



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE
MÉXICO**

FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES IZTACALA

Efecto del cambio climático en la distribución potencial de
cactáceas columnares y sus implicaciones en la conservación a
largo plazo

TESIS

PARA OBTENER EL TÍTULO DE

BIÓLOGO

P R E S E N T A

MICHAEL JOSHUE RENDÓN BARRÓN

DIRECTOR DE TESIS: OSWALDO TÉLLEZ VALDÉS

Los Reyes Iztacala, Edo. de México, 2014



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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

AGRADECIMIENTOS

A la Carrera de Biología, Facultad de Estudios Superiores Iztacala, UNAM.

Al Programa de Apoyo a Proyectos de Investigación e Innovación Tecnológica (PAPIIT), por haberme otorgado la beca, con el proyecto: IN216912, lo cual ha ayudado en terminar mis estudios de licenciatura.

A los miembros del Comité Tutorial, quienes han revisado la presente tesis de licenciatura: Dr. Raymundo Montoya Ayala, Dra. Verónica Farías González, Dr. Rafael Lira Saade y Dr. Mario Eduardo Suarez Mota

Al Dr. Oswaldo Téllez Valdés, por haberme aceptado como uno de sus tesis y por su apoyo en la elaboración de la tesis

DEDICATORIAS

Sin duda esta tesis se la dedico a mis familiares y amigos.

A mi padre, porque siempre me ha dado su amor y apoyo incondicionalmente, aunque haya cometido errores o me equivoque contigo muchas veces, sin embargo siempre has confiado en mí, especialmente en momentos que ni siquiera yo creía en mí mismo. Gracias por todo lo que me has enseñado y por todos los grandes sacrificios que has hecho.

A mi madre, al ser la persona más importante en mi vida, no existen maneras para agradecerte y recompensarte todo el trabajo que haces por mí, por procurarme y estar pendiente de lo que me pasa todos los días y en todo momento. Gracias por soportar los malos modos, la pereza, la terquedad, sin embargo te has mantenido firme y continuaste queriéndome, no sé como lo haces, pero gracias, eres una madre excepcional

A mis hermanos, porque a pesar de los malos entendidos, siempre han estado apoyándome, y sé que siempre voy a poder confiar en ustedes en todo momento, los quiero mucho.

A mis amigos de la carrera, por haber compartido con ellos una etapa muy importante de mi vida. Mario, gracias por ser como mi hermano, aunque nos conocimos de coincidencia, me alegra mucho que seas mi amigo. Erick y Oscar Arturo, el haber convivido con ustedes más de un año, me hizo apreciarlos mucho. Mariela, gracias, por siempre escucharme y regañarme, en especial este último año. Mirna, te admiro por ser tan responsable y tan buena amiga. Jossimar y Perla, gracias por los buenos momentos que hemos pasado, a todos los quiero mucho.

Al laboratorio de Farmacognosia, y a todo el equipo de trabajo: Ana, Javier, Rebeca, Miriam, Lesslie, Marlen y Karla, en especial a la Profesora Margarita Canales, por haberme enseñado muchas cosas dentro de su laboratorio y principalmente por ser como un segundo tutor, al igual que el laboratorio de Inmunobiología principalmente al profesor Marco A. Rodríguez

ÍNDICE

RESUMEN	1
INTRODUCCIÓN	3
Cactáceas columnares.	3
Modelado de nicho ecológico.....	4
Cambio climático.....	5
ANTECEDENTES	6
OBJETIVO GENERAL	8
OBJETIVOS PARTICULARES	8
METODOLOGÍA	9
Estructuración de la base de datos.....	9
Modelado de la distribución real.....	9
Obtención de las capas climáticas.....	9
Modelado de la distribución potencial.....	10
Modelado de cambio climático	11
RESULTADOS	12
Bases de datos.....	12
Distribución real.....	12
Distribución potencial actual y aplicación del modelo de cambio climático.....	15
DISCUSIÓN	20
CONCLUSIONES	23
REFERENCIAS	24

RESUMEN

Dentro del territorio mexicano, la Familia Cactaceae es de gran importancia al ser su centro de diversificación, con alrededor de 52 géneros y 850 especies. Dicha familia agrupa una importante diversidad de formas de vida, como los cactus arborescentes, columnares, herbáceas suculentas cespitosas, arbustivas barriliformes, trepadoras, epífitas, etc. Se ha documentado que estas plantas presentan características biológicas y ecológicas muy particulares que las hacen vulnerables a la perturbación, sin embargo aunque presentan un alto grado de riesgo, no se tiene información completa sobre sus patrones de distribución.

En la última década se ha podido reconocer la ubicación geográfica de numerosas especies, en función del concepto de nicho ecológico, con la elaboración de diversos modelos predictivos; los cuales han podido evaluar el impacto del cambio climático sobre la distribución de las especies, el cual se ha considerado una nueva amenaza en la conservación de muchas especies vegetales.

Al reconocer que México es vulnerable al cambio climático, el presente estudio tiene por finalidad analizar los posibles efectos del cambio climático en la distribución geográfica de algunas cactáceas columnares, como *Carnegiea gigantea*, *Pachycereus pringlei*, *P. pecten-aboriginum*, *Neobuxbaumia macrocephala*, *N. mezcalaensis*, *N. tetetzo* y *Pterocereus gaumeri*. Para ello: a) se estructuró una base de datos, b) se mapeó la distribución real, c) se modeló la distribución actual y e) se modeló el efecto del cambio climático en la distribución potencial en los años 2050 y 2080.

La base de datos contó con un total de 343 registros, donde únicamente las dos especies de *Pachycereus* presentaron más de 50 registros, una vez mapeada la distribución real, se observó que la mayoría de las especies únicamente se encuentran en un área Natural Protegida. De acuerdo a los mapas de distribución potencial, 5 de las 7 cactáceas columnares se encuentran en regiones donde aún no han sido registradas.

La distribución potencial ante el cambio climático muestran que *P. pringlei*, *P. pecten-aboriginum*, *P. pringlei*, *C. gigantea*, *N. macrocephala* y *N. tetetzo* presentan una

expansión en su distribución potencial. Sin embargo en el caso de las dos especies de *Neobuxbaumia*, dichos resultados contradicen a estudios anteriores, donde se reporta la contracción de su área en un 50 %.

Por otra parte *N. mezcalaensis* fue la única especie que presentó una mayor área de distribución potencial, para la época actual, por lo tanto puede ser considerada una especie en peligro, ya que se observa una disminución notable en su distribución para los años de 2050 y 2080.

INTRODUCCIÓN

Cactáceas columnares

Dentro del territorio mexicano se han contabilizado alrededor de 25,000 especies de plantas vasculares, que representan el 10% de la flora del planeta, y de éstas, más del 56% son endémicas (Villaseñor, 2003). Dentro del país numerosos grupos se han diversificado, como las familias Leguminosae, Cactaceae, Compositae, etc. Una de ellas, es la Familia Cactaceae, de la cual México es un centro importante de diversificación con alrededor de 52 géneros y 850 especies, de las cuales el 84% son endémicas (Álvarez *et al.*, 2004; Rzedowski, 1983). La familia es originaria del continente americano, diversificándose desde el norte de Canadá hasta el sur de la Patagonia, Argentina (Bravo-Hollis, 1978), desarrollándose principalmente en ambientes áridos y semiáridos, que coinciden a una latitud de 25°, donde predominan zonas con una presión atmosférica alta y corrientes de aire seco (Bravo-Hollis y Scheinvar, 1999).

Dentro de la Familia Cactaceae, se agrupa una gran diversidad de plantas, entre las que destacan los cactus columnares, los cactus candelabroformes, biznagas, trepadoras, pitahayas y una gran variedad de nopales entre otras (Jiménez, 2011). Las cactáceas columnares incluyen alrededor de 170 especies, de las cuales 80 se encuentran en México (Bravo-Hollis, 1978). Estas plantas son componentes principales de los bosques tropicales caducifolios y matorrales xerófilos de las zonas áridas y semiáridas, que cubren cerca de dos tercios del territorio nacional (Casas, 2002), no obstante, la principal importancia es su uso por el ser humano dentro de las comunidades rurales e indígenas.

Dentro de la región mesoamericana, se reporta el uso de 118 especies de cactáceas, de las cuales 45 son columnares. De ellas, 22 especies son gigantes (hasta 15 m de alto) y las 23 restantes, son relativamente más pequeñas (Bravo-Hollis, 1978; Bravo-Hollis y Sánchez-Mejorada, 1991). se documenta el uso de los frutos como alimento, al igual que los botones florales de algunas especies; los tallos se utilizan como leña, forraje para el

ganado y en casos más particulares, para la construcción de techos y de cercas campesinas, por lo tanto, no sólo constituyen como especies clave en las comunidades bióticas de las zonas áridas y semiáridas, sino que además son recursos con un considerable potencial económico (Casas, 2002). Sin embargo, este grupo de plantas presenta características biológicas y ecológicas muy particulares, que las hacen más vulnerables a diversos factores de perturbación (Hernández y Godínez, 1994), como el cambio del uso del suelo, la introducción de especies exóticas y la colecta de ejemplares, lo que aumenta la probabilidad de extinción de sus especies (Gutiérrez, 2007). Ante tal perspectiva, el estudio y conservación de estas plantas es una prioridad para el país.

Modelado de nicho ecológico

La definición de conservación ha sido parcial o incompleta, ya que no se tiene información completa del inventario biológico y sus patrones de distribución (Téllez-Valdés & Dávila-Aranda, 2003). En la última década, se ha podido delimitar la ubicación geográfica de numerosas especies, en función del concepto de nicho ecológico (Téllez-Valdés & Dávila-Aranda, 2003; Villaseñor & Téllez-Valdés, 2004; Téllez-Valdés *et al.*, 2004, 2006, 2007).

El nicho ecológico se puede entender como las condiciones ambientales bajo las cuales las especies pueden prosperar indefinidamente sin la necesidad de inmigración de individuos (Hutchinson, 1957). Este concepto se refiere a los límites de tolerancia de las especies, tanto a las condiciones climáticas como a la de sus especies interactuantes, por lo tanto el nicho de una especie determina su distribución y abundancia (Ballesteros-Barrera, 2011).

Con el propósito de conocer la distribución de las especies, se han elaborado diversos algoritmos predictivos, como Bioclim (Nix, 1986), GARP (Stockwell & Peters, 1999) y MaxEnt (Phillips *et al.*, 2006), que ayudan a estimar la distribución de especies en lugares donde no se tienen registros, usando un conjunto de datos georeferenciados de la especie, en función de parámetros obtenidos en colectas previas (Nix, 1986; Carpenter *et al.*, 1993; Chapman & Busby, 1994; Butterfield *et al.*, 1994; Sánchez-Cordero *et al.*, 2001; Anderson *et al.*, 2003); la mayoría de los modelos que predicen la presencia probable de

una especie, correlacionan los sitios ya conocidos para éstas, con un conjunto de factores ambientales, especialmente climáticos (Chapman & Busby, 1994), debido a que el clima es un factor importante que afecta o determina la distribución de los organismos; por tal motivo, los análisis de las variables climáticas ayudan a entender por qué una especie crece en un determinado sitio y no en otro (Lindenmayer *et al.*, 1991).

Los modelos se han utilizado esencialmente para análisis biogeográficos, ecológicos y de conservación (Anderson *et al.*, 2003; Téllez-Valdés & Dávila-Aranda, 2003), también ayudan a planificar o diseñar un mejor sistema dentro de las áreas naturales protegidas (Lindenmayer *et al.*, 1996; Peterson *et al.*, 2000). Recientemente se ha podido evaluar el impacto del cambio climático sobre la distribución de las especies, ya que es posible que el calentamiento global afecte negativamente la biodiversidad y su distribución, especialmente aquellos que son restringidos geográficamente o que tienen alta especificidad de hábitat (Midgley *et al.*, 2002).

Cambio climático

Se ha considerado al cambio climático como una nueva amenaza en la conservación de muchas especies vegetales, ya que se predice que el 50% de las especies de plantas superiores que existen en el mundo, se verían en peligro de extinción (Bramwell, 2007). Este concepto en la actualidad es conocido como calentamiento global, debido a que en los últimos años los registros instrumentales de temperatura muestran un incremento acelerado en la superficie del planeta, principalmente en el aire y los océanos; dicho aumento se encuentra distribuido por todo el planeta y es más acentuado en las latitudes septentrionales superiores, otra prueba es el deshielo generalizado que repercute en el ascenso del nivel del mar (IPCC, 2007).

La alteración del clima es ocasionada por las concentraciones de gases de efecto invernadero, aerosoles en la atmósfera, y la radiación solar, donde el dióxido de carbono es el gas más importante, el cual ha incrementado su concentración en un 70% por efecto

de las actividades humanas; la principal consecuencia de dicho incremento desde 1750 ha sido el aumento de temperatura (Bramwell, 2007; IPCC, 2007).

Los estudios realizados desde el Tercer Informe de Evaluación (TIE) acordado por el IPCC, permiten comprender los impactos vinculados al cambio climático, estos varían en función del grado de adaptación, la tasa del cambio de temperatura y de la vía socioeconómica. Dichos impactos se verán relacionados con los recursos hídricos, alimenticios, costeros, y de salud, ecosistemas, regiones del planeta y principalmente la biodiversidad (IPCC, 1997; Trejo, 1983; Bravo *et al.*, 2011).

Por otro lado, las Áreas Naturales Protegidas, no han tomado en cuenta parámetros climáticos relacionados con la biota mundial, que probablemente causará cambios drásticos en la diversidad de especies y patrones de distribución (Téllez-Valdés & Dávila-Aranda, 2003).

De acuerdo a estudios realizados desde hace 15 años, México será vulnerable al cambio climático, sin embargo no existe información suficiente de la vegetación y el cambio climático en cuestiones de distribución. Por lo que el presente estudio tiene por finalidad analizar los posibles efectos del cambio climático en la distribución geográfica de algunas especies de cactáceas columnares, como *Carnegiea gigantea*, *Pachycereus pringlei*, *P. pecten-aboriginum*, *Neobuxbaumia macrocephala*, *N. mezcalaensis*, *N. tetetzo* y *Pterocereus gaumeri* en su distribución potencial actual y para los años 2050 y 2080, utilizando el modelo del nicho ecológico.

ANTECEDENTES

Existen reportes del uso y aprovechamiento de cactáceas desde épocas prehispánicas, las cuales fueron empleadas con diversos fines, como medicinales, alimenticias, mágico religiosos y ornamentales (Bravo-Hollis, 1978; Colunga *et al.*, 1986) y en especial, de especies de cactáceas columnares (Casas, 2002).

Para *Pachycereus pecten-aboriginum* se tienen evaluaciones de la madera y su variación con relación a la latitud y altitud (Arias & Terrazas, 2001; Gibson, 1973; Terrazas & Loza-

Cornejo, 2001); se ha reportado el efecto de distintos sustratos en el establecimiento de nuevas plántulas (Tejeda-Corona *et al.*, 2009). También se ha descrito al género, entre los taxa más altos y erectos que habita en lugares secos y semihúmedos del noroeste, centro y sur de México, principalmente en los bosques tropicales caducifolios, bosques espinosos y matorrales xerófilos (Hunt, 1999).

Pachycereus pringlei al igual *P. pecten-aboriginum* presenta estudios de su establecimiento con diferentes sustratos (Tejeda-Corona *et al.*, 2009). Este género está ampliamente distribuido en México y es de gran importancia en numerosas comunidades rurales, debido a los múltiples usos que tiene la planta, como preparación de alimentos, fabricación de muebles, construcción de casas y de uso medicinal (Casas, 2002) Sin embargo, se tiene poca información de su biología básica (Navarro & Juárez, 2006). En la última década son considerados ideales para el estudio de sistemas de polinización especializados (Valiente-Banuet *et al.*, 1996; Fleming *et al.*, 2001) por algunas aves, insectos y principalmente murciélagos, ya que su distribución geográfica se sobrepone con la de estas plantas (Valiente-Banuet *et al.*, 2002, 2004).

Para el género *Neobuxbaumia* se han descrito diversos usos, como alimento (frutos, semillas, tallos y flores), para construcción y forraje (Casas, 2002). Para el caso de *N. macrocephala* se reporta cuáles son sus principales factores limitantes, su dinámica poblacional (Godínez-Álvarez & Valiente-Banuet, 2004) y las limitaciones en su reclutamiento reproductivo (Ríos, 2009), en *N. mezcalaensis* los estudios abordan aspectos como la polinización (Valiente-Banuet *et al.*, 1997) y en *N. tetetzo* se ha reportado la relación que tiene el nodricismo con el tamaño de algunos caracteres morfológicos (Bravo-Mendoza, 2007), el efecto de una ladera sobre su estructura poblacional y ecomorfológica, al modificarse las condiciones microclimáticas (López-Gómez *et al.*, 2012).

Según Reveal (1981), *Pterocereus gaumeri* al ser considerada una especie rara, su estudio se encuentra muy limitado. Sin embargo se ha evaluado el establecimiento de nuevos individuos o plántulas, por otro lado se ha reportado el fenómeno del nodricismo (Méndez *et al.*, 2006; Rodríguez-Ortega & Ezcurra, 2000; Zúñiga *et al.*, 2005), evaluando también la

depredación en la germinación. También se ha documentado el ciclo de vida y su germinación, que es una fase crítica para la dinámica de la especie.

En cuanto al cambio climático, de las especies elegidas en el presente trabajo, únicamente en *N. macrocephala* y *N. tetetzo* se ha documentado el efecto del cambio climático en su distribución potencial (Dávila *et al.*, 2013; Téllez-Valdés & Dávila-Aranda, 2003) por otro lado, se tienen estudios sobre la distribución de especies alpinas, considerando el clima de las zonas montañosas (Randin, 2009), de 85 especies subalpinas (Dirnöck *et al.*, 2003) y plantas montañosas de Europa (Thuiller *et al.*, 2005). Además de trabajos más específicos, como en *Fagus grandifolia* donde se observan los posibles efectos del cambio climático (Téllez-Valdés *et al.*, 2006); en cactáceas del Valle de Tehuacán-Cuicatlán (Téllez-Valdés & Dávila-Aranda, 2003), sobre pinos y encinos de México (Gómez-Mendoza & Arriaga, 2007). También se ha modelado la distribución pasada, presente y futura de especies del Desierto Chihuahuense, mostrando que la fragmentación de su hábitat las pondrá en peligro de extinción (Ballesteros-Barrera, 2008). Por otro lado se ha documentado que especies invasoras amplían su distribución (Smith, 1994).

OBJETIVO GENERAL

- Evaluar los efectos del cambio climático en la distribución potencial de especies de los géneros *Carnegiea*, *Neobuxbaumia*, *Pachycereus* y *Pterocereus* de la familia Cactaceae.

OBJETIVOS PARTICULARES

- Estructurar una Base de Datos con registros de las especies.
- Modelar la distribución potencial actual de especies de la Familia Cactaceae
- Modelar la distribución ante escenarios de cambio climático
- Analizar el papel de las áreas naturales protegidas en la conservación de la Familia Cactaceae.

METODOLOGIA

Estructuración de la Base de Datos

La base de datos, se elaboró a partir de registros georreferenciados proporcionados por la Comisión nacional para el conocimiento y uso de la biodiversidad y obtenidos de la Red Mundial de información sobre la Biodiversidad (http://www.conabio.gob.mx/remib/doctos/remib_esp.html), algunos de éstos, fueron corroborados en Google Earth 7.0.3.8542. Y los errores de georreferenciación se identificaron con el programa ArcView 3.2.

Modelado de la Distribución Real

Se representó la distribución real de las 7 especies de cactáceas columnares en México con el programa ArcView 3.2 (ESRI, 2002). Una vez mapeada dicha distribución, se observó la coincidencia de las especies con las Áreas Naturales Protegidas.

Obtención de las capas climáticas

Las variables bioclimáticas (Cuadro 1) para la elaboración de los modelos proceden de valores mensuales de precipitación, temperatura mínima y máxima. Los 19 parámetros bioclimáticos fueron descargados de en <http://idrisi.uaemex.mx/>.

Cuadro 1. Listado de variables climáticas

No.	Parámetros (Unidades)
1	Temperatura promedio anual (°C)
2	Oscilación diurna de la temperatura (°C)

Efecto del Cambio Climático sobre la distribución potencial de Cactáceas columnares y sus implicaciones en la conservación a largo plazo

3	Isotermalidad (°C) (cociente entre parámetros 2 y 7)
4	Estacionalidad de la temperatura (coeficiente de variación, en %)
5	Temperatura máxima promedio del periodo más cálido (°C)
6	Temperatura mínima promedio del periodo más frío (°C)
7	Oscilación anual de la temperatura (°C) (cociente entre parámetros 5 y 6)
8	Temperatura promedio del trimestre más lluvioso (°C)
9	Temperatura promedio del trimestre más lluvioso (°C)
10	Temperatura promedio del trimestre más cálido (°C)
11	Temperatura promedio del trimestre mas frio (°C)
12	Precipitación anual (mm)
13	Precipitación del periodo más lluvioso (mm)
14	Precipitación del periodo más seco (mm)
15	Estacionalidad de la precipitación (coeficiente de variación, en %)
16	Precipitación del trimestre más lluvioso (mm)
17	Precipitación del trimestre más seco (mm)
18	Precipitación del trimestre ms cálido (mm)
19	Precipitación del trimestre más frío (mm)

Modelado de la Distribución Potencial

La estimación de la distribución potencial actual se hizo con ayuda del programa MaxEnt 3.3.3a, cuyo algoritmo es el de Máxima Entropía, el cual tiene como objetivo hacer inferencias a partir de un conjunto de datos puntuales, combinados con información climática, ajustando la probabilidad de ocurrencia de las especies a partir de una distribución uniforme hasta llegar a una de máxima entropía. Se evalúan las variables que conforman el perfil ambiental para la especie y muestra cuales son las áreas donde se encuentra un perfil similar, lo cual adjudica que existen condiciones adecuadas para que la especie habite (Phillips *et al.*, 2006).

Como parte de la configuración para calibrar la elaboración de los modelos, se utilizó el 80% de los registros para entrenamiento y generación del modelo y el 20% restante como datos de prueba. El modelo presenta una resolución espacial de 0.00083° o aproximadamente 1 km^2 y se hicieron 15 replicas, 2500 iteraciones, sin extrapolar y acotando sin hacer clamping. Con la prueba de Jackknife se conoce cuales son las variables que más influyen, pues se proporciona información sobre el desempeño de cada variable en la construcción del modelo de distribución, es decir, la distribución de la muestra a través de la variación de la variables ambientales que se están empleando.

Los resultados fueron bajo el formato de salida logístico, donde se proporciona la probabilidad de ocurrencia en un rango de 0-1 en una escala logarítmica, que permiten interpretar la distribución modelada, posteriormente las proyecciones se editaron en ArcView, tomando en cuenta el umbral de corte cuando los valores de especificidad y sensibilidad de entrenamiento son iguales, para optimizar la distribución potencial y obtener la superficie potencial aproximada que se estima por especie.

Modelado de Cambio Climático

Para evaluar la sensibilidad de las cactáceas columnares ante el cambio climático, se utilizaron proyecciones climáticas futuras, a partir de 4 proyectos de desarrollo socioeconómico global, designados como A1, A2, B1 y B2, que describen consistentemente las relaciones entre las principales fuerzas demográficas, económicas y tecnológicas que determinan las emisiones futuras de los gases de efecto invernadero (Conde-Álvarez y Gay-García, 2008).

Los escenarios "A" describen un mundo futuro con alto crecimiento económico, mientras que en los "B" ese crecimiento es más moderado. Los escenarios A1 y B1 suponen que habrá una globalización tal que las economías convergerán en su desarrollo. En los A2 y B2, se considera que el desarrollo se dará más a nivel regional. Estos escenarios parten de un conjunto de suposiciones acerca de la evolución de los forzantes (población,

tecnología, economía, uso del suelo, agricultura y energía) a nivel global y regional (Conde-Álvarez y Gay-García, 2008).

Para modelar la distribución potencial futura se usó el escenario A1B (NCAR_CCSM30) que estima emisiones medias-altas en el rango del SRES (Special Report on Emissions Scenarios) elegido en base a la guía de escenarios de cambio climático, por presentar el mejor desempeño a nivel global y para la región de México, al igual que una alta resolución espacial, sin embargo el modelo NCAR_CCSM30 no cuenta con simulaciones para los cuatro escenarios de emisiones. El modelo elegido para las predicciones futuras fue elaborado por el Centro Nacional para la Investigación Atmosférica, como parte de la Fundación Nacional de la Ciencia en Colorado, EUA (Conde-Álvarez y Gay-García, 2008).

RESULTADOS

Bases de Datos

Para las siete especies de columnares, se estructuró una base de datos con 343 registros. En la región norte de México se localizan *Pachycereus pringlei* y *Carnegiea gigantea*, en el centro se encuentran las tres especies del género *Neobuxbaumia*, a lo largo del país se distribuye *P. pecten-aboriginum* y en la región sur se encuentra *P. gaumeri*, específicamente en el estado de Yucatán.

Distribución Real

En este estudio, las especies del género *Neobuxbaumia* se distribuyen principalmente en los estados de Oaxaca y Puebla, sin embargo *N. mezcalaensis* presenta registros desde el estado de Colima hasta Puebla; en el caso de *C. gigantea* y *P. gaumeri*, se distribuyen en un solo estado. Las dos especies del género *Pachycereus* son las que presentaron más registros de las siete especies, y en el caso de *P. pecten-aboriginum* se localiza en 13 estados del país (Cuadro 2).

Cuadro 2. Distribución y Registros totales por especie.

Especie	Estados	Registros
<i>C. gigantea</i>	Sonora	26
<i>P. pringlei</i>	Baja California Norte, Baja California Sur, Sonora, Sinaloa	111
<i>N. macrocephala</i>	Oaxaca, Puebla	27
<i>N. mezcalaensis</i>	Oaxaca, Puebla, Colima, Guerrero	37
<i>N. tetetzo</i>	Oaxaca, Puebla	32
<i>P. gaumeri</i>	Yucatán	36
<i>P. pecten-aboriginum</i>	Jalisco, Guerrero, Guanajuato, Oaxaca, Puebla, Sinaloa, Chihuahua, Durango, Michoacán, Sonora, Nayarit, Baja California Sur, Colima	74

La distribución real conocida por especie y el número de registros que presentan dentro de las ANPs se muestra en la figura 1 y en el cuadro 3. Por ejemplo, *C. gigantea*, presenta 26 registros, sin embargo solo 3 de ellos coinciden con una ANP, que significa el 11.5% de sus distribución real registrada.

Efecto del Cambio Climático sobre la distribución potencial de Cactáceas columnares y sus implicaciones en la conservación a largo plazo

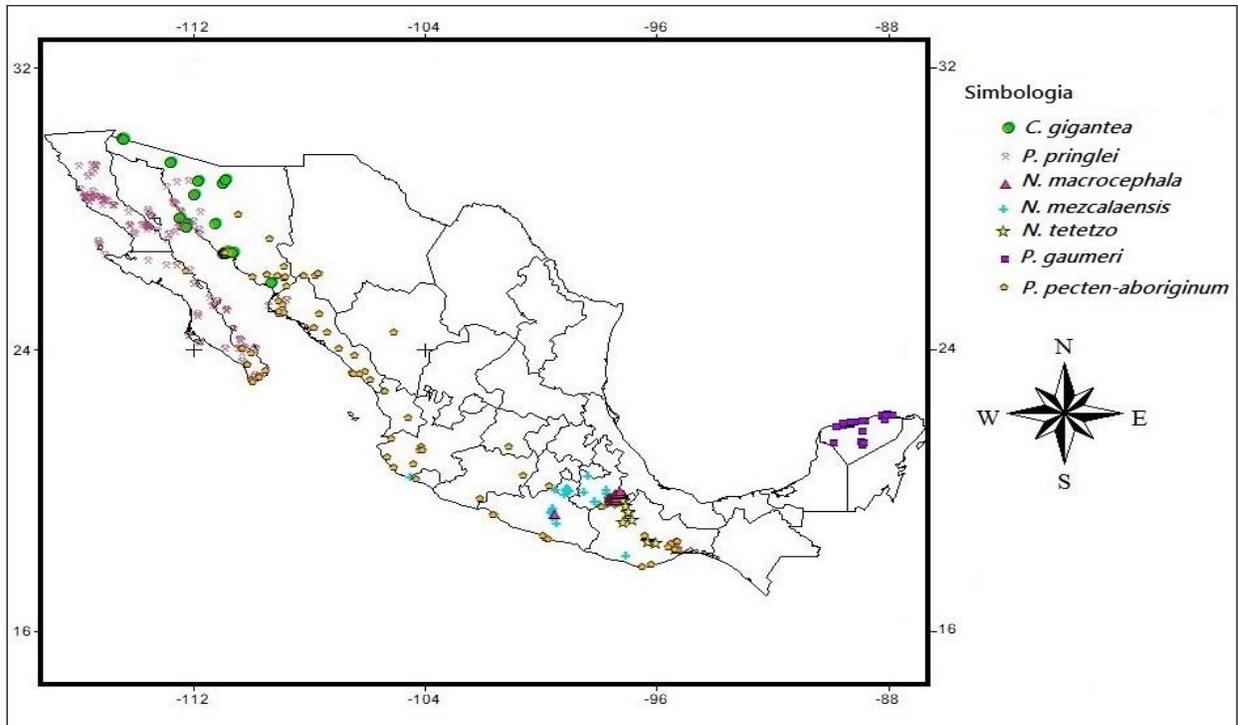


Figura 1. Distribución real de las siete especies de cactáceas columnares.

Cuadro 3. Registros totales y coincidentes con una ANP por especie.

	Especies						
	<i>C. gig</i>	<i>P. pri</i>	<i>N. mac</i>	<i>N. mez</i>	<i>N. tet</i>	<i>P. gau</i>	<i>P. pec</i>
Totales	26	111	27	37	32	36	74
Coincidentes	3 =	74 =	19 =	14 =	20 =	2 =	8 =
	(11.5 %)	(66.7 %)	(70.4%)	(37.83%)	(62.5%)	(5.5%)	(10.8 %)

C. gig = *C. gigantea*, *P. pri* = *P. pringlei*, *N. mac* = *N. macrocephala*, *N. mez* = *N. mezcalaensis*, *N. tet* = *N. tetetzo*, *P. gau* = *P. gaumeri* y *P. pec* = *P. pecten-aboriginum*

Se reconocieron las Áreas Naturales Protegidas para cada especie (Cuadro 4). Donde, las dos especies de *Pachycereus*, se localizan en más de una ANP; y las demás especies únicamente en un área protegida, por otro lado el género *Neobuxbaumia* sólo se observa en la reserva de la biosfera de Tehuacan-Cuicatlan, sin embargo *N. mezcalaensis* también presenta registros en la reserva de las Grutas de Cacahuamilpa.

Cuadro 4. Áreas Naturales Protegidas correspondientes a cada especie.

Especie	Áreas Naturales Protegidas
<i>C. gigantea</i>	Islas del golfo de California
<i>P. pringlei</i>	Bahía de Loreto Valle de los Cirios Islas del golfo de California Archipiélago de San Lorenzo Bahía de los Ángeles Sierra de San Pedro Mártir Isla San Pedro Mártir El Vizcaíno
<i>N. macrocephala</i>	Tehuacán-Cuicatlán
<i>N. mezcalaensis</i>	Tehuacán-Cuicatlán Grutas de Cacahuamilpa
<i>N. tetetzo</i>	Tehuacán-Cuicatlán
<i>P. gaumeri</i>	Ría Lagartos
<i>P. pecten-aboriginum</i>	Huatulco Islas del Golfo de California Sierra la Laguna Sierra de Álamos-Río Cuchujaqui Cuenca alimentadora del distrito de riego 043 estado de Nayarit

Distribución potencial actual y aplicación del modelo de Cambio Climático

Los modelos de distribución potencial actual y de cambio climático, fueron generados para las siete especies de cactáceas columnares. Se estimó la superficie posiblemente ocupa por cada una de ellas (Cuadro 5).

Cuadro 5. Superficies de la distribución potencial actual y de cambio climático.

	Distribución		
	Potencial actual (Km ²)	2050 (Km ²)	2080 (Km ²)
<i>C. gigantea</i>	29,303	98,369	97,760
<i>P. pringlei</i>	50,955	153,510	155,117
<i>N. macrocephala</i>	10,186	22,743	36,006
<i>N. mezcalaensis</i>	80,134	39,781	44,657
<i>N. tetetzo</i>	25,667	19,910	37,663
<i>P. gaumeri</i>	6,510	28,102	19,469
<i>P. pecten-aboriginum</i>	323,572	336,016	416,676

C. gigantea se expande a zonas donde no se tiene ningún registro o no han sido muestreadas, como en los estados de Sinaloa y Baja California Norte. El modelo prevé para el año 2050 un incremento de 69,066 km² y para el año 2080 de 68,457 km², sin embargo en este último se estima una mayor probabilidad de distribución, para que la especie cumpla sus requerimientos de nicho ecológico (Figura 2).

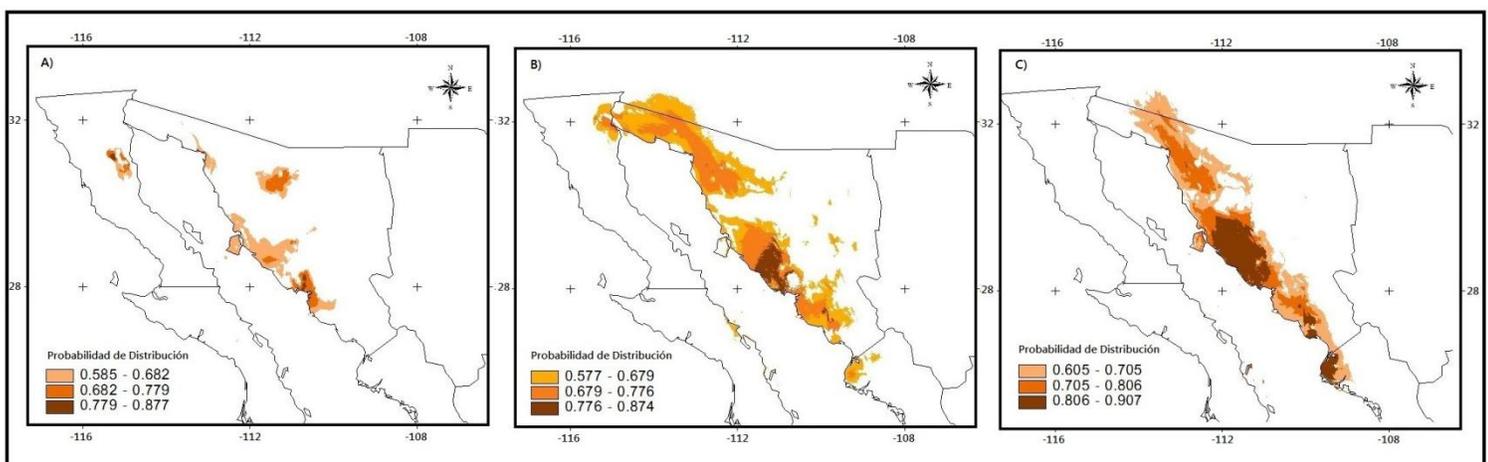


Figura 2. Distribución potencial de *C. gigantea* A) Modelo actual, B) 2050, C) 2080.

Efecto del Cambio Climático sobre la distribución potencial de Cactáceas columnares y sus implicaciones en la conservación a largo plazo

Las dos especies de *Pachycereus* muestran una expansión de su distribución potencial ante los escenarios de cambio climático. En el caso de *P. pringlei* aumenta de 50,955 a 155,177 km² su área potencial (Figura 3), mientras que en *P. pecten-aboriginum* se estima un incremento de 3.84 a 28.7% de superficie, sin embargo el modelo actual indica una mayor probabilidad de que la especie prospere. También se observa que la especie se puede encontrar en estados como Chiapas, Veracruz, Morelos, Puebla, Tamaulipas, Campeche, Yucatán y Zacatecas aunque con un bajo porcentaje de probabilidad (Figura 4).

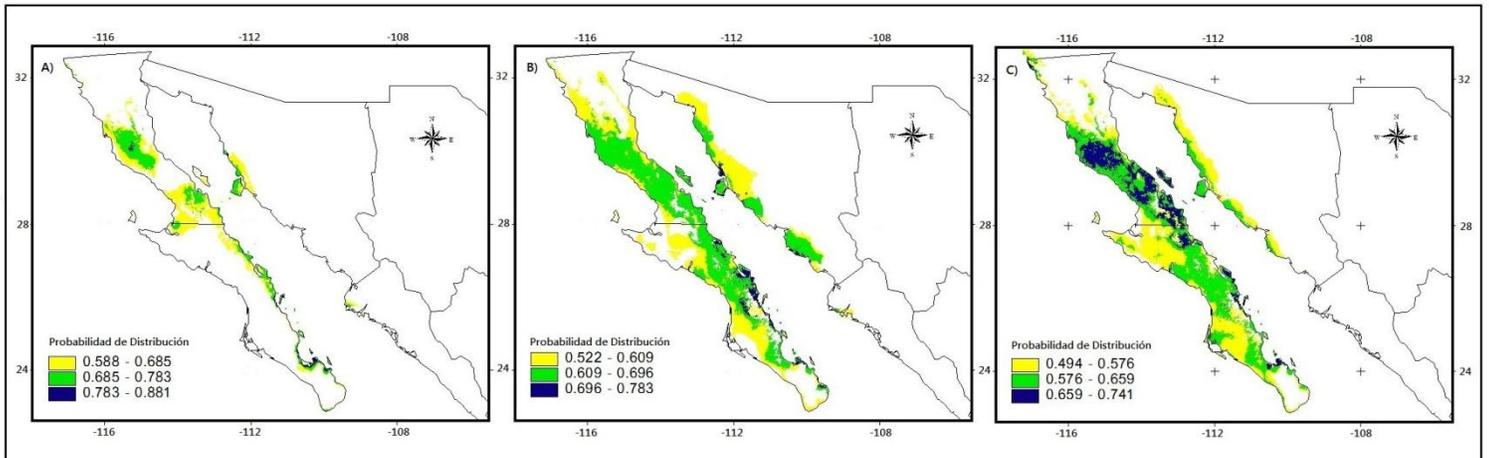


Figura 3. Distribución potencial de *P. pringlei* A) Modelo actual, B) 2050, C) 2080.

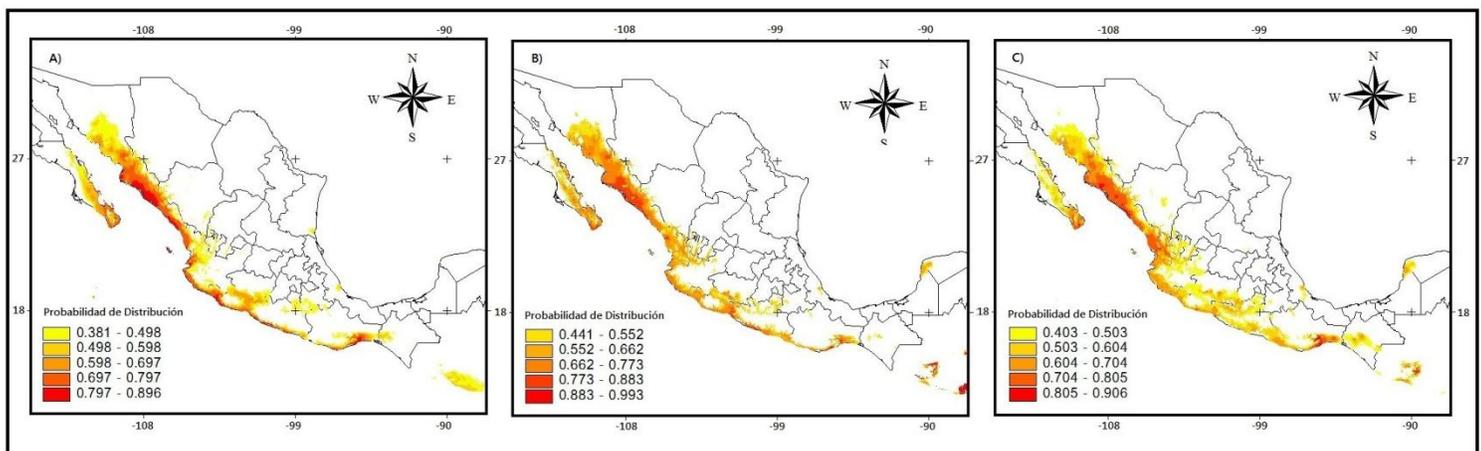


Figura 4. Distribución potencial de *P. pecten-aboriginum* A) actual, B) 2050 C) 2080.

Efecto del Cambio Climático sobre la distribución potencial de Cactáceas columnares y sus implicaciones en la conservación a largo plazo

Para *P. gaumeri* (Figura 5) en el modelo actual se predice una extensión de 6,510 km², incrementándose en el año 2050 a 28,102 km², la cual decrece en el 2080 presentando solo 19,469 km², esta es la única especie que aún con el aumento de su distribución potencial no se observa en otro estado, únicamente en Yucatán.

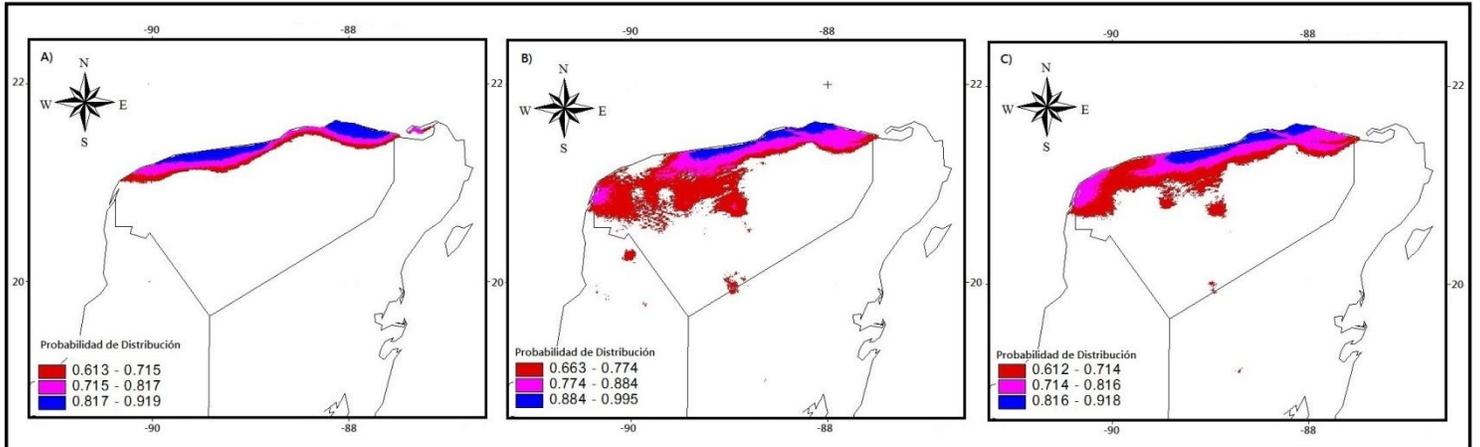


Figura 5. Distribución potencial de *P. gaumeri* A) Modelo actual, B) 2050 C) 2080.

En cuanto a las tres especies del género *Neobuxbaumia*, la tendencia de *N. macrocephala* (Figura 6) es incrementar constantemente la probabilidad de distribución y su área potencial, presentando una superficie de 10,186 km² en el modelo actual, de 22,743 km² para el año 2050 y de 36,006 km² en el 2080, estimando que la especie prevalecerá en zonas donde aún no se tienen registros como el estado de Hidalgo y Tlaxcala. En el caso de *N. tetetzo* (Figura 7) presentó una distribución potencial de 25,667 km², extensión que decrece un 22.5 % en el 2050 presentando 19,910 km² en su superficie, sin embargo para el año 2080 esta aumenta a los 37,663 km² al igual su probabilidad de distribución. En el caso de *N. mezcalaensis* (Figura 8) fue la única especie que presentó la mayor probabilidad y área potencial en el modelo actual, con 80,134 km², disminuyendo un 50.4% de su superficie en el 2050 y un 44.3% en el 2080.

Efecto del Cambio Climático sobre la distribución potencial de Cactáceas columnares y sus implicaciones en la conservación a largo plazo

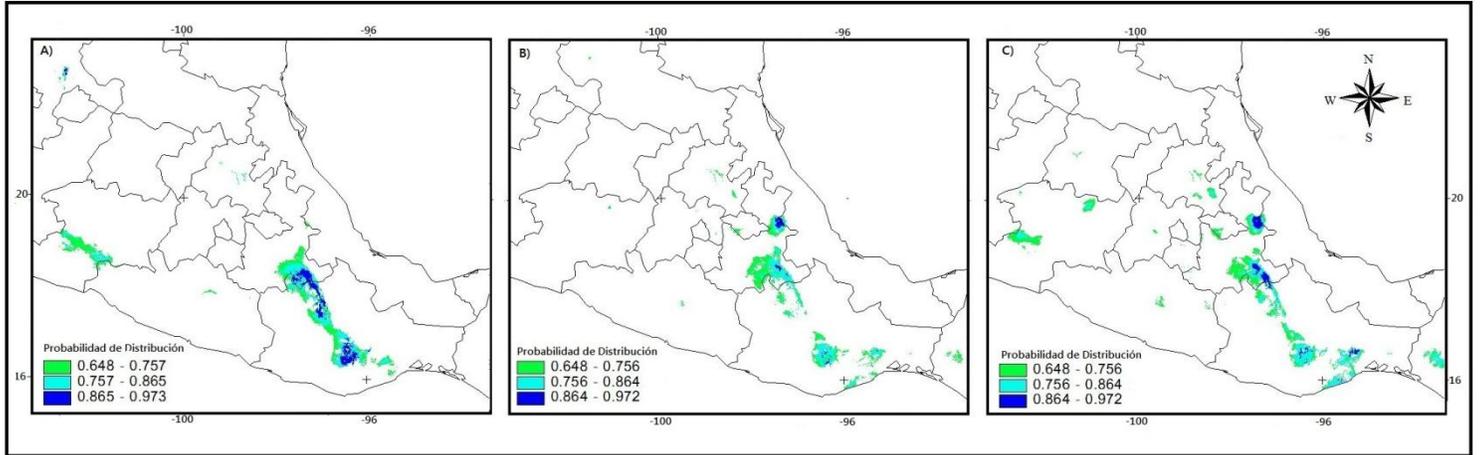


Figura 6. Distribución potencial de *N. macrocephala* A) Modelo actual, B) 2050 C) 2080.

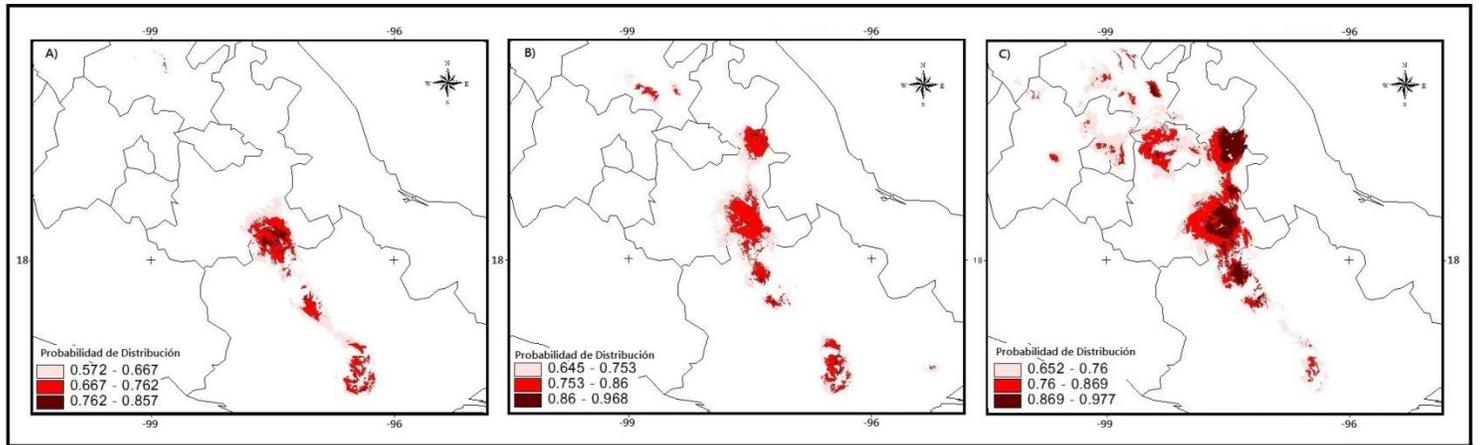


Figura 7. Distribución potencial de *N. tetetzo* A) Modelo actual, B) 2050 C) 2080.

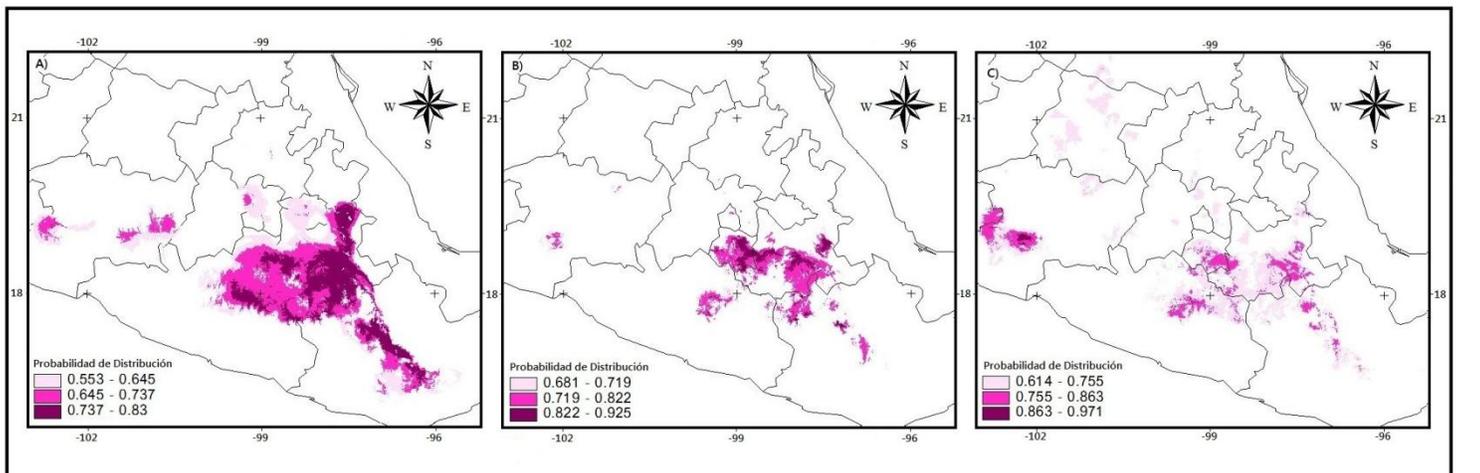


Figura 8. Distribución potencial de *N. mezcalaensis* A) Modelo actual, B) 2050 C) 2080.

DISCUSIÓN

La base de datos muestra una evidente variación en el número de localidades por especie, los cuales van de 26 a 111 registros. Se ha recomendado el uso mínimo de 50 coordenadas geográficas para la elaboración de los modelos de distribución (Lindenmayer *et al.*, 1996; Peterson *et al.*, 2000; Villaseñor & Téllez-Valdés, 2004). Únicamente las dos especies del género *Pachycereus* cumplen con esta condición, presentando más de 50 Registros. Estos resultados en ciertas ocasiones reflejan lo limitado de la distribución en una especie y su baja densidad poblacional, como *C. gigantea* y *P. gaumeri* por lo que son consideradas especies raras (Reveal, 1981). Es por ésto que su estudio es importante debido al riesgo de extinción que presentan, al ser más vulnerables a la perturbación y destrucción del ambiente que habitan, situación que se agrava constantemente.

Sin embargo, la falta de registros es el principal impedimento en la elaboración de modelos de distribución más confiables; desafortunadamente este es el escenario en la mayoría de las especies de la flora de México, debido a la escasez de trabajos que documenten el área total de las especies (Villaseñor & Téllez-Valdés, 2004), por lo tanto, los modelos de distribución potencial, sirven de guía hacia sitios específicos donde las especies pueden encontrarse y aún no existe una prueba de su presencia y son de gran utilidad en aquellas con un bajo número de registros; asimismo ayudan a estimar la diversidad de las Áreas Naturales Protegidas para diseñar y planificar un mejor sistema de protección (Peterson *et al.*, 2000).

En el presente estudio, se modeló por primera vez la distribución de cactáceas columnares como *P. pringlei*, *P. pecten-aboriginum*, *C. gigantea*, *P. gaumeri* y *N. mezcalaensis*; dichos resultados son importantes ya que no se tienen trabajos previos de estas especies. En los mapas obtenidos de distribución potencial actual, se observa a las especies en sitios donde aun no han sido registradas; del género *Neobuxbaumia*, se encuentra a *N. macrocephala* en el estado de Hidalgo, mientras que *N. mezcalaensis* en Michoacán, Estado de México, Hidalgo, Guerrero y Chiapas y *N. tetetzo* en Guerrero, Zacatecas, Hidalgo, Michoacán y en un pequeño límite de Puebla-Veracruz. En el caso de *C. gigantea* se estima en Sinaloa y Baja California Norte, y *P. pecten-aboriginum* en Chiapas,

Tamaulipas y Veracruz, aunque esta especie solo cuenta con registros a lo largo del Pacífico, por lo tanto el trabajo en campo es de gran importancia para validar el modelo, además que permite determinar cuánto se sobreestiman las áreas de distribución potencial y que tanto, extiende a la especie de sus límites reales (Villaseñor & Téllez-Valdés, 2004). Por otra parte, *P. pringlei* y *P. gaumeri* no presentaron áreas diferentes a su distribución real.

Previamente se han indicado regiones donde aparentemente las especies pueden encontrarse, sin embargo, esto no indica que todas las especies puedan llegar o establecerse en las regiones predichas (Ballesteros-Barrera, 2008), debido a factores como, la competencia con otras especies que presentan un función y requerimientos semejantes (Barradas *et al.*, 2011), los agentes de dispersión, especialmente murciélagos, ya que polinizan más del 60% de las cactáceas columnares (Valiente-Banuet *et al.*, 1996), además de que la supervivencia de los cactus al iniciar su vida es bastante improbable ya que solo una semilla en 13 millones puede llegar a establecerse y reproducirse (Mandujano *et al.*, 2001); por lo tanto se debate si existe un modelado adecuado de las especies debido a la complejidad de los sistemas naturales, al no explicarse interacciones bióticas, el cambio evolutivo, las barreras geográficas, procesos de dispersión, entre otros (Anderson *et al.*, 2003; Pearson & Dawson, 2003; Soberón & Peterson, 2005).

Cabe señalar que los modelos sufren errores de comisión (consideran un espacio que en realidad la especie no ocupa o no debe ocupar) y de omisión (no consideran el espacio que la especie debería estar ocupando). Pese a lo anterior, la importancia de los modelos bioclimáticos no debe subestimarse, ya que proporcionan información útil, para inferir la distribución de diferentes grupos biológicos (Villaseñor & Téllez-Valdés, 2004).

Bajo los efectos del cambio climático, se han supuesto tres patrones de respuesta de las especies en relación a su distribución geográfica; el primero indica un cambio en la abundancia o distribución conforme a los regímenes ambientales, el segundo patrón refiere una adaptación a las nuevas condiciones, por lo tanto, no se deben observar cambios importantes en su distribución y por último, si no existe un movimiento o

adaptación, la especie tenderá a reducirse a los sitios propicios para su sobrevivencia o en casos extremos, se puede llegar a la extinción (Ballesteros-Barrera, 2008; Markham, 1996).

Los resultados obtenidos en este trabajo, muestran, al menos, un patrón de respuesta en las especies de columnares. Para el año 2050, *P. pringlei*, *N. macrocephala*, *P. gaumeri* y *C. gigantea* incrementaran (225-400%) su área potencial; *P. pecten-aboriginum* presenta el menor aumento con un 3%, lo cual apunta a la adaptación y cambio en la distribución de las especies, en este último caso se requiere contar con registros detallados de los movimientos en las especies por periodos de tiempo prolongados, para hacer predicciones acerca de la dirección y magnitud de los movimientos geográficos en la distribución (Ballesteros-Barrera, 2011). Por otro lado, las dos especies que mostraron una disminución son *N. mezcalaensis* y *N. tetetzo* con un 51% y 22.5%.

En el año 2080, *C. gigantea* disminuirá (0.62%) su área potencial de acuerdo con el horizonte de tiempo anterior. Sin embargo, la especie presenta una mayor superficie de alta probabilidad de distribución (Figura 2); las dos especies de *Pachycereus* muestran la mayor expansión en su superficie y probabilidad de distribución (Figura 3 y 4). Como se puede observar en la figura 5, *P. gaumeri* indica un decremento en su superficie con 8,633 km.

Los resultados reportados sobre el género *Neobuxbaumia* apuntan a que *N. macrocephala* y *N. tetetzo* (figura 6 y 7) incrementaran su área y probabilidad de distribución; estos datos contradicen a lo antes reportado por Téllez-Valdés & Dávila-Aranda (2003) que reportan la reducción de un 50% de su área de distribución original. Cabe mencionar, que se ha documentado para *N. tetetzo* la contracción de su superficie en las zonas del Valle de Tehuacán y Zapotitlán, mientras que la situación opuesta ocurre en Valle de Cuicatlán y la cuenca de Río Hondo al mostrar una ligera expansión (Dávila *et al.*, 2013). Por último, *N. mezcalaensis* presenta una disminución drástica en su área potencial, siendo la única en presentar la mayor pérdida de hábitat, lo que la convierte en una especie en peligro.

En cuanto a las áreas en protección, se deben tomar en cuenta las consecuencias del cambio climático para los sistemas ecológicos y rediseñar una estrategia para sostener y mejorar los sistemas ecológicos frente a este cambio global (Magaña & Gómez-Mendoza,

2009), por lo cual la conservación y manejo son estrategias para mantener y restaurar la biodiversidad, para ello la adaptación basada en ecosistemas (integra el uso de la diversidad y servicios ecosistémicos) puede generar beneficios económicos y contribuir a la conservación, tales como el aprovechamiento sustentable, el pago por servicios ambientales y de restauración ecológica.

CONCLUSIONES

- La base de datos contó con un total de 343 registros, sin embargo las dos especies de *Pachycereus*, fueron las únicas en presentar más de 50 puntos georreferenciados.
- Los mapas de distribución potencial muestran a *P. pecten-aboriginum*, *C. gigantea*, *N. macrocephala*, *N. mezcalaensis* y *N. tetetzo* en regiones donde aún no se tienen registros o no se ha probado su presencia.
- *P. pringlei* y *P. gaumeri* no presentaron áreas diferentes a su distribución conocida.
- *C. gigantea*, *P. pringlei*, *P. pecten-aboriginum*, *N. macrocephala*, *N. tetetzo* y *P. pringlei* se verán beneficiadas por el cambio climático al mostrar una expansión en su distribución potencial.
- *N. mezcalaensis* fue la única especie que mostró sensibilidad ante el cambio climático, presentando una reducción de su superficie.
- Se sugiere obtener la mayor cantidad de registros de las especies, para conseguir una mayor confiabilidad de los modelos.

REFERENCIAS

- Álvarez, R., H. Godínez-Álvarez, U. Guzmán y P. Dávila. 2004. Aspectos Ecológicos de dos Cactáceas Mexicanas Amenazadas: Implicaciones para su Conservación. *Boletín de la Sociedad Botánica de México* 75: 7-16.
- Anderson, R. P., D. Lew y A. T. Peterson. 2003. Evaluating predictive models of species' distributions: criteria for selecting optimal models. *Ecological Modelling* 162: 211-232.
- Arias, S. y T. Terrazas. 2001. Variación en la anatomía de la madera de *Pachycereus pecten-aboriginum* (cactáceae). *Anales del Instituto de Biología* 72(2):157-169.
- Ballesteros-Barrera, C. 2011. Efecto del cambio climático en la distribución de especies del Desierto Chihuahuense del pleistoceno al siglo XXI. In: Sánchez-Rojas, G., C. Ballesteros-Barrera y N. P. Pavón. Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, pp.89-99.
- 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.
- Barradas, V., J. L. Landa y J. Cervantes. 2011. Implicaciones del cambio climático en la fisiología ecológica de las plantas. In: Sánchez-Rojas, G., C. Ballesteros-Barrera y N.P. Pavón. Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, pp.71-77.
- Bramwell, D. 2007. The response of botanic gardens to climate change. *Journal of Botanic Gardens Conservation International* 4 (2): 03-08.
- Bravo, J., G. Sánchez y S. M. Gelviz-Gelvez. 2011. Estudio de la distribución de las especies frente al cambio climático. *Cuadernos de Biodiversidad* 35:12-18.
- Bravo-Hollis, H. 1978. Las cactáceas de México. Vol. I. Universidad Nacional Autónoma de México, México.
- Bravo-Hollis, H. y H. Sánchez-Mejorada. 1991. Las cactáceas de México. Tomo I. Universidad Nacional Autónoma de México. México.

- Bravo-Hollis, H. y L. Scheinvar. 1999. El interesante mundo de las cactáceas. Fondo de Cultura Económica. UNAM. México.
- Bravo-Mendoza, M., A. Espinosa-Cantú, I. Castellanos-Vargas y Z. Cano Santana. 2007. Tamaño de *Neobuxbaumia tetetzo* y longitud de sus espinas apicales en un gradiente de luz bajo *Mimosa Luisana*, un arbusto nodriza. *Acta Botánica Mexicana* 79:69-80.
- Butterfield, B. R., B. Csuti y J. M. Scott. 1994. Modeling vertebrate distributions for gap analysis. In: R. I. Miller (ed.). *Mapping the diversity of nature*, pp. 53-68.
- Carpenter, G. A., N. Gillison y J. Winter. 1993. Domain: a flexible modeling procedure for mapping potential distributions of plants and animals. *Biodiversity and Conservation* 2: 667-680.
- Casas, A. 2002. Uso y manejo de cactáceas columnares mesoamericanas. CONABIO. *Biodiversitas* 40: 18-23
- Chapman, A. D. y J. R. Busby. 1994. Linking plant species information to continental biodiversity inventory, climate modeling and environmental monitoring. In: R. I. Miller (ed.). *Mapping the diversity of nature*, pp. 179-195.
- Colunga, G. M. P., E. Hernández-X y A. Castillo. 1986. Variación morfológica, manejo agrícola tradicional y grado de domesticación de *Opuntia* spp. en el Bajío Guanajuatense. *Agrociencia* 65:7-49.
- Conde-Álvarez. A. C. y G. Gay. 2008. Guía para la generación de escenarios de cambio climático a escala regional. Centro de Ciencias de la Atmósfera, UNAM. México.104p.

- Dávila, P., O. Téllez y R. Lira. 2013. Impact of climate change on the distribution of populations of an endemic Mexican columnar cactus in the Tehuacán-Cuicatlán Valley, Mexico. *Plant Biosystems* 2(147):376-386.
- Dirnböck, T., S. Dullinger y G. Grabherr. 2003. A regional impact assessment of climate and land use change on alpine vegetation. *Journal Biogeography*. 30:401–417.
- ESRI, 2002. ArcView 3.2. ESRI, Redlands, California. Environmental Systems Research Institute.
- Fleming, T. H., C. T. Sahley, J. N. Holland, J. D. Nason y J. L. Hamrick. 2001. Sonoran desert columnar cacti and the evolution of generalized pollination systems. *Ecological Monographs* 71: 511-530.
- Gibson, A. C. 1973. Comparative anatomy of secondary xylem in Cactoideae (Cactáceae). *Biotropica* 5: 29-65.
- Godínez-Alvarez, H. y A. Valiente-Banuet. 2004. Demography of the columnar cactus *Neobuxbaumia macrocephala*: a comparative approach using population projection matrices. *Plant Ecology* 174: 109–118.
- Gómez-Mendoza, L. y L. Arriaga. 2007. Modeling the effect of climate change on the distribution of oak and pine species of México. *Conservation Biology*. 21: 1545-1555.
- Gutiérrez, G. K. 2007. Evaluaciones preliminares de conservación: estudio de caso de *Ferocactus haematacanthus* (Salm-Dyck) Bravo (Cactaceae). FESI-UNAM. Tesis para obtener el grado de Biólogo.
- Hernández, H. M. y A. H. Godínez. 1994. Contribución al conocimiento de las cactáceas mexicanas amenazadas, Herbario Nacional, Instituto de Biología, UNAM. *Acta Botánica Mexicana* 26: 33-52.

Efecto del Cambio Climático sobre la distribución potencial de Cactáceas columnares y sus implicaciones en la conservación a largo plazo

- Hunt, D. 1999. Cites Cactaceae checklist, second edition, Royal Botanic Gardens, Kew & IOS, Milborne Port
- Hutchinson, G. E. 1957. *Concluding remarks*. Cold Spring Harbor Symposia on Quantitative Biology 22:415-427.
- IPCC, 2007: Cambio climático 2007: Informe de síntesis. Contribución de los Grupos de trabajo I, II y III al Cuarto Informe de evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático [Equipo de redacción principal: Pachauri, R.K. y Reisinger, A. (directores de la publicación)]. IPCC, Ginebra, Suiza, 104 págs.
- Jiménez, S. C. L. 2011. Las cactáceas mexicanas y los riesgos que enfrentan. *Revista Digital Universitaria* 12 (1): 23p
- Lindenmayer, D. B., B. G. Mackey y H. A. Nix. 1996. The bioclimatic domains of four species of commercially important eucalypts from south-eastern Australia. *Australian Forestry* 59: 74-89.
- Lindenmayer, D. B., H. A. Nix, J. P. McMahon, M. F. Hutchinson y M. T. Tanton. 1991. The conservation of Leadbeater's possum, *Gymnobelideus leadbeateri* (McCoy): a case study of the use of bioclimatic modeling. *Journal of Biogeography* 18: 371-383.
- López-Gómez, V., P. Zedillo-Auelleyra, S. Y. Anaya-Hong, E. González-Lozada y Z. Cano-Santana. 2012. Efecto de la orientación de la ladera sobre la estructura poblacional y ecomorfología de *Neobuxbaumia tetetzo* (cactáceae). *Botanical Sciences* 90(4):453-457.
- Magaña, V. y L. Gómez-Mendoza. 2009. Cambio climático y Biodiversidad. *El capital Natural de México*. Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (Conabio), México.

- Mandujano, M. C., C. Montaña, M. Franco, J. Golubov y A. Flores-Martínez. 2001. Integration of demographic annual variability in a clonal desert cactus. *Ecology* 82: 344-359.
- Markham, A. 1996. Potential impacts of climate change on ecosystems: a review of implications for policymakers and conservation biologist, en *Climate Research*, Vol. 6, No. 2, pp. 179-191, CR Special.
- Méndez, M., A. Dorantes, G. Dzib, J. Argaéz y R. Durán. 2006. Germinación y establecimiento de plántulas de *Pterocereus gaumeri*, una cactácea columnar, rara y endémica de Yucatán, México. *Boletín de la Sociedad Botánica de México* 79:33-41.
- Midgley, G. F., L. Hannah, D. Millar, M. C. Rutherford y L. W. Powrie. 2002. Assessing the vulnerability of species richness to anthropogenic climate change in a biodiversity hotspot. *Global Ecology and Biogeography*. 11: 445–451.
- Navarro, M. C. y M. Juárez. 2006. Evaluación de algunos parámetros demográficos de *Mammillaria zephyranthoides* en Cuautinchán, Puebla, México. *Zonas Áridas* 10:74-83.
- Nix, H. A. 1986. BIOCLIM, a bioclimatic analysis and prediction system. CSIRO Division Water and Land Resources Research Annual Report. CSIRO Publishing, Canberra, Australia.
- 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 and Biogeography* 12: 361-371.
- Peterson, A. T., S. L. Egbert, V. Sanchez-Cordero y K. P. Price. 2000. Geographic analysis of conservation priorities using distributional modeling and complementarity:

endemic birds and mammals in Veracruz, Mexico. *Biological Conservation* 93: 85-94.

Phillips, S. J., R. P. Anderson y R. E. Schapire. 2006. Maximum entropy modeling of species geographic distributions. *Ecological Modelling*. 190: 231–259.

Randin, C. F., R. Engler, S. Normand, M. N. Zappa, E. Zimmermann, P. B. Pearman, P. Vittoz, W. Thuiller y A. Guisan. 2009. Climate change and plant distribution: local models predict high-elevation persistence. *Global Change Biology*. 15:1557-1569.

Reveal J.L. 1981. The concepts of rarity and population threats in plant communities. En: Morse L.E. y Henefin M.S. Eds. *Rare Plant Conservation*, pp. 41-47, The New York Botanical Garden, Nueva York.

Ríos, M. M. 2009. Limitaciones en el reclutamiento de *Neobuxbaumia macrocephala*: un análisis de las interacciones a través de su ciclo reproductivo. Tesis de Maestría en Ciencias Biológicas (Biología Ambiental), México, D.F., 110p.

Rodríguez-Ortega, C. E. y E. Ezcurra 2000. Distribución espacial en el hábitat de *Mammillaria pectinifera* y *M. carnea* en el valle de Zapotitlán Salinas, Puebla, México. *Cactáceas y Suculentas Mexicanas* 45: 4-14.

Rzedowski, J. 1983. *Vegetación de México*. Limusa, México, 432 pp.

Sánchez-Cordero, V., A. T. Peterson y P. Escalante-Pliego. 2001. El modelado de la distribución de especies y la conservación de la diversidad biológica. In: H. M. Hernández, A. N. García A., F. Álvarez y M. Ulloa (comps.) *Enfoques contemporáneos para el estudio de la biodiversidad* pp. 359-379.

Smith, D. R. 1994. Change and variability in climate and ecosystem decline in Aral Sea basin deltas. *Post-Soviet Geography*. 35: 142-165.

- Soberón, J. y A. T. Peterson. 2005. Interpretation of models of fundamental ecological niches and specie's distributional areas. *Biodiversity Informatics* 2:1-10
- Stockwell, D. R. B. y D. Peters. 1999. The GARP modeling system: Problems and solutions to automated spatial prediction. *International Journal of Geographical Information Science*. 13: 143-158.
- Tejeda-Corona, G., M. Rojas y G. Jordan. 2009. Efecto de tres sustratos distintos en el establecimiento de plántulas de *Pachycereus pringlei* y *Pachycereus pecten-aboriginum*. *Cactáceas y suculentas mexicanas* 54(4): 113-122.
- Téllez-Valdés, O. y P. Dávila-Aranda. 2003. Protected areas and climate change: a case study of the cacti in the Tehuacan-Cuicatlan biosphere reserve, Mexico. *Conservation Biology* 17(3): 846-853.
- Téllez-Valdés, O., P. Dávila, M. Ayala, K. Gutiérrez y I. Melchor. 2007. Case studies on the effect of climate on the flora of Mexico. *Journal of Botanic Gardens Conservation International* 4 (2): 17-21
- Téllez-Valdés, O., Y. M. H. Chávez, A. C. Gómez-Tagle y M. V. G. Gutiérrez. 2004. Modelaje bioclimático, una herramienta para desarrollar estrategias de manejo forestal: estudio de caso en cuatro especies mexicanas de Pinus (Pinaceae). *Ciencia Forestal en México* 29: 61-82
- Téllez-Valdés, O., P. Dávila-Aranda y R. Lira-Saade. 2006. The effects of climate change on the long-term conservation of *Fagus grandifolia* var. *mexicana*, an important species of the cloud forest in eastern México. *Biodiversity and Conservation*. 15: 1095-1107
- Terrazas, T. y S. Loza-Cornejo. 2001. Phylogenetic relationships of Pachycereeae: a cladistic analysis based on anatomical-morphological data. In: T.H. Fleming y A.

Valiente-Banuet (eds.) Evolution, ecology and conservation of columnar cacti and their mutualist. Arizona University Press (en prensa).

Thuiller, W., S. Lavorel, M. B. Araujo, M. T. Syke y I. C. Prentice. 2005. Climate change threats to plant diversity in Europe. *The National Academy of Sciences of the USA*. 102: 8245–8250.

Trejo, H. 1983. Paleobiología y Taxonomía de Algunos Fósiles Mesozoicos de México. Boletín de la Sociedad *Universitario de Medio Ambiente*, Vol. 1, México, UNAM.

Valiente-Banuet, A., A. Rojas-Martínez, M. C. Arizmendi y P. Dávila. 1997. Pollination biology of two columnar cacti (*Neobuxbaumia mezcalaensis* and *Neobuxbaumia macrocephala*) in the Tehuacan Valley, central México. *American Journal of Botany* 4: 452-455

Valiente-Banuet, A., F. Molina-Freaner, A. Torres, M. C. Arizmendi y A. Casas. 2004. Geographic differentiation in the pollination system of the columnar cactus *Pachycereus pecten-aboriginum*. *American Journal of Botany* 6: 850-855

Valiente-Banuet, A., M. C. Arizmendi, A. Rojas-Martínez y L. Domínguez-Canseco. 1996. Ecological relationships between columnar cacti and nectar feeding bats in Mexico. *Journal of Tropical Ecology* 12: 103-119.

Valiente-Banuet, A., M. C. Arizmendi, A. Rojas-Martínez, H. Godínez-Álvarez, C. Silva y P. Dávila-Aranda. 2002. Biotic interactions and population dynamics of columnar cacti. In T. H. Fleming and A. Valiente-Banuet [eds.], columnar cacti and their mutualists: evolution, ecology, and conservation, 225-240. University of Arizona Press, Tucson, Arizona, USA.

Villaseñor, J. I. y O. Téllez-Valdés. 2004. Distribución potencial de las especies del género *Jefea* (Asteraceae) en México. *Anales del Instituto de Biología*. UNAM (Serie Botánica). 75: 205-220.

Efecto del Cambio Climático sobre la distribución potencial de Cactáceas columnares y sus implicaciones en la conservación a largo plazo

Villaseñor, J. L. 2003. Diversidad y distribución de Magnoliophyta de México. *Interciencia*. 28(3): 160-167.

Zúñiga, B., G. Malda y H. Suzán. 2005. Interacciones planta-nodrizo en *Lophophora diffusa* (Cactácea) en un desierto subtropical de México. *Biotropica* 37:351-356