo 2050 proyectan magnitudes de cambio, ya sea aumentos o disminuciones, significativamente menores a las proyectadas para el 2080. Debido a que el cambio climático se sucede de forma progresiva, por lo que para tiempos más cercanos al actual, sus efectos serán menos severos, respecto a los de distancias temporales más lejanas Magaña *et al.* (2009).

Con base en lo previamente mencionado, podemos decir que los resultados obtenidos por el presente estudio, presentan mayor grado de certidumbre bajo el escenario A2 y el horizonte de tiempo 2050. Este planteamiento encuentra soporte en lo que mencionan diversos autores, para quienes la incertidumbre asociada a los modelos climáticos bajo el escenario A2 es menor, ya que se proyecta que para las próximas décadas habrá condiciones muy similares a las actuales en lo referido al patrón de desarrollo económico y de crecimiento industrial con acumulación de GEI (IPCC, 2000; Gadsden *et al.*, 2012), además de lo mencionado por Magaña *et al.* (2009), quienes plantean que en cuanto mayor sea el tiempo contemplado por la proyección, mayor será la incertidumbre asociada a los datos.

Es entonces que estos resultados pueden ser tomados en cuenta para proponer estrategias de conservación y programas de manejo que involucren la influencia y los efectos del cambio climático que contribuyan a minimizar sus efectos sobre la distribución de estas especies (Sánchez – Cordero *et al.*, 2005; Bellard *et al.*, 2012).

Además de los efectos propios del cambio climático sobre la distribución potencial de las especies, se debe considerar lo planteado por Butler *et al.*, (2012), quienes mencionan que de incrementarse la temperatura, la tasa de evaporación y las sequías prolongadas se podrían producir condiciones desérticas (climáticas y geofísicas) apropiadas para el establecimiento y permanencia de las especies de zonas áridas y semiáridas sin embargo, el cambio de uso de suelo, inducido por actividades antropogénicas como la ganadería, la agricultura, y los asentamientos humanos podrían ser un factor limitante para las mismas (SEMARNAT, 2005), por lo que en estudios posteriores se debe incorporar la dinámica del cambio de uso de suelo, para evaluar la forma en que impactará a estas especies, ya que muchas de ellas dependen de sustratos específicos para su establecimiento como por ejemplo *Fouquieria shrevei*, en suelos de tipo yesoso, (Johnston, 1941) de la cual se predicen pérdidas potenciales de área bajo ambos escenarios de cambio climático aquí analizados. Aunado a lo anterior, otro de los factores limitantes para la distribución de las especies aquí estudiadas es su sobre explotación, por ejemplo en el caso de *Agave lechuguilla* y *Dasyliroton wheeleri* que son utilizadas para la producción de fibras y fabricación de licores, además de la extracción ilegal, particularmente de las especies de cactáceas (Hernández, 2006) pues significarán un factor de presión importante para la supervivencia y mantenimiento de las diferentes poblaciones en esta región establecidas,

Por todo lo anterior, es que deberán implementarse planes de conservación que consideren no solo los efectos del cambio climático, sino también aquellos factores que modifican el área de distribución de las especies de manera inmediata, haciendo especial énfasis en aquellas especies que presentaron un patrón de respuesta de pérdida ,donde además algunas de ellas presentan el estatus en peligro de extinción, amenazadas y sujetas a protección especial de acuerdo con la NOM-059-SEMARNAT-2010 como es el caso de *Ariocarpus fissuratus*, *Astrophytum capricorne*, *A. myriostigma*, *Ferocactus pilosus*, *Fouquieria shrevei*, *Leuchtenbergia principis*, *Mammillaria longimamma*, y *Turbinicarpus schmidickeanus* por lo que podrían ser candidatas viables a programas de conservación en la región.

Para todos los casos anteriormente expuestos, se debe de tomar en consideración las limitaciones al modelar el nicho ecológico de las especies al presente o bajo escenarios de cambio climático, (Martínez-Meyer, 2005, Soberon y Peterson, 2005, Risto *et al.*, 2006) y que se refieren a la falta de explicación sobre las interacciones bióticas con factores históricos (historias de vida de cada especie, barreras geográficas) (Martínez-Meyer, 2005) y las características inherentes a cada especie (capacidad de dispersión, rangos de tolerancia). Adicionalmente, se debe tomar en consideración la incertidumbre asociada a las capas bioclimáticas y la asociada al tipo de modelador empleado, en este caso MaxEnt (Martínez-Meyer, 2012).

El presente estudio puede ser tomado como base para análisis posteriores que involucren el impacto del cambio climático en términos espaciales y de esta manera identificar áreas climáticamente adecuadas para el establecimiento de las especies, integrando además dinámicas de cambio de uso de suelo, sobre explotación y extracción ilegal de estas especies, para brindar herramientas que permitan la toma de decisiones en términos de inclusión a programas de conservación, manejo y aprovechamiento sustentable de estas especies pertenecientes al Desierto Chihuahuense.

## **VIII. Conclusiones**

- Las oscilaciones en el sistema climático proyectadas por ambos escenarios de emisiones prevén modificaciones en la distribución potencial de especies de matorral xerófilo presentes en el Desierto Chihuahuense.
- Se proyectan respuestas diferenciadas entre las especies ante el cambio climático, 45% de las especies (vegetales y roedores) proyectan aumentos en sus áreas de distribución, mientras que para el 30% se proyectan disminuciones.
- Se deberá brindar mayor importancia a los resultados obtenidos de las proyecciones bajo el escenario A2 y horizonte de tiempo 2050, debido a que presentan un menor grado de incertidumbre.
- Además del cambio climático debe considerarse factores adicionales como la fragmentación del hábitat, cambio de uso de suelo, sobre explotación y de extracción ilegal, pues modifican de manera inmediata la distribución de las especies.
- Aquellas especies que presentaron un patrón de respuesta de pérdida, deberán incluirse en programas de conservación, manejo y aprovechamiento para la región.

## **IX. Anexo I**

El Análisis en Componentes Principales (ACP) constituye la técnica base en el Análisis Multivariado de Datos. Su objetivo principal es reducir la cantidad de variables, manteniendo la máxima cantidad de información presente en un Cuadro de datos de variables cuantitativas, mediante la construcción de nuevas variables denominadas componentes principales que contienen, en gran medida, la información de las variables originales. Entre otras cosas, por medio de un ACP se busca determinar las principales relaciones que existen entre los individuos, entre las variables y entre los individuos y las variables (Chavarría y Fallas, 2011).

La “reducción” o simplificación es posible porque frecuentemente mucha de la variabilidad de los datos se puede explicar por un número pequeño de componentes principales, que es mucho menor que, el número inicial de variables (Hernández, 1998). Si consideramos los datos de un individuo como un punto en un espacio de dimensión “p”, el cual no es fácil de representar gráficamente, la Cuadro de datos sería una colección de “n” puntos; el objetivo del método es encontrar el subespacio de menor dimensión sobre el cual se pueden proyectar los datos, de manera que resulte más fácil hacer su interpretación. En este sentido, se definen el *Plano Principal* como la representación gráfica de los individuos del análisis en un plano (que es la proyección sobre las componentes principales) y el *Círculo de Correlaciones*, como la representación gráfica de las variables sobre un círculo que es indispensable en un análisis multivariado de datos (Bolaños, 2011). El investigador puede ahora concentrarse en los k componentes, y descubrir dimensiones o rasgos más interesantes o informativos para fines descriptivos o de interpretación, que los que hubiera podido descubrir analizando directamente los datos de las variables originales (Hernández, 1998).

Un aspecto clave en ACP es la interpretación de los factores, ya que ésta no viene dada a priori, sino que será deducida tras observar la relación de los factores con las variables iniciales (habrá, pues, que estudiar tanto el signo como la magnitud de las correlaciones) (Hernández, 1998).

A continuación se describe el proceso de selección de variables utilizadas en los modelos de distribución potencial actual y de cambio climático para las especies estudiadas, por medio de un ACP implementado en el software estadístico de uso libre R Project.

### 1. **Tabla de datos**

Una vez completada las bases de datos de las especies, se procedió a la sobreposición de los puntos de recolecta, con las 19 variables ambientales a través del uso de la extensión Grid Analyst ver. 1.1 en el SIG ArcView 3.2, para obtener los datos de las variables climáticas para cada uno de los puntos de recolecta de las especies vegetales y roedores pertenecientes al Desierto Chihuahuense.

### 2. **Centrar y estandarizar datos**

Como etapa preliminar de un ACP se procedió a centrar y estandarizar las variables, esto es que todas las variables tengan media cero y varianza uno. Con esta consideración, el ACP se denomina ACP normado y tiene la particularidad de que todas las variables tienen el mismo peso o ponderación en el estudio (Chavarría y Fallas, 2011).

### 3. **La matriz de correlación**

Un análisis de componentes principales tiene sentido si existen correlaciones entre las variables, una matriz de correlación se realiza para medir el grado de asociación entre estas siendo un indicador estadístico definido por el coeficiente de correlación de Spearman, cuando el valor resultante es cercano a +1, indica que ambas variables se asocian directamente de manera muy estrecha, en cambio, un valor cercano a -1, significa que ambas variables se asocian inversamente de manera muy estrecha. Una correlación con valor cercano a cero, significa una ausencia de correlación entre las variables, indicando que las variables son independientes entre si (Pedroza y Dicoyskiy, 2007).

En este caso se seleccionaron los valores mayores a **0.8** Spearman porque indican una fuerte correlación entre las variables. Cuadro AI.I (vegetales) y AI.II (roedores) (Elith *et al.*, 2011).

*Cuadro A.I.I. Matriz de correlación de las 19 variables bioclimáticas, para las especies vegetales. En naranja variables con valores mayores a 0.8 Spearman, valor recomendado en la literatura para depurar variables (Elith et al., 2011).*

|       | bio1  | bio2  | bio3  | bio4  | bio5  | bio6  | bio7  | bio8  | bio9  | bio10 | bio11 | bio12 | bio13 | bio14 | bio15 | bio16 | bio17 | bio18 | bio19 |
|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| bio1  | 1     | -0.21 | -0.02 | -0.06 | 0.56  | 0.77  | -0.11 | 0.43  | 0.55  | 0.63  | 0.77  | -0.20 | -0.17 | -0.23 | 0.05  | -0.20 | -0.22 | -0.14 | -0.34 |
| bio2  | -0.21 | 1     | 0.17  | 0.09  | 0.12  | -0.36 | 0.33  | -0.08 | 0.05  | -0.07 | -0.21 | -0.21 | -0.19 | -0.20 | 0.05  | -0.15 | -0.21 | -0.09 | -0.06 |
| bio3  | -0.02 | 0.17  | 1     | -0.96 | -0.72 | 0.52  | -0.87 | -0.12 | -0.34 | -0.75 | 0.60  | 0.54  | 0.43  | 0.39  | 0.24  | 0.51  | 0.43  | 0.55  | -0.24 |
| bio4  | -0.06 | 0.09  | -0.96 | 1     | 0.75  | -0.64 | 0.96  | 0.10  | 0.35  | 0.73  | -0.68 | -0.61 | -0.50 | -0.44 | -0.27 | -0.57 | -0.49 | -0.59 | 0.23  |
| bio5  | 0.56  | 0.12  | -0.72 | 0.75  | 1     | -0.04 | 0.74  | 0.24  | 0.74  | 0.97  | -0.06 | -0.65 | -0.54 | -0.58 | -0.18 | -0.61 | -0.60 | -0.63 | 0.00  |
| bio6  | 0.77  | -0.36 | 0.52  | -0.64 | -0.04 | 1     | -0.70 | 0.18  | 0.27  | 0.04  | 0.98  | 0.23  | 0.19  | 0.08  | 0.17  | 0.20  | 0.12  | 0.21  | -0.28 |
| bio7  | -0.11 | 0.33  | -0.87 | 0.96  | 0.74  | -0.70 | 1     | 0.05  | 0.35  | 0.67  | -0.70 | -0.62 | -0.51 | -0.47 | -0.24 | -0.57 | -0.52 | -0.59 | 0.19  |
| bio8  | 0.43  | -0.08 | -0.12 | 0.10  | 0.24  | 0.18  | 0.05  | 1     | -0.03 | 0.34  | 0.21  | -0.05 | 0.00  | 0.03  | 0.01  | -0.04 | -0.01 | 0.17  | -0.34 |
| bio9  | 0.55  | 0.05  | -0.34 | 0.35  | 0.74  | 0.27  | 0.35  | -0.03 | 1     | 0.68  | 0.22  | -0.44 | -0.36 | -0.54 | -0.05 | -0.40 | -0.52 | -0.52 | 0.20  |
| bio10 | 0.63  | -0.07 | -0.75 | 0.73  | 0.97  | 0.04  | 0.67  | 0.34  | 0.68  | 1     | 0.00  | -0.62 | -0.50 | -0.52 | -0.16 | -0.58 | -0.56 | -0.57 | -0.04 |
| bio11 | 0.77  | -0.21 | 0.60  | -0.68 | -0.06 | 0.98  | -0.70 | 0.21  | 0.22  | 0.00  | 1     | 0.24  | 0.19  | 0.09  | 0.21  | 0.21  | 0.13  | 0.25  | -0.37 |
| bio12 | -0.20 | -0.21 | 0.54  | -0.61 | -0.65 | 0.23  | -0.62 | -0.05 | -0.44 | -0.62 | 0.24  | 1     | 0.93  | 0.78  | 0.28  | 0.95  | 0.77  | 0.84  | 0.24  |
| bio13 | -0.17 | -0.19 | 0.43  | -0.50 | -0.54 | 0.19  | -0.51 | 0.00  | -0.36 | -0.50 | 0.19  | 0.93  | 1     | 0.60  | 0.52  | 0.98  | 0.57  | 0.83  | 0.19  |
| bio14 | -0.23 | -0.20 | 0.39  | -0.44 | -0.58 | 0.08  | -0.47 | 0.03  | -0.54 | -0.52 | 0.09  | 0.78  | 0.60  | 1     | -0.13 | 0.62  | 0.95  | 0.66  | 0.11  |
| bio15 | 0.05  | 0.05  | 0.24  | -0.27 | -0.18 | 0.17  | -0.24 | 0.01  | -0.05 | -0.16 | 0.21  | 0.28  | 0.52  | -0.13 | 1     | 0.53  | -0.22 | 0.38  | -0.13 |
| bio16 | -0.20 | -0.15 | 0.51  | -0.57 | -0.61 | 0.20  | -0.57 | -0.04 | -0.40 | -0.58 | 0.21  | 0.95  | 0.98  | 0.62  | 0.53  | 1     | 0.59  | 0.85  | 0.18  |
| bio17 | -0.22 | -0.21 | 0.43  | -0.49 | -0.60 | 0.12  | -0.52 | -0.01 | -0.52 | -0.56 | 0.13  | 0.77  | 0.57  | 0.95  | -0.22 | 0.59  | 1     | 0.67  | 0.17  |
| bio18 | -0.14 | -0.09 | 0.55  | -0.59 | -0.63 | 0.21  | -0.59 | 0.17  | -0.52 | -0.57 | 0.25  | 0.84  | 0.83  | 0.66  | 0.38  | 0.85  | 0.67  | 1     | -0.03 |
| bio19 | -0.34 | -0.06 | -0.24 | 0.23  | 0.00  | -0.28 | 0.19  | -0.34 | 0.20  | -0.04 | -0.37 | 0.24  | 0.19  | 0.11  | -0.13 | 0.18  | 0.17  | -0.03 | 1     |

*Cuadro A.II. Matriz de correlación de las 19 variables bioclimáticas, para las especies de roedores. En naranja variables con valores mayores a 0.8 Spearman, valor recomendado en la literatura para depurar variables (Elith et al., 2011).*

|       | bio1  | bio2  | bio3  | bio4  | bio5  | bio6  | bio7  | bio8  | bio9  | bio10 | bio11 | bio12 | bio13 | bio14 | bio15 | bio16 | bio17 | bio18 | bio19 |
|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| bio1  | 1     | -0.35 | 0.25  | -0.43 | 0.55  | 0.90  | -0.55 | 0.68  | 0.65  | 0.66  | 0.89  | 0.33  | 0.32  | 0.07  | 0.14  | 0.29  | 0.09  | 0.26  | -0.07 |
| bio2  | -0.35 | 1     | 0.36  | 0.00  | 0.02  | -0.42 | 0.40  | -0.31 | 0.07  | -0.36 | -0.24 | -0.38 | -0.28 | -0.42 | 0.26  | -0.23 | -0.44 | -0.27 | -0.26 |
| bio3  | 0.25  | 0.36  | 1     | -0.92 | -0.41 | 0.52  | -0.70 | -0.42 | 0.53  | -0.51 | 0.63  | 0.22  | 0.29  | -0.26 | 0.44  | 0.34  | -0.24 | 0.22  | -0.13 |
| bio4  | -0.43 | 0.00  | -0.92 | 1     | 0.42  | -0.74 | 0.91  | 0.32  | -0.56 | 0.39  | -0.79 | -0.40 | -0.45 | 0.12  | -0.43 | -0.49 | 0.09  | -0.36 | 0.05  |
| bio5  | 0.55  | 0.02  | -0.41 | 0.42  | 1     | 0.15  | 0.38  | 0.89  | 0.24  | 0.92  | 0.17  | -0.11 | -0.11 | 0.05  | -0.12 | -0.16 | 0.04  | -0.12 | -0.09 |
| bio6  | 0.90  | -0.42 | 0.52  | -0.74 | 0.15  | 1     | -0.86 | 0.34  | 0.67  | 0.30  | 0.98  | 0.47  | 0.47  | 0.07  | 0.22  | 0.45  | 0.11  | 0.39  | 0.01  |
| bio7  | -0.55 | 0.40  | -0.70 | 0.91  | 0.38  | -0.86 | 1     | 0.14  | -0.50 | 0.20  | -0.83 | -0.50 | -0.49 | -0.04 | -0.27 | -0.51 | -0.08 | -0.43 | -0.06 |
| bio8  | 0.68  | -0.31 | -0.42 | 0.32  | 0.89  | 0.34  | 0.14  | 1     | 0.28  | 0.96  | 0.30  | -0.02 | -0.04 | 0.06  | -0.15 | -0.09 | 0.06  | -0.01 | -0.10 |
| bio9  | 0.65  | 0.07  | 0.53  | -0.56 | 0.24  | 0.67  | -0.50 | 0.28  | 1     | 0.19  | 0.73  | 0.26  | 0.35  | -0.21 | 0.41  | 0.36  | -0.16 | 0.28  | 0.09  |
| bio10 | 0.66  | -0.36 | -0.51 | 0.39  | 0.92  | 0.30  | 0.20  | 0.96  | 0.19  | 1     | 0.25  | 0.00  | -0.03 | 0.17  | -0.22 | -0.10 | 0.17  | -0.04 | -0.03 |
| bio11 | 0.89  | -0.24 | 0.63  | -0.79 | 0.17  | 0.98  | -0.83 | 0.30  | 0.73  | 0.25  | 1     | 0.43  | 0.45  | -0.01 | 0.31  | 0.45  | 0.01  | 0.36  | -0.07 |
| bio12 | 0.33  | -0.38 | 0.22  | -0.40 | -0.11 | 0.47  | -0.50 | -0.02 | 0.26  | 0.00  | 0.43  | 1     | 0.95  | 0.61  | 0.18  | 0.93  | 0.62  | 0.89  | 0.62  |
| bio13 | 0.32  | -0.28 | 0.29  | -0.45 | -0.11 | 0.47  | -0.49 | -0.04 | 0.35  | -0.03 | 0.45  | 0.95  | 1     | 0.39  | 0.44  | 0.98  | 0.39  | 0.91  | 0.48  |
| bio14 | 0.07  | -0.42 | -0.26 | 0.12  | 0.05  | 0.07  | -0.04 | 0.06  | -0.21 | 0.17  | -0.01 | 0.61  | 0.39  | 1     | -0.52 | 0.31  | 0.98  | 0.36  | 0.71  |
| bio15 | 0.14  | 0.26  | 0.44  | -0.43 | -0.12 | 0.22  | -0.27 | -0.15 | 0.41  | -0.22 | 0.31  | 0.18  | 0.44  | -0.52 | 1     | 0.51  | -0.55 | 0.37  | -0.32 |
| bio16 | 0.29  | -0.23 | 0.34  | -0.49 | -0.16 | 0.45  | -0.51 | -0.09 | 0.36  | -0.10 | 0.45  | 0.93  | 0.98  | 0.31  | 0.51  | 1     | 0.31  | 0.92  | 0.43  |
| bio17 | 0.09  | -0.44 | -0.24 | 0.09  | 0.04  | 0.11  | -0.08 | 0.06  | -0.16 | 0.17  | 0.01  | 0.62  | 0.39  | 0.98  | -0.55 | 0.31  | 1     | 0.38  | 0.77  |
| bio18 | 0.26  | -0.27 | 0.22  | -0.36 | -0.12 | 0.39  | -0.43 | -0.01 | 0.28  | -0.04 | 0.36  | 0.89  | 0.91  | 0.36  | 0.37  | 0.92  | 0.38  | 1     | 0.48  |
| bio19 | -0.07 | -0.26 | -0.13 | 0.05  | -0.09 | 0.01  | -0.06 | -0.10 | 0.09  | -0.03 | -0.07 | 0.62  | 0.48  | 0.71  | -0.32 | 0.43  | 0.77  | 0.48  | 1     |

#### 4. Valores y vectores propios

Los valores observados de los individuos en relación a las variables usadas pueden expresarse en términos gráficos, definiendo así una nube de puntos, la idea entonces del ACP es proyectar ortogonalmente los puntos que conforman la nube, en un espacio de dimensión menor, de manera que la pérdida de información sea mínima (Chavarría y Fallas, 2011). Como resultado de lo anterior, el análisis de los datos se realiza en un número menor de planos de proyección.

Se procedió entonces, a diagonalizar la matriz de correlación, lo que permitió calcular los valores y vectores propios, los primeros importantes para el cálculo de la inercia de la nube de puntos (explicado posteriormente) y los segundos permitirán un grado de proyección óptimo de los datos.

#### 5. Análisis de inercia

El agrupamiento de proyecciones puede ser medido por medio de la inercia de la nube de puntos,  $I$ . Como una medida de la dispersión de la nube alrededor de un punto denominado centro de gravedad, para los puntos proyectados en un plano. Entre más distanciadas queden las proyecciones entre sí, se dice que la inercia es mayor y entre más inercia exista al proyectar, menos es la pérdida de información, buscando entonces, que la inercia sea máxima (Chavarría y Fallas, 2011).

Para calcular la inercia de la nube de puntos  $I$ , se sumaron los valores propios, calculados anteriormente, ahora denominados  $\lambda$  los cuales a su vez coinciden con la cantidad de variables en el estudio, 19 (ver Cuadro AI.III).

*Cuadro AI.III. Inercia de la nube de puntos para las especies vegetales, analizados con 19 variables bioclimáticas*

|                     | $\lambda_1$ | $\lambda_2$ | $\lambda_3$ | $\lambda_4$ | $\lambda_5$ | $\lambda_6$ | $\lambda_7$ | $\lambda_8$ | $\lambda_9$ | $\lambda_{10}$ | $\lambda_{11}$ | $\lambda_{12}$ | $\lambda_{13}$ | $\lambda_{14}$ | $\lambda_{15}$ | $\lambda_{16}$ | $\lambda_{17}$ | $\lambda_{18}$ | $\lambda_{19}$ | $\Sigma$ |              |
|---------------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------|--------------|
| <b>I de la nube</b> | 8.31        | 3.84        | 1.95        | 1.61        | 1.39        | 0.93        | 0.42        | 0.17        | 0.15        | 0.14           | 0.03           | 0.02           | 0.01           | 0.01           | 0.01           | 0.00           | 0.00           | 0.00           | 0.00           | 0.00     | <b>19.00</b> |

*Cuadro AI.IV. Inercia de la nube de puntos para las especies de roedores analizados con 19 variables bioclimáticas*

|                     | $\lambda_1$ | $\lambda_2$ | $\lambda_3$ | $\lambda_4$ | $\lambda_5$ | $\lambda_6$ | $\lambda_7$ | $\lambda_8$ | $\lambda_9$ | $\lambda_{10}$ | $\lambda_{11}$ | $\lambda_{12}$ | $\lambda_{13}$ | $\lambda_{14}$ | $\lambda_{15}$ | $\lambda_{16}$ | $\lambda_{17}$ | $\lambda_{18}$ | $\lambda_{19}$ | $\Sigma$ |              |
|---------------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------|--------------|
| <b>I de la nube</b> | 7.08        | 4.34        | 3.93        | 1.71        | 1.02        | 0.48        | 0.18        | 0.09        | 0.08        | 0.04           | 0.01           | 0.01           | 0.01           | 0.01           | 0.01           | 0.00           | 0.00           | 0.00           | 0.00           | 0.00     | <b>19.00</b> |

A partir de cada valor propio, se genera un sub espacio unidimensional, en donde la suma de cada uno, genera el espacio de proyección óptima, el cual tiene una inercia máxima, recordando que a mayor inercia, menor pérdida de información, así se obtiene un plano principal para cada sub espacio, y que resultará de importancia para la proyección de los individuos y variables, y poder así analizar las relaciones que de estos se generen.

A su vez, también es posible expresar en porcentaje, la inercia explicada, o varianza por cada eje principal, indicando que tanta información contiene cada eje principal sobre la nube de puntos.

Como se observa en el análisis de inercia de la Cuadro AI.V, para las especies **vegetales** los cuatro primeros vectores propios, asociados a los valores propios de  $\lambda_1$ ,  $\lambda_2$ ,  $\lambda_3$  y  $\lambda_4$  generan 4 sub espacios, *i.e.* Un plano principal que conserva el **82.69%** de la información original de la nube de puntos y un una pérdida del **8.49%** reduciendo el problema de 19 a 4 dimensiones. Para el caso de los **roedores**, se observa que los tres primeros vectores propios asociados a  $\lambda_1$ ,  $\lambda_2$  y  $\lambda_3$  generan un plano principal que conserva el **80.73%** de la información original, con una pérdida de **20.67%** (Cuadro AI.VI).

*Cuadro AI.V. Análisis de inercia para las especies vegetales para la selección de componentes principales.*

|                                | <b>I de la nube</b> | <b>%<br/>varianza<br/>explicada</b> | <b>% varianza<br/>acumulada</b> |
|--------------------------------|---------------------|-------------------------------------|---------------------------------|
| <b><math>\lambda 1</math></b>  | 8.31                | 43.74                               | 43.74                           |
| <b><math>\lambda 2</math></b>  | 3.84                | 20.20                               | 63.93                           |
| <b><math>\lambda 3</math></b>  | 1.95                | 10.26                               | 74.20                           |
| <b><math>\lambda 4</math></b>  | 1.61                | 8.49                                | 82.69                           |
| <b><math>\lambda 5</math></b>  | 1.39                | 7.30                                | 89.99                           |
| <b><math>\lambda 6</math></b>  | 0.93                | 4.91                                | 94.90                           |
| <b><math>\lambda 7</math></b>  | 0.42                | 2.23                                | 97.13                           |
| <b><math>\lambda 8</math></b>  | 0.17                | 0.91                                | 98.04                           |
| <b><math>\lambda 9</math></b>  | 0.15                | 0.81                                | 98.85                           |
| <b><math>\lambda 10</math></b> | 0.14                | 0.72                                | 99.57                           |
| <b><math>\lambda 11</math></b> | 0.03                | 0.17                                | 99.74                           |
| <b><math>\lambda 12</math></b> | 0.02                | 0.11                                | 99.85                           |
| <b><math>\lambda 13</math></b> | 0.01                | 0.05                                | 99.90                           |
| <b><math>\lambda 14</math></b> | 0.01                | 0.04                                | 99.94                           |
| <b><math>\lambda 15</math></b> | 0.01                | 0.03                                | 99.98                           |
| <b><math>\lambda 16</math></b> | 0.00                | 0.02                                | 99.99                           |
| <b><math>\lambda 17</math></b> | 0.00                | 0.01                                | 100.00                          |
| <b><math>\lambda 18</math></b> | 0.00                | 0.00                                | 100.00                          |
| <b><math>\lambda 19</math></b> | 0.00                | 0.00                                | 100.00                          |

*Cuadro AI.VI. Análisis de inercia para las especies vegetales de roedores para la selección de componentes principales*

|                | <b>I de la nube</b> | <b>% varianza explicada</b> | <b>% varianza acumulada</b> |
|----------------|---------------------|-----------------------------|-----------------------------|
| $\lambda_1$    | 7.08                | 37.24                       | 37.24                       |
| $\lambda_2$    | 4.34                | 22.82                       | 60.05                       |
| $\lambda_3$    | 3.93                | 20.67                       | 80.73                       |
| $\lambda_4$    | 1.71                | 9.01                        | 89.74                       |
| $\lambda_5$    | 1.02                | 5.39                        | 95.13                       |
| $\lambda_6$    | 0.48                | 2.55                        | 97.68                       |
| $\lambda_7$    | 0.18                | 0.95                        | 98.62                       |
| $\lambda_8$    | 0.09                | 0.49                        | 99.12                       |
| $\lambda_9$    | 0.08                | 0.41                        | 99.53                       |
| $\lambda_{10}$ | 0.04                | 0.21                        | 99.74                       |
| $\lambda_{11}$ | 0.01                | 0.06                        | 99.81                       |
| $\lambda_{12}$ | 0.01                | 0.05                        | 99.86                       |
| $\lambda_{13}$ | 0.01                | 0.04                        | 99.90                       |
| $\lambda_{14}$ | 0.01                | 0.04                        | 99.94                       |
| $\lambda_{15}$ | 0.01                | 0.03                        | 99.98                       |
| $\lambda_{16}$ | 0.00                | 0.02                        | 99.99                       |
| $\lambda_{17}$ | 0.00                | 0.00                        | 100.00                      |
| $\lambda_{18}$ | 0.00                | 0.00                        | 100.00                      |
| $\lambda_{19}$ | 0.00                | 0.00                        | 100.00                      |

Los datos de varianza explicada, son de utilidad para identificar el número de componentes principales requeridos para el análisis., por lo que se seleccionaron 4 componentes principales en el caso de las especies vegetales, y 3 para los roedores del Desierto Chihuahuense.

Una vez seleccionado el número de componentes principales, se procedió a la realización del los productos matriciales de la matriz de datos centrada y estandarizada con los cuatro y tres vectores propios respectivamente.

#### **6. Círculo de correlaciones y comunalidades**

Como ya se describió con anterioridad, el círculo de correlaciones corresponde a la representación gráfica de la relación entre todas las variables, obtenida a través del cálculo de la correlación de cada variable con los componentes principales seleccionados, como se puede observar en la figura AI. I para las especies vegetales y AI.II para los roedores.

Figura A1.1. Círculo de correlaciones para las variables bioclimáticas de las especies vegetales.

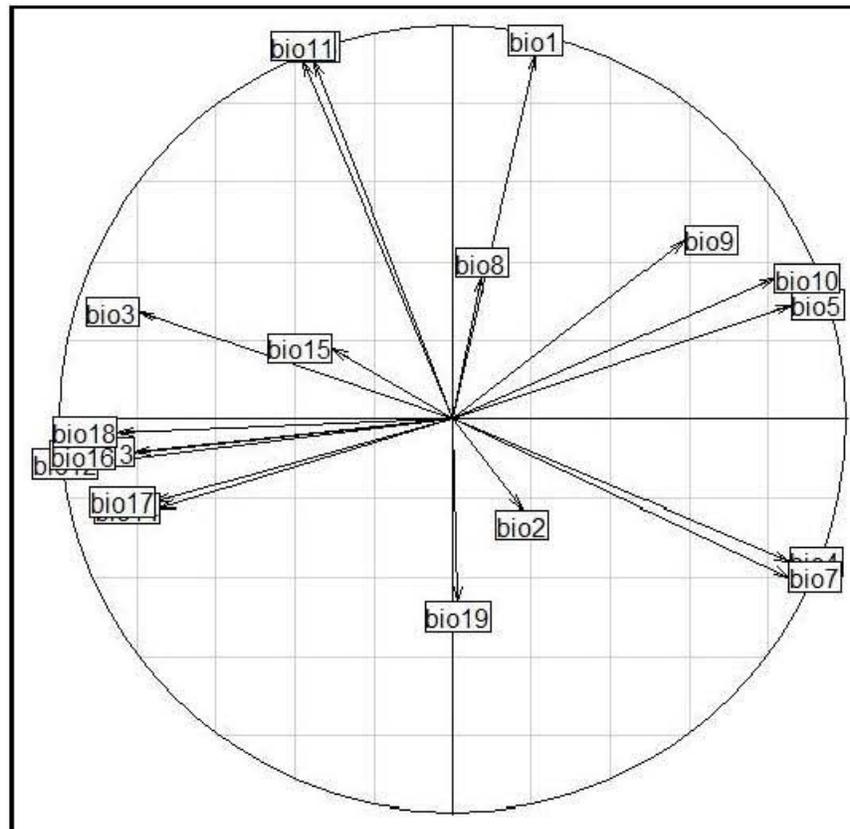
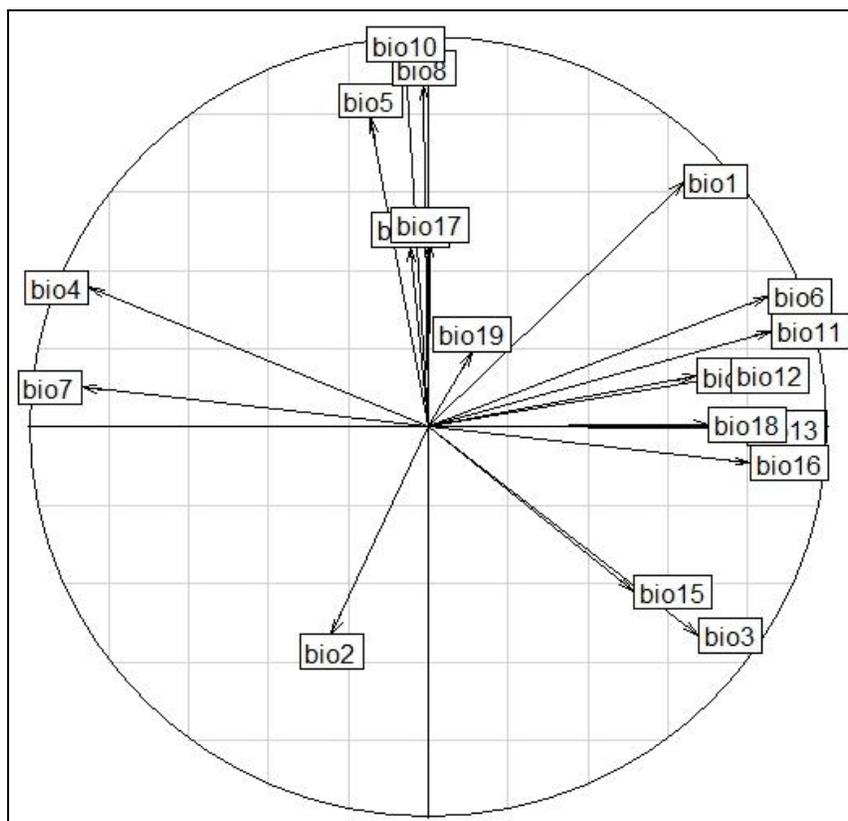


Figura AI.II. Círculo de correlaciones para las variables bioclimáticas con datos de roedores.



En un círculo de correlaciones, las variables con mejor representación, son aquellas que se encuentran más cerca de la circunferencia, y por su parte las más alejadas tienen menor calidad de representación.

De acuerdo a la figura AI. I, las variables bioclimáticas **2, 8, 9 y 19** para las especies vegetales, tienen menor calidad de representación, mientras que para los roedores las variables **2, 15 y 19** tienen una pobre representación en el círculo de correlaciones (ver figura AI:II).

Las comunales son una medida de la calidad de la representación de las variables en el círculo de correlaciones y corresponden a la suma de los cuadrados de las correlaciones de los componentes principales con las variables originales. Ver Cuadro AI.VII y AI.VIII.

*Cuadro AI.VII. Porcentaje de comunalidad de las variables bioclimáticas para las especies vegetales.*

| <b>Variable bioclimática</b> | <b>% de comunalidad</b> |
|------------------------------|-------------------------|
| 1                            | 96.246                  |
| 2                            | 38.932                  |
| 3                            | 93.676                  |
| 4                            | 98.090                  |
| 5                            | 93.721                  |
| 6                            | 95.623                  |
| 7                            | 94.438                  |
| 8                            | 28.136                  |
| 9                            | 62.895                  |
| 10                           | 97.575                  |
| 11                           | 97.565                  |
| 12                           | 95.925                  |
| 13                           | 96.386                  |
| 14                           | 87.025                  |
| 15                           | 86.188                  |
| 16                           | 97.674                  |
| 17                           | 91.546                  |
| 18                           | 80.596                  |
| 19                           | 38.900                  |

*Cuadro AI.VIII. Porcentaje de comunalidad de las variables bioclimáticas para las especies de roedores.*

| <b>Variable<br/>bioclimática</b> | <b>% de<br/>comunalidad</b> |
|----------------------------------|-----------------------------|
| 1                                | 97.33                       |
| 2                                | 40.37                       |
| 3                                | 84.01                       |
| 4                                | 90.97                       |
| 5                                | 82.64                       |
| 6                                | 91.54                       |
| 7                                | 78.78                       |
| 8                                | 93.57                       |
| 9                                | 64.32                       |
| 10                               | 97.71                       |
| 11                               | 94.31                       |
| 12                               | 94.63                       |
| 13                               | 82.53                       |
| 14                               | 82.97                       |
| 15                               | 48.74                       |
| 16                               | 81.03                       |
| 17                               | 84.88                       |
| 18                               | 73.28                       |
| 19                               | 70.23                       |

### **7. Representación de individuos en el plano principal**

Así como es posible la representación de las variables en un plano, también lo es para el caso de los individuos, donde las coordenadas de estos, corresponden a los componentes principales.

Como se observa en la Figura AI.III y Figura AI.IV los individuos tienen una buena representación en el plano, pues se encuentran ubicadas al centro del plano y agrupadas, esto es indicativo que la base de datos utilizada contaba con buenas georreferencias, aspecto importante en los modelos de distribución potencial actuales y de cambio climático.





Finalmente, y de acuerdo a la matriz de correlación y al círculo de correlaciones, las variables utilizadas para modelar a las especies de vegetación y roedores pertenecientes al Desierto Chihuahuense son:

*Cuadro AI.IX. Variables bioclimáticas seleccionadas para modelar a las especies vegetales*

| <b>Variable</b> | <b>Descripción</b>                                 |
|-----------------|--|
| Bio1            | Temperatura promedio anual                         |
| Bio4            | Estacionalidad de la temperatura                   |
| Bio5            | Temperatura máxima promedio del periodo más cálido |
| Bio10           | Temperatura promedio del cuatrimestre más cálido   |
| Bio11           | Temperatura promedio del cuatrimestre más frío     |
| Bio12           | Precipitación anual                                |
| Bio13           | Precipitación del periodo más lluvioso             |
| Bio17           | Precipitación del cuatrimestre más seco            |

*Cuadro AI.X. Variables bioclimáticas seleccionadas para modelar a las especies de roedores*

| <b>Variable</b> | <b>Descripción</b>                               |
|-----------------|--|
| Bio1            | Temperatura promedio anual                       |
| Bio3            | Isotermalidad                                    |
| Bio4            | Estacionalidad de la temperatura                 |
| Bio10           | Temperatura promedio del cuatrimestre más cálido |
| Bio11           | Temperatura promedio del cuatrimestre más frío   |
| Bio12           | Precipitación anual                              |
| Bio17           | Precipitación del cuatrimestre más seco          |

## X. Anexo II

A continuación se muestran los modelos de nicho ecológico obtenidos para tres especies bajo el escenario A2, para los patrones de respuesta ganancia, pérdida e inestable. Donde uno indica presencia y cero ausencia de condiciones climáticas favorables para la presencia y establecimiento de las especies.

### Ganancia

**Especie:** *Ariocarpus retusus*

Figura AIII.1. Modelo de distribución potencial de la especie *Ariocarpus retusus* para el tiempo actual.

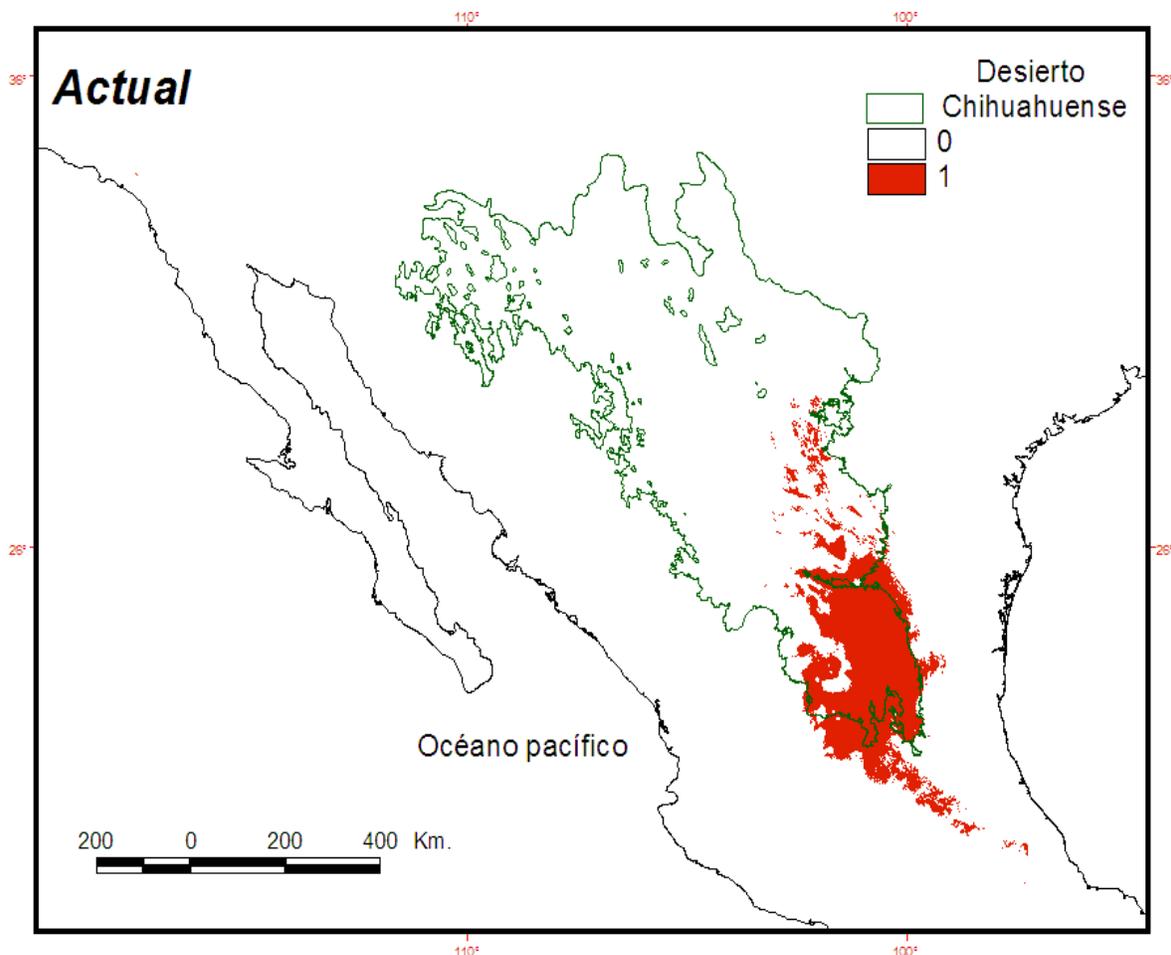


Figura AII.II. Modelo de distribución potencial de la especie *Ariocarpus retusus* para el horizonte de tiempo 2050, escenario A2.

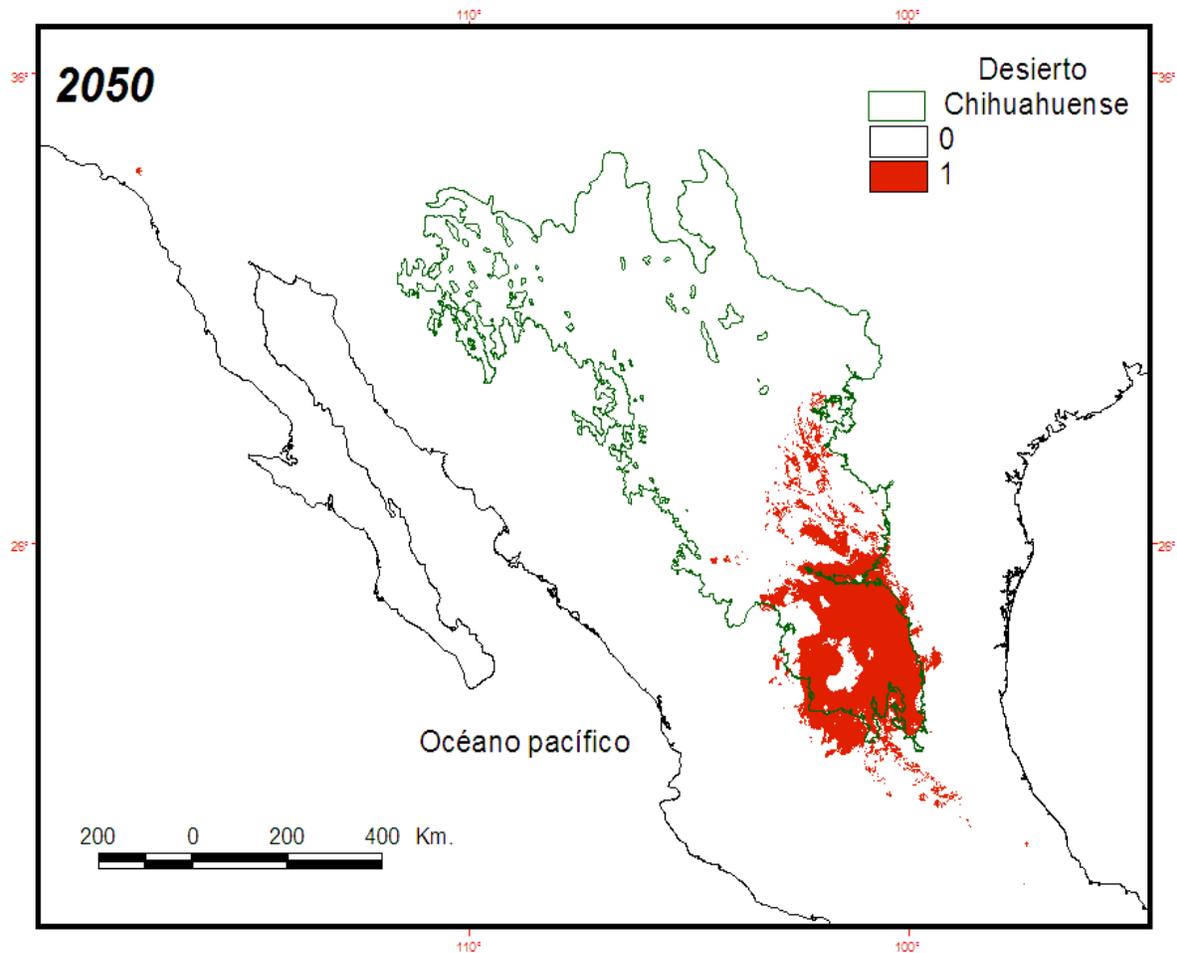
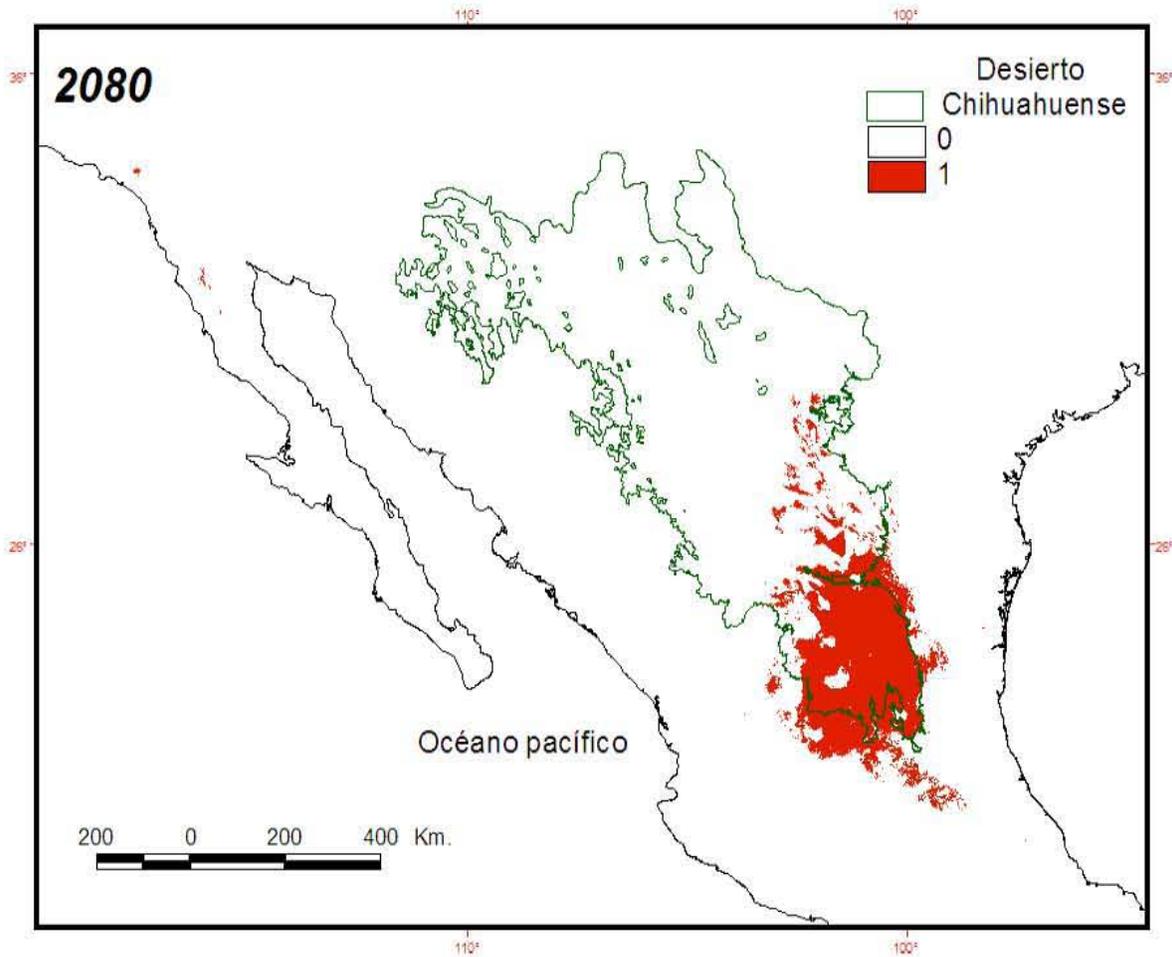


Figura AII.III. Modelo de distribución potencial de la especie *Ariocarpus retusus* para el horizonte de tiempo 2080, escenario A2.



## Pérdida

**Especie:** *Fouquieria shrevei*

Figura AII.IV. Modelo de distribución potencial de la especie *Fouquieria shrevei* para el tiempo actual.

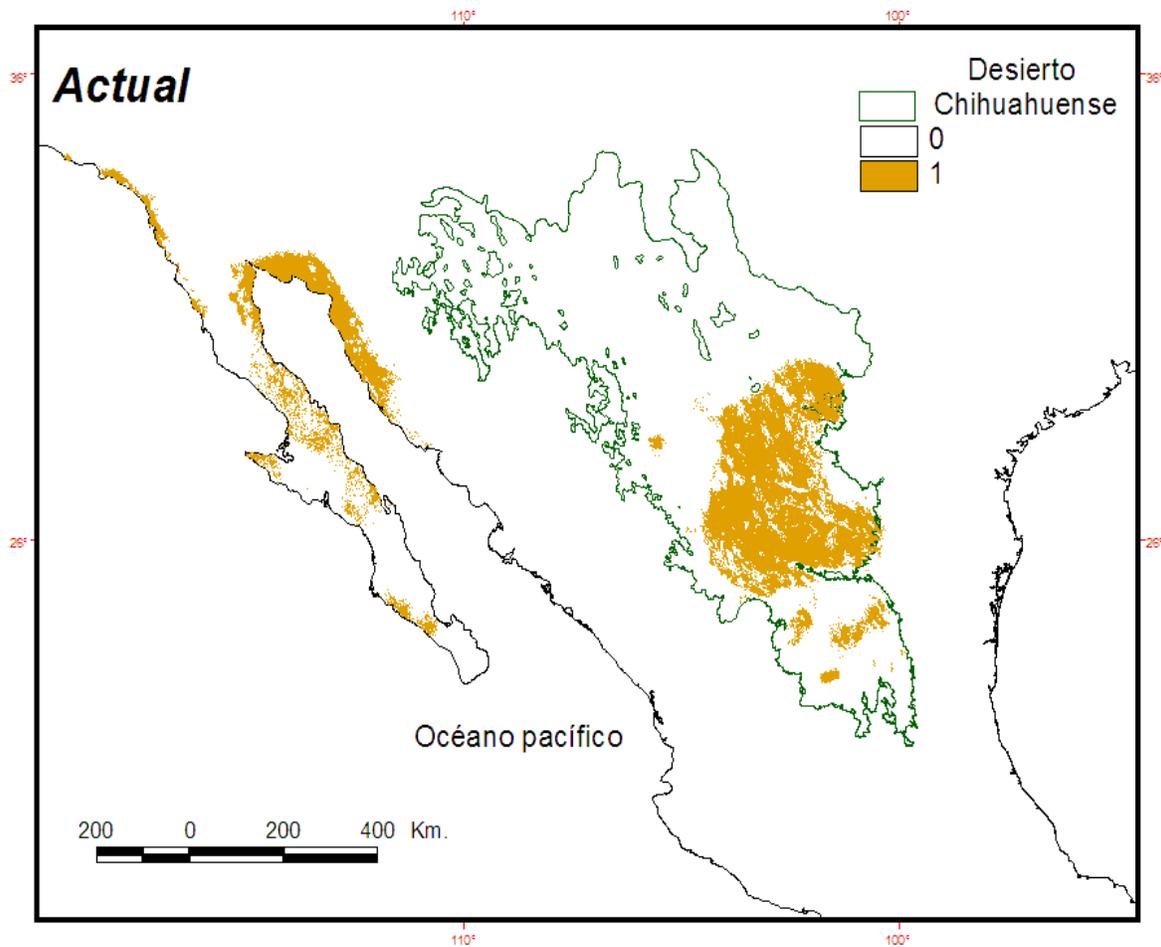


Figura AII.V. Modelo de distribución potencial de la especie *Fouquieria shrevei* para el horizonte de tiempo 2050, escenario A2.

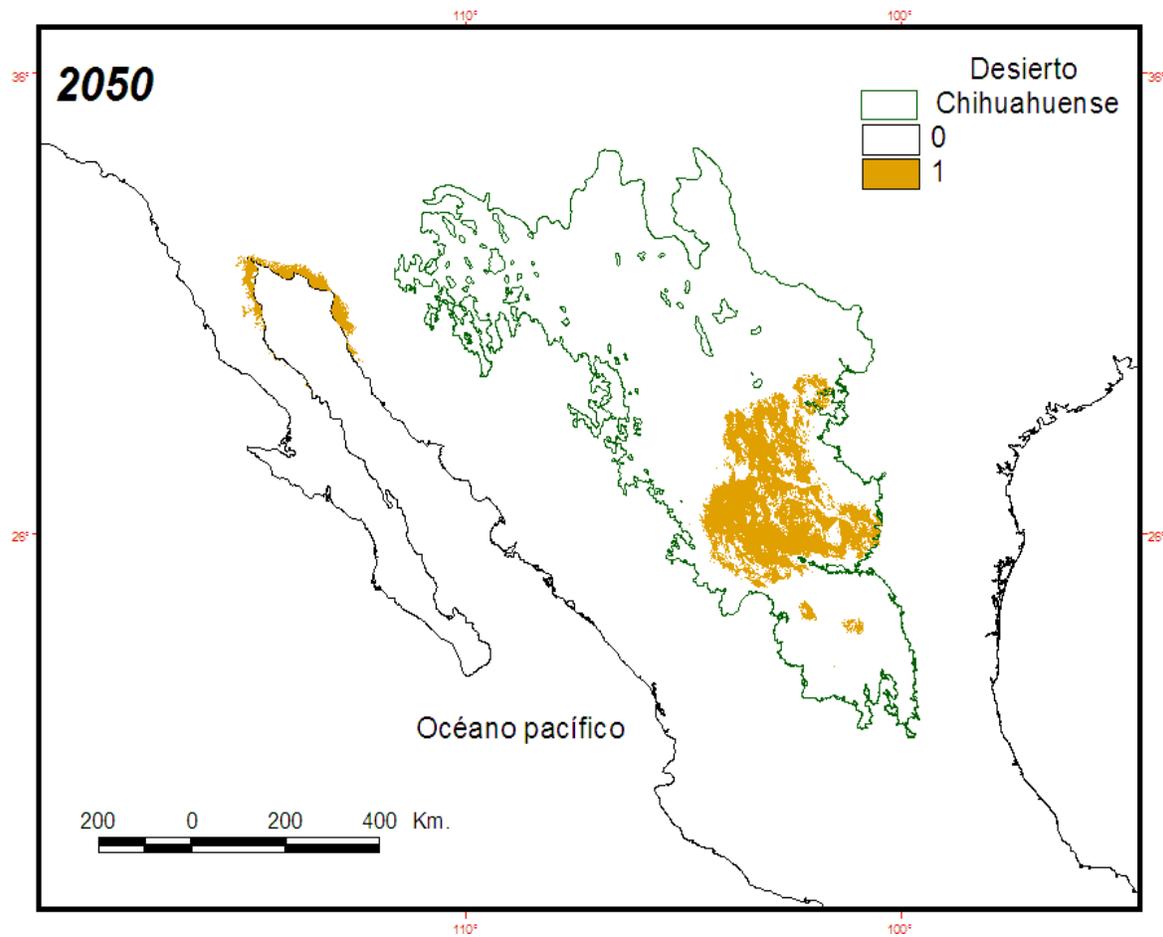
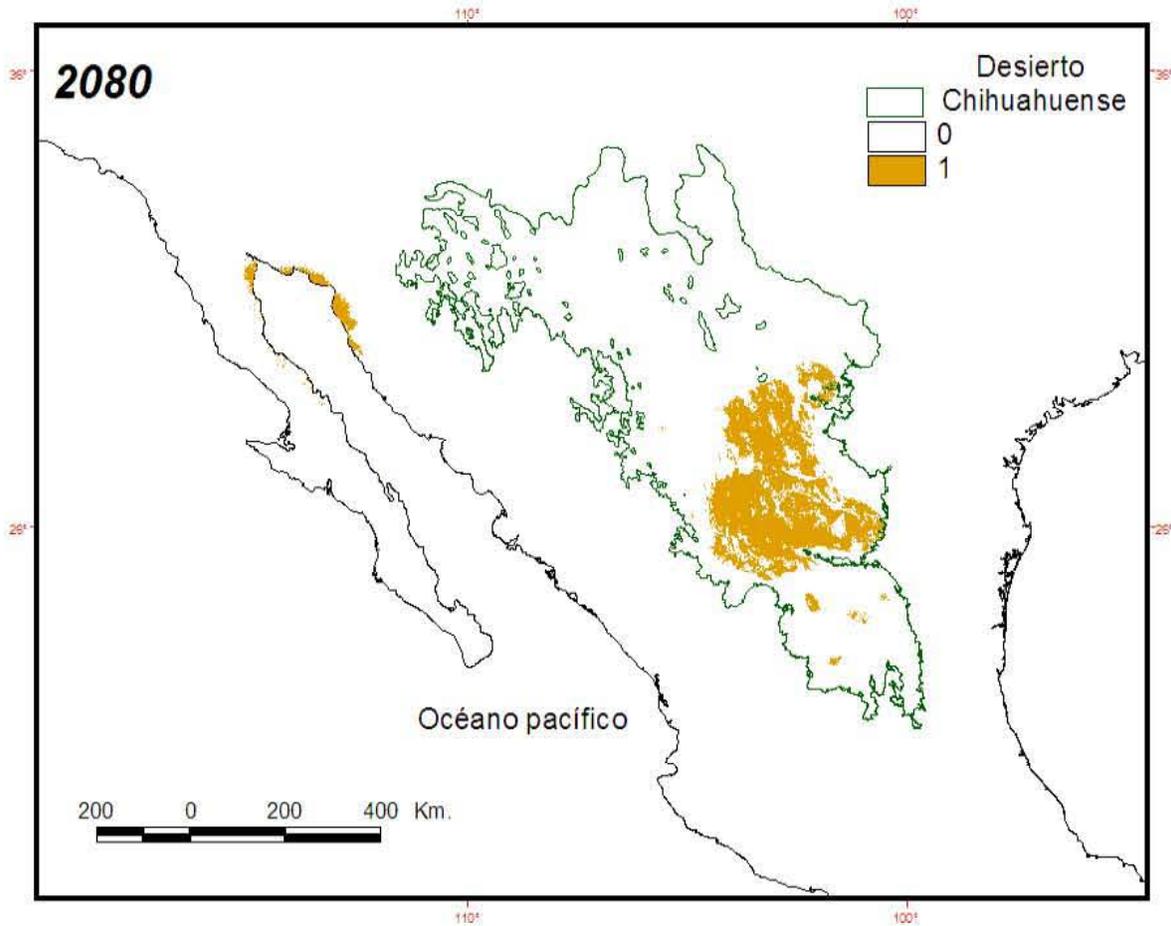


Figura AII.VI. Modelo de distribución potencial de la especie *Fouquieria shrevei* para el horizonte de tiempo 2080, escenario A2.



**Inestable**

**Especie:** *Mammillaria bocasana*

Figura AII.VII. Modelo de distribución potencial de la especie *Mammillaria bocasana* para el tiempo actual.

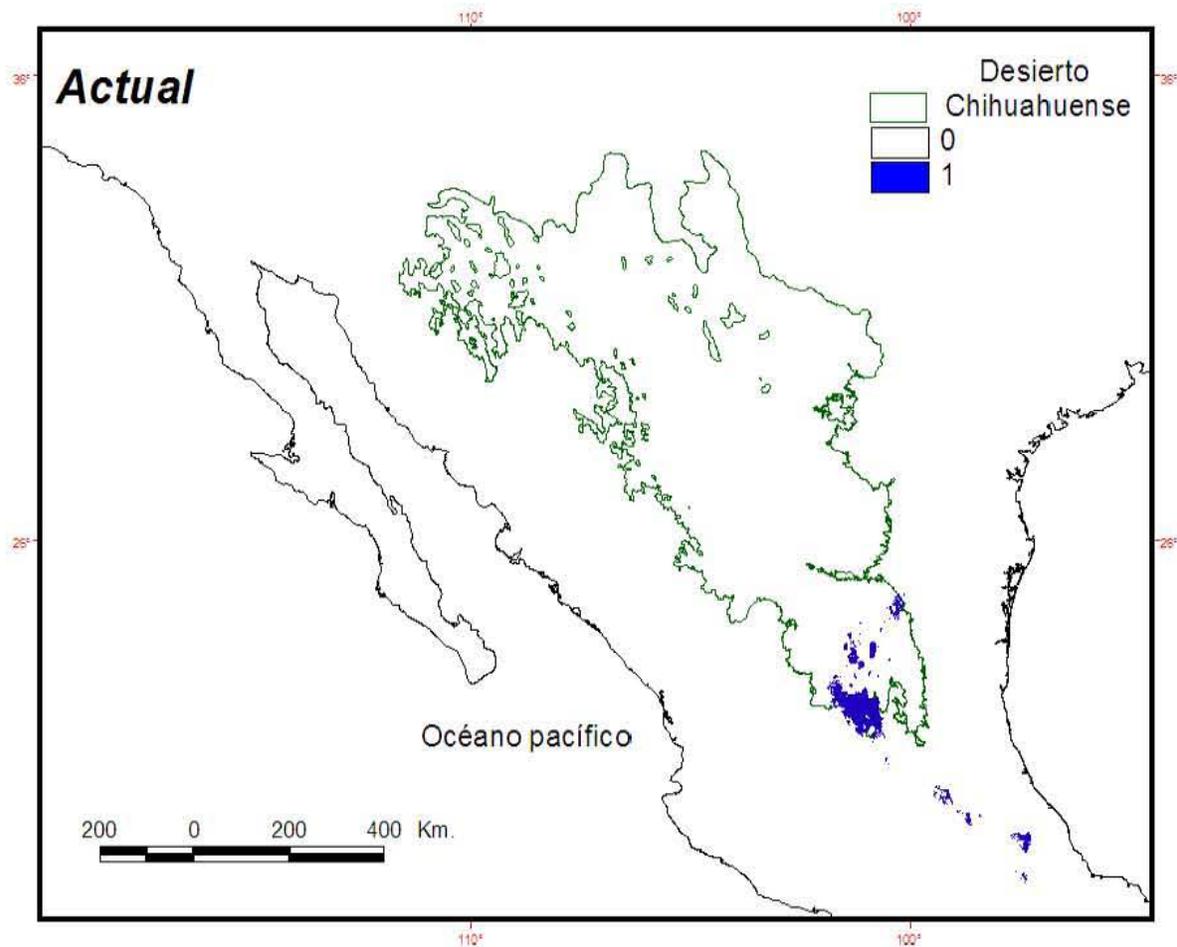


Figura AII.VIII. Modelo de distribución potencial de la especie *Mammillaria bocasana* para el horizonte de tiempo 2050, escenario A2.

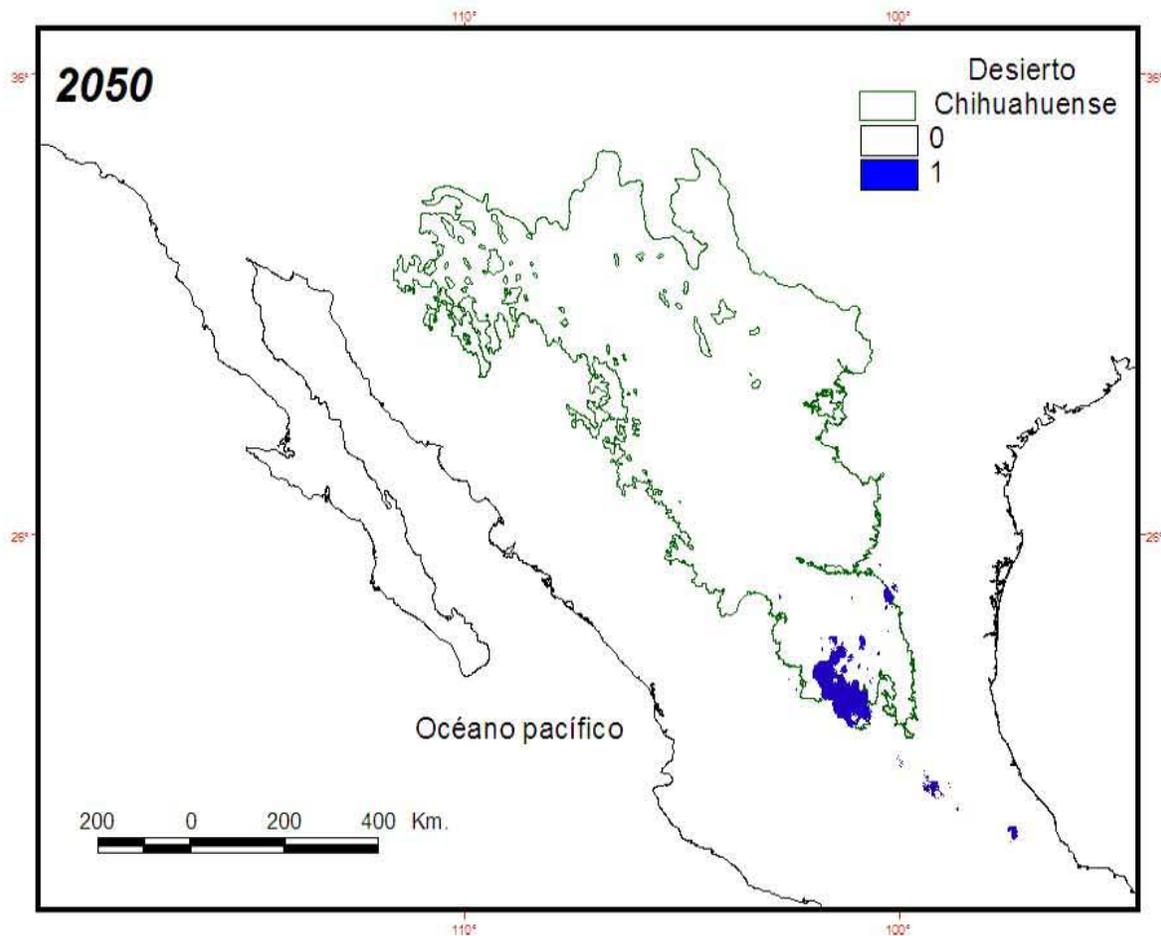
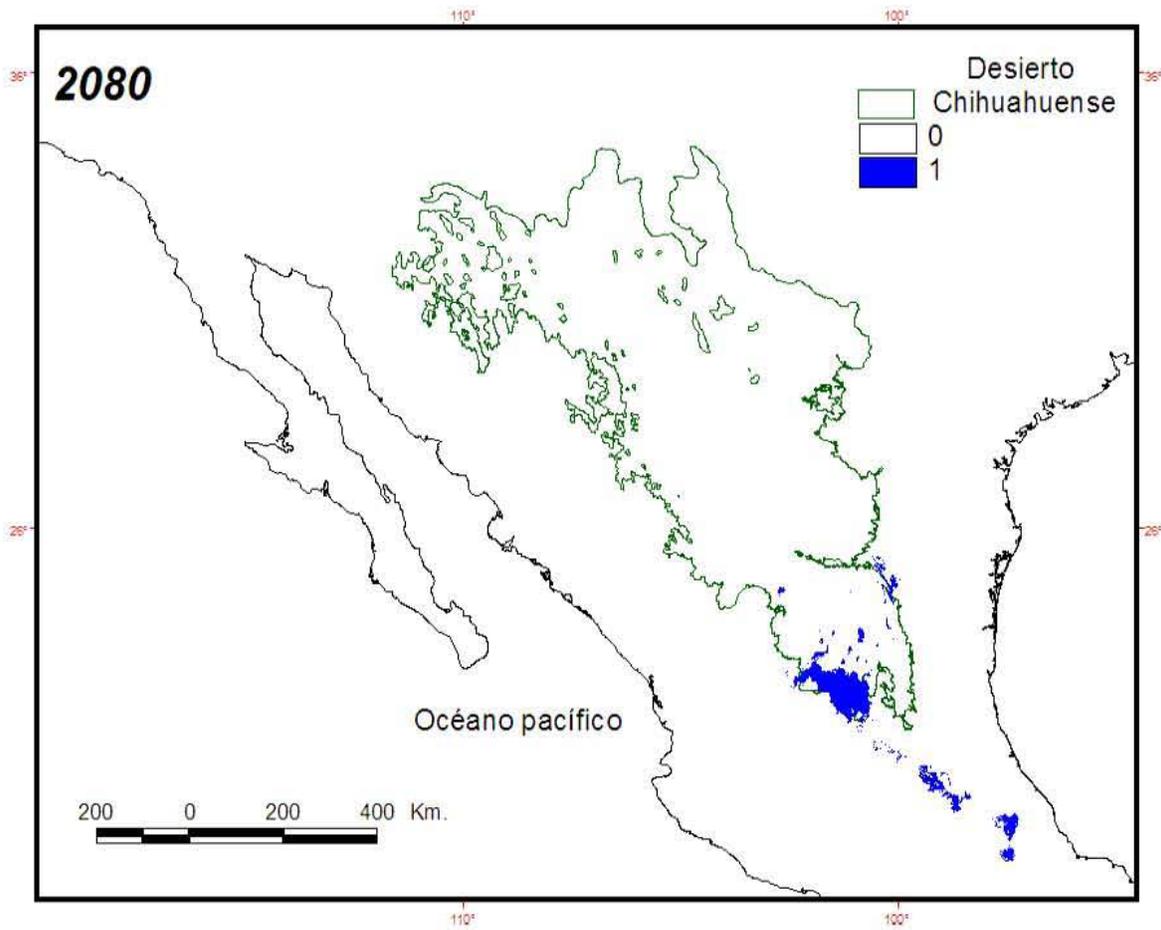


Figura AII.IX. Modelo de distribución potencial de la especie *Mammillaria bocasana* para el horizonte de tiempo 2080, escenario A2.



## **XI. Referencias consultadas**

- Ahrens, D., (2000), *Essentials of Meteorology: An Invitation to the Atmosphere*, sexta edición, Belmont, Estados Unidos.
- Amador, J. A., y Alfaro, E. J. (2009). Métodos de reducción de escala: aplicaciones al tiempo, clima, variabilidad climática y cambio climático. *Revista Iberoamericana de Economía Ecológica*, 11, 39-52
- Anderson R.P., Gómez-Laverde M. y Peterson T.. (2002). Geographical distributions of spiny pocket mice in South America: insights from predictive models. *Global Ecology and Biogeography* 11:131-141
- Anderson R.P. (2003). Real vs artefactual absences in species distributions: tests for *Oryzomys albigularis* (Rodentia: Muridae) in Venezuela. *Journal of Biogeography* 30:591-605
- Araujo, M.B. y A. Guisan. (2006). Five (or so) challenges for species distribution modelling. *Journal of Biogeography* 33: 1677-1688.
- Ballesteros-Barrera C., Martínez-Meyer E. y Gadsden H.. (2007). Effects of land-cover transformation and climate change on the distribution on two microendemic Lizards, genus *Uma*, of the Northern Mexico. *Journal of Herpetology* 41:733-740
- Ballesteros-Barrera C. (2008). Efecto del cambio climático global en la distribución de especies del Desierto Chihuahuense. Tesis de Doctorado. Universidad Nacional Autónoma de México. Facultad de Ciencias. México D.F
- Bellard, C., Bertelsmeier, C., Leadley, P., Thuiller, W. y Courchamp, F. (2012). Impacts of climate change on the future of biodiversity. *Ecology Letters*, 15: 365–377
- Butler C.J. Wheeler E.A. y Stabler B.L. (2012). Distribution of the threatened lace hedgehog cactus (*Echinocereus reichenbachii*) under various climate change scenarios. *The Journal of the Torrey Botanical Society*, 139(1):46-55.
- Bravo-Hollis H. (1978). *Las cactáceas de México*. Universidad Nacional Autónoma de México. México.

- Bolaños Guerrero, Fabricio. R Project: Su aplicación como software libre para análisis en componentes principales. Revista Electrónica "Actualidades Investigativas en Educación" [en línea] 2011, 11 (Julio-Sin mes): [Fecha de consulta: 18 de noviembre de 2013] Disponible en:<<http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=44718791006>>
- Botkin D.B., Saxe H., Araújo M.B., Betts R., Bradshaw R.H.W., Cedhagen T., Chesson P., Dawson T.P., Etterson J.R., Faith D.P., Ferrier S., Guisan A., Hansen A.S., Hibert D.W., Loehle C., Margules C., New M., Sobel M.J. y Stockwell D.R.B. (2007). Forecasting the effects of Global Warming on Biodiversity. *BioScience* 57:227-236
- Cameron G.N. y Scheel D. (2001). Getting Warmer: Effect of Global Climate Change on Distribution of Rodents in Texas. *Journal of Mammalogy*: August 2001, 82(3): 652-680.
- Chavarria M.J. y Fallas J.J. Implementación del Análisis en Componentes Principales con el software estadístico R. *Revista digital matemática* [En línea] marzo 2011, Vol. 11 n.2 [fecha de consulta: noviembre 2013] Disponible en: [http://www.tec-digital.itcr.ac.cr/revistamatematica/ARTICULOS\\_V11\\_N2\\_2011/JJFLLAS\\_JCHAVARRIA\\_V11N2\\_2011/](http://www.tec-digital.itcr.ac.cr/revistamatematica/ARTICULOS_V11_N2_2011/JJFLLAS_JCHAVARRIA_V11N2_2011/)
- Chu C., Mandrak N. y Minns C., (2005). Potential impacts of climate change on the distributions of several common and rare freshwater fishes in Canada. *Diversity and Distributions* 11:299-310.
- CONABIO. (Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad) (2008). *Capital natural de México, vol. I: Conocimiento actual de la biodiversidad.*, México.
- Conde, C., R. Ferrer, y S. Orozco. (2006). Climate change and climate variability impacts on rainfed agricultural activities and possible adaptation measures. A Mexican case study. *Atmósfera*, 19(3): 181-194
- Dodd, L. E. y Pepe, M. S. (2003). Partial AUC estimation and regression. *Biometrics*. 59: 614-623.
- Elith, J., Kearney, M. y Phillips, S. (2010), The art of modelling range-shifting species. *Methods in Ecology and Evolution*, 1: 330–342
- Elith, J., Phillips, S. J., Hastie, T., Dudík, M., Chee, Y. E. y Yates, C. J. (2011), A statistical explanation of MaxEnt for ecologists. *Diversity and Distributions*, 17: 43–57.
- 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 & R. González (comps.). Memorias de la XIX Reunión Nacional SELPER-México. Centro de Investigaciones en Geografía Ambiental, UNAM. pp. 110-113.
- Farber O. y Kadmon, R. (2003). Assessment of alternative approaches for bioclimatic modeling with special emphasis on the Mahalanobis distance. *Ecological Modelling* 160:115-130
- Feria T. y Peterson A. (2002). Prediction of bird community composition based on point-occurrence data and inferential algorithms: a valuable tool in biodiversity assessments. *Diversity and Distributions* 8:49-56.
- Gadsen H. Ballesteros-Barrera C., Hinojosa de la Garza O., Castañeda G., García-De la Peña C. y Lemos-Espinal J.A. (2012). Effects of land-cover transformation and climate change on the distribution of two endemic lizards, *Crotaphytus antiquus* and *Sceloporus cyanostictus*, of northern Mexico. *Journal of Arid Environments* 83:1-9
- Gian-Reto W. (2010). Community and ecosystem responses to recent climate change. *Phil. Trans. R. Soc. B.* 365, 2019–24.
- Gilman, S. E., Urban M. C., Tewksbury J., Gilchrist G. W y Holt R. D.. (2010). A framework for community interactions under climate change. *Trends in Ecology and Evolution* 25: 325–331.
- González, P. A. y Sosa, C. M. (2003). Análisis de la vegetación del área de protección de flora y fauna Cañón de Santa Elena (Desierto Chihuahuense, México) utilizado Modelos Digitales de Elevación. *Ecosistemas*, XII.
- Guisan A. y Thuiller W. (2005). Predicting species distribution: offering more than simple habitat models. *Ecology Letters* 8: 9993-1009
- Guisan A., Broennimann, O., Engler, R., Vust, M., Yoccoz, N. G., Lehmann, A. y Zimmermann, N. E. (2006), Using Niche-Based Models to Improve the Sampling of Rare Species. *Conservation Biology*, 20: 501–511
- Gutiérrez Estrada E., (2010). Efecto del cambio climático en la distribución de cinco especies arbóreas de México. Tesis de licenciatura. Facultad de Ciencias. Universidad Nacional Autónoma de México.

- Hawkins B.A., Diniz-Filho J.A.F., Jaramillo C.A. y Soeller S.A., (2006). Post-Eocene climate change, niche conservatism, and the latitudinal diversity gradient of the New World birds. *Journal of Biogeography* 33:770-780
- Hernández, H. M., Gómez-Hinostrosa C. y Goettsch B. (2004). Checklist of Chihuahuan Desert Cactaceae. *Harvard Papers in Botany* 9(1): 51-68
- Hernández, H. M. y Gómez-Hinostrosa C. (2005). Cactus diversity and endemism in the Chihuahuan Desert Region. En: J. L. Cartron, R. Felger and, G. Ceballos (eds.) *Biodiversity and conservation in Northern Mexico*. Oxford University Press, Nueva York, pp. 264-275
- Hernández H.M. (2006). *La vida en los desiertos mexicanos*. Fondo de Cultura Económica. México.
- Hernández-Oria J.G., Chávez-Martínez R.J., Sánchez-Martínez E. (2007). Factores de riesgo en las Cactaceae amenazadas de una región semiárida en el sur del desierto Chihuahuense. *INCI*. 32(11): 728-734.
- Hernández R.O. (1998). *Temas de análisis estadístico multivariado*. Editorial de la Universidad de Costa Rica. San José Costa Rica.
- Hijmans, R. J., Cameron, S. E., Parra, J. L., Jones, P. G. y Jarvis, A. (2005), Very high resolution interpolated climate surfaces for global land areas. *International Journal of Climatology*, 25: 1965–1978
- Holt, R. D., (1990). The microevolutionary consequences of climate change. *Trends Ecology Evolution*. 5(9): 311-325
- Hutchinson, G. E. (1957). Concluding remarks. *Cold Spring harbor Symposia on Quantitative Biology*. 22:415-427.
- Illoldi-Rangel, P. y Escalante T. (2008). De los modelos de nicho ecológico a las áreas de distribución geográfica. *Biogeografía* 3: 7 -12.
- INE-SEMARNAT. (2006). México tercera comunicación nacional ante la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático. Instituto Nacional de ecología. México. pp 89
- INEGI-CONABIO-INE. (2008) *Ecorregiones terrestres de México*. Escala 1:1000000. Instituto Nacional de Estadística y Geografía -Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad-Instituto Nacional de Ecología, México, D.F.

- IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change), (1997), Introducción a los modelos climáticos simples utilizados en el Segundo Informe de Evaluación del IPCC – Documento técnico II, J.T. Houghton, L.G. Meira Filho, D.J. Griggs y K. Maskell (Eds.) IPCC, Ginebra, Suiza.
- IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change), (2000). Informe especial del IPCC, escenarios de emisiones, resumen para responsables de políticas. Grupo Internacional de Expertos sobre Cambio Climático.
- IPCC, (Intergovernmental Panel on Climate Change), (2002), Cambio Climático y Biodiversidad. Gitay, H., Suárez, A. Watson R. Y Dokken D. (Eds). Unidad de Apoyo Técnico del Grupo de Trabajo II del IPCC. IPCC, Ginebra, Suiza.
- IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change), (2013), Grupo de trabajo I: Contribución al quinto reporte de evaluación de cambio climático: 2013: La base científica.
- Johnston IM (1941) Gypsophily among Mexican desert plants. *Journal of the Arnold Arboretum* 22:145-170.
- Kappelle M., Van Vuuren M., y Baas P., (1990). Effects of climate change on biodiversity: a review and identification of key research issues. *Biodiversity and conservation* 8: 1383-1397
- Kim, S-J, Flato G., Boer G.J. y Mcfarlane N. (2002), A coupled climate model simulation of the Last Glacial Maximum: Part 1, Transient Response. *Climate Dynamics*, 19, 515-537.
- Knouft J.H., Losos J.B., Glor R.E. y Kolbe J.J., (2006), Phylogenetic analysis of the evolution of the niche in lizards of the *Anolis sagrei* group. *Ecology* 87:S29-S38
- Lindenmayer, D.B., Mackey, B.G. y Nix, H.A. (1996). The bioclimatic domains of four species of commercially important eucalypts from south-eastern. Australia. *Australian Forestry* 59 (2): 74-89
- Loiselle B, Howell C., Graham C., Goerck J., Brooks T., Smith K. y P. Williams. 2003. Avoiding pitfalls of using species distribution models in conservation planning. *Conservation Biology* 17:1591-1600.
- Magaña, V., B. Graizbord, J. Buenfil, L. Gómez, B. Méndez, E. Cateano, J. Méndez, E. Pérez, E. Nava, A. Martínez, J. Ramírez, R. Lemus, D. Ocaña y C. Neri (2009). Escenarios de cambio climático y tendencias en la zona del Golfo de México. En: Buenfil J. (Ed). *Adaptación a los impactos del cambio climático en los humedales costeros del Golfo de México*. Vol. II.

- Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, Instituto Nacional de Ecología. México. pp 569-673.
- Martínez-Meyer E y Navarro-Sigüenza A. (2003). Evolution of seasonal ecological niches in the *Passerina* buntings (Aves: Cardinalidae). *Proceedings of the Royal Society, London B* 271:1151-1157.
- Martínez-Meyer E., Peterson A.T., y Hargroves W.W. (2004). Ecological niches as stable distributional constraints on mammal species, with implications for Pleistocene extinctions and climate change projections for biodiversity. *Global Ecology and Biogeography* 13:305-314
- Martínez-Meyer E. (2005). Climate change and biodiversity: some considerations in forecasting shifts in species' potential distributions. *Biodiversity Informatics* 2:42-55
- Martínez-Meyer, E y Peterson A.T.. (2006). Conservatism of ecological niche characteristics in North American plant species over the Pleistocene-to-Recent transition. *Journal of Biogeography*. 33:1779–1789.
- Martínez-Meyer, E. (2012). Advances, Limitations, and Synergies in Predicting Changes in Species' Distribution and Abundance under Contemporary Climate Change. En E. Beever, J. Belant (Editores). *Ecological Consequences of Climate Change Mechanisms, Conservation, and Management*. (pp 67-84). Estados Unidos. CRC Press.
- Mateo R. Felicísimo Á. y Muñoz J. (2011). Modelos de distribución de especies: Una revisión sintética. *Revista chilena de historia natural*, 84 (2), 217-240.
- Metcalf E. S. (2006) Late quaternary environments of the northern deserts and central transvolcanic belt of Mexico. *Annals of the Missouri Botanical Garden*. 93 (2), 258-273
- Mittermeier, C., Ceballos G., Ezcurra E., Schmidt R., Hernández H., Goettsch B., Konstant W y Robles P. (2002). El gran desierto de Chihuahua, en Mittermeier, R., Mittermeier C., Robles-Gil P., Pilgrim J., Fonseca G., Brooks T., Konstant W (coord.). *Áreas silvestres: Las últimas regiones vírgenes del mundo*, Cemex, México.
- Morrone, J.J. (2005). Hacia una síntesis biogeográfica de México. *Revista mexicana de biodiversidad*. 76(2), 207-252.

- Palacios Reséndiz M.P. (2010), Efectos del cambio climático sobre la distribución de nopales (Género *Opuntia* y *Nopalea*: Cactaceae) en la región central de México. Tesis de maestría. Instituto de biología. Universidad Nacional Autónoma de México.
- Richard H. Moss, Jae A. Edmonds, Kathy A. Hibbard, Martin R. Manning, Steven K. Rose, Detlef P. van Vuuren, Timothy R. Carter, Seita Emori, Mikiko Kainuma, Tom Kram, Gerald A. Meehl, John F. B. Mitchell, Nebojsa Nakicenovic, Keywan Riahi, Steven J. Smith, Ronald J. Stouffer, Allison M. Thomson, John P. Weyant & Thomas J. Wilbanks, (2010). The next generation of scenarios for climate change research and assessment. *Nature* 463: 747-756.
- Nenzén H.K. y Araújo M. B. (2011). Choice of threshold alters projections of species range shifts under climate change. *Ecological Modelling*, 222, 3346-3354
- Nix, H. A. (1986). A biogeographic analysis of Australian elapid snakes. *in* R. Longmore, editor. Atlas of Elapid Snakes of Australia. Australian Government Publishing Service, Canberra.
- Norma Oficial Mexicana NOM-059-SEMARNAT-2010, Protección ambiental-Especies nativas de México de flora y fauna silvestres-Categorías de riesgo y especificaciones para su inclusión, exclusión o cambio-Lista de especies en riesgo.
- Ochoa-ochoa L.M., Rodriguez P., Mora F., Flores-Villela O., y Whittaker R. (2012). Climate change and amphibian diversity patterns in Mexico, *Biological Conservation*. 150:94-102
- ONU (Organización de las Naciones Unidas). (1992). Convención marco de las naciones unidas sobre el cambio climático. Nueva York, Estados Unidos.
- Parra-Olea G., Martínez-Meyer E., y Pérez-Ponce de León G. (2005). Forecasting climate change effects on Salamander distribution in highlands of Central Mexico. *Biotropica* 37:202-208
- Palma-Grayeb, B.E., Conde-Álvarez C., Morales-Cortez R.E. y Colorado-Ruiz G. (2008). Escenarios climáticos. En Estudios para un Programa Veracruzano ante el Cambio Climático. Universidad Veracruzana, Instituto Nacional de Ecología y Embajada Británica en México. Cap. 3. Modelación climática y evidencia estadísticas
- Pearson R.G., y T.P. Dawson (2003). Predicting the impacts of climate change on the distribution of species: are bioclimate envelope models useful? *Global Ecology & Biogeography* 12: 361-371
- Pedroza H. y Dicoovsky L. (2007). Sistema de análisis estadístico con SPSS. INTA. Nicaragua.

- Peterson, A.T., Soberón, J. y V. Sánchez-Cordero. (1999). Conservatism of ecological niches in evolutionary time. *Science* 285: 1265-1267
- Peterson A.T., Sánchez-Cordero V., Soberón J., Bartle J., Buddemeier R.W., Navarro-Sigüenza A.G. (2001). Effects of global climate change on geographic distributions of Mexican Cracidae. *Ecological modeling* 14:21-30
- Peterson A.T., Ortega-Huerta M.A, Bartley J., Sánchez-Cordero V., Soberon J., Robert H. Buddemeier, y D.R.B. Stockwell. (2002). Future projections for Mexican faunas under global climate change scenarios. *Nature* 416:626-629
- Peterson A.T., y R.D. Holt (2003). Niche differentiation in Mexican birds: using point occurrences to detect ecological innovation. *Ecology Letters* 6:774-782
- Peterson, A.T., Papes M. y Eaton M.. (2007). Transferability, and model evaluation in ecological niche modeling: a comparison of GARP and Maxent. *Ecography* 30, 550–560.
- Peterson A.T. (2011) Ecological niche conservatism: a time-structured review of evidence. *Journal of Biogeography* 38: 817–828.
- Phillips, S. J, Dudik, M. y Schapire, R.E. (2004). A maximum entropy approach to species distribution modeling. *Proceedings of the Twenty-First International Conference on Machine Learning*. ACM Press, New York, pp. 472–486.
- 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 Dudik M. (2008) Modeling of species distributions with Maxent: new extensions and a comprehensive evaluation. *Ecography* 31:161-175
- Pliscoff P y Fuentes-Castillo T. (2011). Modelación de la distribución de especies y ecosistemas en el tiempo y en el espacio: una revisión de las nuevas herramientas y enfoques disponibles. *Revista de geografía Norte Grande*, (48), 61-79.
- Riddle, B.R. y D.J. Hafner. (2006). Biogeografía histórica de los desiertos cálidos de Norteamérica. *New Mexico Museum of Natural History and Science Bulletin* 32:57-65.
- Risto K. H. Luoto M. Araújo M.B. Virkkala R. Thuiller W y Sykes M.T. (2006). Methods and uncertainties in bioclimatic envelope modelling under climate change. *Progress in Physical Geography* 30: 751-777

- Root T.L., Price J.T., Hall K. R., Schneider S.H., Rosenzweig C. y Pounds J.A. (2003), Fingerprints of global warming on wild animals and plants. *Nature* 421:57-60
- Rzedowski J.R. (1968) *Vegetación de México*. Editorial Limusa, México, D.F.
- Sánchez-Cordero V., Cirelli V., Munguía M. y Sarkar S. (2005). Place prioritization for biodiversity representation using ecological niche modeling. *Biodiversity Informatics* 2:11-23
- Sánchez-Cordero V., Illoldi-Rangel P., Linaje M., Sarkar S. y Peterson A.T. (2005). Deforestation and extant distributions of Mexican endemic mammals. *Biological Conservation* 126: 465-473.
- Sawada, M., Viau, A.E., Vettoretti, G., Peltier, W.R., Gajewski, K.(2004). Comparison of North-American pollen-based temperature and global lake-status with CCCma AGCM2 output at 6 ka. *Quaternary. Sci. Rev.* 23, 225–244.
- SEMARNAT. (Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales). (2005). *Informe de la Situación del Medio Ambiente en México*. México.
- Soberón, J. y Peterson A. T. (2005). Interpretation of models of fundamental ecological niches and species' distributional areas. *Biodiversity Informatics* 2:1-10.
- Soberón, J. (2010). Niche and area of distribution modeling: a population ecology perspective. *Ecography* 33:159-167.
- Stockwell, D. R. B. y Peters D.P. (1999). The GARP modelling system: problems and solutions to automated spatial prediction. *International Journal of Geographic Information Systems* 13:143-158.
- Synes N y Osborne P. E. (2011). Choice of predictor variables as a source of uncertainty in continental-scale species distribution modelling under climate change. *Global Ecology and Biogeography* 20: 904–914.
- Téllez-Valdés O y Dávila-Aranda P. (2003) Protected areas and climate change: A case study of the cacti in the Tehuacán-Cuicatlán Biosphere Reserve, México. *Conservation Biology* 17: 846-853.
- Thompson, R. S. y Anderson, K. H. (2000), Biomes of western North America at 18,000, 6000 and 014C yr bp reconstructed from pollen and packrat midden data. *Journal of Biogeography*, 27:555–584.

Thuiller, W.; Lafourcade, B. ;Engler R. y Araujo, M. (2009). BIOMOD a platform for ensemble forecasting of species distributions. *Ecography*. 32:369-373.

Toledo, V. M. (1997). La diversidad ecológica de México. Florescano E. (Coord.), El patrimonio nacional de México. Fondo de Cultura Económica. México.

Vargas J.H., Consiglio T., Jorgensen P.M. y Croat T.B. (2004). Modelling distribution patterns in a species-rich plant genus, *Anthurium* (Araceae), in Ecuador. *Diversity and Distributions* 10:211-216.

Václavík, T., Kupfer, J. A. y Meentemeyer, R. K. (2012), Accounting for multi-scale spatial autocorrelation improves performance of invasive species distribution modelling (iSDM). *Journal of Biogeography*, 39: 42–55.

Vié, J. C., Hilton-Taylor C. y Stuart S. N. (2009). *Wildlife in a Changing World – An Analysis of the 2008 IUCN Red List of Threatened Species*. Gland, Switzerland: IUCN

Villers-Ruíz, L. Y Trejo I., (1998). El impacto del cambio climático en los bosques y áreas naturales protegidas de México. *Interciencia* 23:10-19