



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

POSGRADO EN CIENCIAS BIOLÓGICAS

INSTITUTO DE BIOLOGÍA
JARDÍN BOTÁNICO

EFFECTOS DEL CAMBIO CLIMÁTICO
SOBRE LA DISTRIBUCIÓN DE NOPALES
(GÉNERO OPUNTIA Y NOPALEA: CACTACEAE)
EN LA REGIÓN CENTRAL DE MÉXICO.

TESIS

QUE PARA OBTENER EL GRADO ACADÉMICO DE
MAESTRA EN CIENCIAS BIOLÓGICAS
(BIOLOGÍA AMBIENTAL)

P R E S E N T A

MARTA PATRICIA PALACIOS RESÉNDIZ

TUTORA PRINCIPAL DE TESIS: DRA. LÉIA AKCELARD LERNER DE
SCHEINVAR

COMITÉ TUTORAL
DRA. AMPARO MARTÍNEZ ARROYO
DR. VÍCTOR SÁNCHEZ CORDERO
DR. OSWALDO TÉLLEZ VALDÉS
DR. HÉCTOR HERNÁNDEZ MACÍAS

MÉXICO, D.F.

SEPTIEMBRE, 2010.



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.

Dr. Isidro Ávila Martínez
Director General de Administración Escolar, UNAM

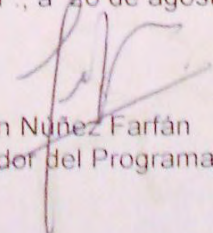
Presente

Me permito informar a usted que en la reunión ordinaria del Comité Académico del Posgrado en Ciencias Biológicas, celebrada el día 31 de mayo de 2010, se aprobó el siguiente jurado para el examen de grado de **MAESTRA EN CIENCIAS BIOLÓGICAS (BIOLOGÍA AMBIENTAL)** de la alumna **PALACIOS RESENDIZ MARTHA PATRICIA** con número de cuenta **98159837** con la tesis titulada "Efectos del cambio climático sobre la distribución de nopales (género *Opuntia* y *Nopalea*) en la Región Central de México", realizada bajo la dirección de la **DRA. LÉIA AKCEL RAD LERNER DE SCHEINVAR**:

Presidente: DR. VÍCTOR SÁNCHEZ CORDERO DÁVILA
Vocal: DR. OSWALDO TÉLLEZ VALDÉS
Secretario: DRA. LÉIA AKCEL RAD LERNER DE SCHEINVAR
Suplente: DR. HÉCTOR MANUEL HERNÁNDEZ MACÍAS
Suplente: DRA. MARÍA AMPARO MARTÍNEZ ARROYO

Sin otro particular, me es grato enviarle un cordial saludo.

Atentamente
"POR MI RAZA HABLARA EL ESPIRITU"
Cd. Universitaria, D.F., a 26 de agosto de 2010.


Dr. Juan Núñez Farfán
Coordinador del Programa

c.c.p. Expediente del (la) interesado (a).

AGRADECIMIENTOS

Al Posgrado en Ciencias Biológicas, UNAM.

A CONACYT por haberme otorgado la beca con número 215501 la cual me ha permitido continuar y terminar los estudios de Maestría.

A los miembros del Comité Tutorial, quienes han dirigido la presente tesis de Maestría, integrado por la Dra. Léia Akcelrad Lerner de Scheinvar, Dra. Amparo Martínez Arroyo y Dr. Víctor Sánchez Cordero.

Al Dr. Oswaldo Téllez Valdés, por su apoyo en el desarrollo de la tesis, de igual forma al Dr. Héctor Hernández por la revisión al manuscrito.



Agradecimientos

Gracias a todas las personas que contribuyeron con su apoyo a la realización de este proyecto.

A mi familia, en especial a mis padres y hermanos.... por estar siempre a mi lado.

A Cladia González Cadena, por su amistad, apoyo incondicional durante el trabajo en campo, y compañía al herborizar has sido decisiva en mi vida. Al igual que a Rafael Martínez Martínez... gracias Rafa.

A Alessandro, gracias amor por tu compañía en campo, por todo tu apoyo y sugerencias, y por llenar mi vida de felicidad.



Dedicatoria

Dedico este trabajo a todas las personas que día a día luchan por la conservación de las cactáceas en México.



ÍNDICE

RESUMEN	5
INTRODUCCIÓN	8
Importancia de los nopales en México	9
Importancia Histórico-Cultural	9
Importancia Ecológica	9
Importancia Económica	9
Distribución de los nopales en México	12
Factores limitantes	13
Nicho ecológico	15
Cambio Climático	17
Cambio Climático & Biodiversidad	19
Modelo del Nicho Ecológico y Cambio Climático	21
ANTECEDENTES	24
JUSTIFICACIÓN	27
OBJETIVOS	28
ÁREA DE ESTUDIO	29
METODOLOGÍA	32
RESULTADOS	36
DISCUSIÓN	51
CONCLUSIONES	56
LITERATURA CONSULTADA	58
ANEXO I.	64
ANEXO II.	67



Resumen

En los últimos años se ha comenzado a experimentar un incremento en la temperatura a nivel mundial, el cual se espera sea aun mayor en los próximos años, ante este panorama resulta fundamental el desarrollo de una metodología capaz de anticipar las alteraciones climáticas que probablemente se producirán, lo que permita la elaboración de programas de conservación y manejo de los nopales silvestres mexicanos. En la Región Central de México, se encuentran 3 especies del género *Nopalea* Salm-Dyck, y 63 de *Opuntia*. Los valores de 19 variables ambientales fueron modificados en función del Modelo de Circulación General ARA4(IPCC) UKMO HadGEM1. El Modelo prevé al año **2050** un aumento en la temperatura de 0.1-3.0°C y -32% en los valores de precipitación; en tanto para el año **2080** predice un incremento de temperatura de 0.15-4,5°C y -36% en precipitación. Los modelos fueron generados por MaxEnt y evaluados a partir de los valores obtenidos para el Área bajo la Curva (AUC). El valor del AUC del género *Nopalea* va de 0.89-0.98; para el género *Opuntia* de 0.91-1.0. La tendencia general para las especies del género *Nopalea* y *Opuntia*, es hacia la reducción de sus distribuciones geográficas estimadas. La tendencia general para las especies del género *Nopalea* y *Opuntia*, es hacia la reducción de su hábitat. Sin embargo, se predice un porcentaje importante en el incremento del nuevo hábitat adecuado derivado de las alteraciones del cambio climático (CITAR MAPAS). El género *Nopalea* presenta valores pequeños en su distribución geográfica potencial actual. Estos resultados pueden deberse a la pequeña cantidad de información con que se contaba de este género dentro de la Región Central de México. Bajo los efectos de cambio climático al año 2050, más del 59% de las especies del género *Opuntia* reducirán su hábitat, en tanto para el escenario de cambio climático 2080, 63% de las especies disminuirán su distribución. El cambio en la distribución de las especies que predicen los modelos, implica que los nopales deberían tener la capacidad de respuesta para adaptarse o migrar en un tiempo menor del que normalmente requieren estos procesos, lo cual es poco probable. La capacidad de adaptación se verá afectada por el estado de conservación de la vegetación y por factores de deforestación. Se debe enfatizar la protección de las áreas naturales donde se presentan grandes e importantes centros de diversidad de nopales, que actualmente no cuentan con protección ante el cambio acelerado de uso de suelo y el crecimiento urbano. La identificación de las regiones con alto número de especies, permitirá la planificación para la conservación. El nivel de protección en el caso de San Luis Potosí, requiere una detallada revisión y la estructuración de ANP's que beneficien a la conservación de especies de *Opuntia* y cactáceas en general.



Abstract

In the last years, an increase of temperature was registered at level global, that it is expected larger in the next time. For this reason, it's fundamental to adopt a methodology able to predict the climate alterations, which permitted the elaboration of a program of conservation and use of the mexican wild nopales. In the central region of Mexico, 3 species of the genus *Nopalea* Salm-Dyck, and 63 species of *Opuntia* Miller, are recognized. The values of 19 environmental variables were modified in function of the General Circulation Model ARA4 (IPCC) UKMO HadGEM1. This Model predict an increase of temperature of 0.1-3.0°C and -32% for precipitation values for the 2050 year, instead for the 2080 year, it predicts an increase of temperature of 0.15-4.5°C and -36% of precipitation. The models were generated for MaxEnt and evaluated to start of the values obtained for the low Area Curve (AUC). The value of AUC of the genus *Nopalea* is included between 0.89-0.98; for the genus *Opuntia* between 0.91-1.0. The general tendency for the species of the genera *Nopalea* and *Opuntia* is the reduction of their geographical distribution estimated and habitats. However, it is predicted an important percentage in the increment of the new adjusted habitat derived by the alterations of the climate change. The genus *Nopalea* presents small values in its actual potential geographical distribution. These results could be due to the scarce information about this genus in the central region of México. In the 2050 year, with these effects of climate change, more of 59% of the species of the genus *Opuntia* will reduce their habitats, instead for the 2080 year scenery of climate change, the 63% of the species will reduce their distribution. The change of the species distribution predicted by models, imply that the nopales must be able to adapted or to migrate in a lesser time of that requested by this process, but it is not probable. The ability of adaptation will be effect for the conservation state of the vegetation and for the factors of deforestation. It's necessary to emphasize the protection of the natural areas, which are important centers of diversity for the nopales and that don't have actually protection after of the rapid change of the soil use and urban increase. The identification of the regions with high number of species will permit the conservation planning. The level of protection for the state of San Luis Potosí, need a detailed revision and structuring of ANP's, therefore so the conservation of the species of *Opuntia* and in general of the Cactaceae can profit by it.



Entre las plantas más notables que caracterizan el paisaje de las zonas áridas y semiáridas de México se distingue, junto con los magueyes, los mezquites y las yucas, un fascinante grupo vegetal, la familia Cactaceae.

Bravo, 1978.



INTRODUCCIÓN

La familia *Cactaceae*, es endémica de América, comprende aproximadamente 2000 especies, diversificándose en todo el Continente Americano, desde el norte de Canadá hasta el sur de la Patagonia Argentina, y desde el nivel del mar, en dunas costeras, hasta los 5100 m de altitud en Perú. Su centro de origen se encuentra en Sudamérica (Bravo, 1978); y México es un importante centro de diversificación de esta familia (Bravo & Scheinvar, 1995), al presentar un alto índice de endemismo a nivel genérico (73%) y específico (78%) (Hernández & Godínez 1994).

La subfamilia *Opuntioideae* es considerada el grupo taxonómico más aislado entre las cactáceas, se caracteriza por la presencia de glóquidas en casi todas las areolas de tallos, flores y frutos, además de semillas recubiertas de un arilo esclerenquimatoso. *Nopalea* Salm-Dyck y *Opuntia* Mill. son los dos géneros que conforman el grupo de los nopales, los cuales tienen tallos verdes, suculentos, de forma aplanada, cladodios encadenados, hojas deciduas en cladodios juveniles y pericarpelos de flores, con flor rotada y frutos complejos donde lo que se come son los con funículos de las semillas que almacenan azúcares. Las flores en *Nopalea* tienen los aparatos reproductores exertos, son de color rojo y sus principales polinizadores son colibríes. *Opuntia* se caracteriza por flores con gineceo y androceo insertos en el perianto, de coloración amarilla, roja o anaranjada, generalmente polinizada por abejas, sin embargo, se dan casos aislados de polinización por colibríes (*O. stenopetala*).

El género más representativo dentro de *Opuntioideae* es *Opuntia*, con cerca de 200 especies en total (Bravo & Scheinvar, 1995), crecen en toda América, además han sido propagadas ampliamente en la cuenca del Mediterráneo, África y Australia al grado de considerárseles naturalizadas (Bravo, 1978; Zimmermann *et al.* 2007). Son abundantes en el sur de EUA, región fisiográfica del Desierto Chihuahuense (Rzedowski 1991). En México se tiene una gran diversidad de especies de *Opuntia* (Hernández *et al.* 2001a; Soberón *et al.* 2001), presenta aproximadamente 93 especies (Scheinvar *et al.* 2010), la mayoría endémicas (62 sp.=98.76%). *Nopalea* es un género nativo de México y Guatemala, el 99% de sus especies se encuentran en nuestro país y su distribución se extiende a Honduras y Nicaragua.



IMPORTANCIA DE LOS NOPALES EN MÉXICO

Importancia Histórico-Cultural

Las fuentes históricas disponibles indican que las grandes nopaleras o “Gran Tunal” fueron uno de los recursos naturales trascendentes en el proceso de sedentarismo de las tribus nómadas de México. Algunos de los nombres geográficos de México tienen el prefijo *nochtli*, que sin duda fue dado a ciertos pueblos por haber sido regiones donde abundaban los nopales. (Bravo, 1978). La utilización del nopal (*Opuntia* spp.) como alimento por el hombre mesoamericano, de acuerdo con los hallazgos arqueológicos de Mc. Neish (1964), conducidos en las regiones semiáridas del SW de Tamaulipas y en el Valle de Tehuacán, Puebla, data de entre 7 000 y 9 000 años a. C. Las especies de *Cactaceae* subfósilizadas de acuerdo a Quintero *et al.* (1972), son *Opuntia depressa* Rose, *O. hyptiacantha* Weber, *O. magdougaliana* Rose, *O. pilifera* Weber y *O. pyriformis* Rose. Nobel (1998), menciona que alrededor de la mitad de los coprolitos encontrados en la zona contenían remanentes tanto de agaves como de nopales, lo que corrobora el consumo de tales plantas en la alimentación humana. Los indígenas que más emplearon el nopal en sus cultos religiosos fueron los aztecas y los otomíes, e incluso lo reprodujeron en forma asexual por medio de sus cladodios (Granados & Castañeda 1991).

Importancia Ecológica

Las especies de *Opuntia* son componentes dominantes de la flora mexicana de zonas áridas y semiáridas, especialmente en los desiertos de Chihuahua y Sonora, zona árida Queretano-Hidalguense y Valle de Tehuacán-Cuicatlán. Los nopales constituyen uno de los grupos de plantas más importantes para mantener el equilibrio ecológico en grandes extensiones del territorio mexicano, donde escasean las lluvias. También contribuyen de forma significativa a la regeneración, fijación y retención del suelo y son la principal fuerza en la lucha contra la desertificación (Zimmermann *et al.* 2007). Constituyen un alimento básico en la dieta de gran número de especies de mamíferos (incluyendo venados, roedores, jabalíes y coyotes), brindan sitios y alimento a insectos, aves, roedores y lagomorfos (Soberón *et al.* 2001; Pérez-Sandi 2001; Viguera & Portillo 2001). En época de floración constituyen plantas melíferas.

Importancia Económica

Económicamente, las especies de *Opuntia* en México son un recurso agrícola extremadamente importante, debido a la gran superficie ocupada por nopaleras, tanto silvestres como cultivadas; al tipo y número de productores involucrados; y a la diversidad de los productos generados. Las



especies de *Opuntia* son usadas como fuente de energía (para leña y en la producción de etanol y biogás), en la fabricación de dulces, jabones, fertilizantes y adhesivos, así como para cercos, setos vivos y como plantas ornamentales (Zimmermann *et al.* 2007). Además de ser empleadas en la medicina tradicional y un campo abierto a estudios biomédicos y farmacéuticos. Son plantas en las cuales la cochinilla de la grana se desarrolla; sus cladodios fragmentados sirven como abono verde y como adherente de insecticidas, pinturas y adobe, son materia prima para la elaboración de productos cosméticos, confitados, enlatados, extracción de pectinas y muchos otros más (Barbera 1995; Bravo & Scheinvar 1995). El aprovechamiento del nopal en la alimentación se enfoca tanto al consumo de fruta como de pencas tiernas, conocidas popularmente como “nopalitos”, por lo que, además del aprovechamiento del nopal silvestre, existen áreas dedicadas exclusivamente a la producción de nopal verdura (*Opuntia ficus-indica* (L.) Mill., que ha cobrado una gran importancia en los últimos años (<http://www.ine.gob.mx> 2009). En México, las nopaleras cultivadas ocupan poco más de 210 mil ha, de las cuales 150,000 ha se destinan al forraje, 50,000 ha a la producción de tuna; 10,000 ha, a la cosecha de nopalitos y aproximadamente en 100 ha como substrato de la grana de cochinilla (Flores *et al.* 1995). Se estima que en México aún existen nopaleras silvestres con suficiente densidad para ser aprovechadas económicamente, localizadas principalmente en los estados de Aguascalientes, Chihuahua, Coahuila, Durango, Guanajuato, Hidalgo, Jalisco, Nuevo León, Querétaro, San Luis Potosí, Tamaulipas y Zacatecas.

Uso Forrajero

En áreas marginadas, distintas especies de *Opuntia* se usan como principal alimento y forraje de emergencia durante periodos prolongados de sequía para el ganado (Zimmermann *et al.* 2007). El nopal para forraje es consumido directamente por el ganado en pastoreo. Los ganaderos del Norte de México que cuentan con nopaleras silvestres o cultivadas, no han sufrido las grandes pérdidas por mortandad de ganado en los años de sequía. Entre las especies utilizadas como forraje están *Opuntia decumbens*, *O. microdacys*, *O. rastrera*, *O. azurea*, *O. lindheimeri*, *O. cantabrigiensis*, *O. duranguensis*, *O. leucotricha*, *O. robusta*, *O. stenopetala*, *O. rufida*, *O. violacea*, *O. phaecantha*, *O. pailana*, y *O. grandis* (Flores *et al.* 1995).



Uso Frutícola

Entre las especies explotadas por sus frutos se encuentran *O. ficus-indica* (L.) Mill., *Opuntia hyptiacantha* F.A.C. Weber, *O. joconostle* F.A.C. Weber, *O. lasiacantha* Pfeiff., *O. matudae* Scheinvar, *O. megacantha* Salm-Dyck, *O. oligacantha* Först. y *O. streptacantha* Lem. La producción de fruta (tunas y xoconostles) se realiza en quince estados de la república mexicana. Al comparar los valores nutritivos de las tunas y xoconostles con respecto a otras frutas de alto consumo *per capita* (manzana, durazno, papaya, plátano), se observa que superan en proteínas, vitaminas y elementos minerales, como calcio y fósforo, a las frutas citadas. Los productos derivados de la industrialización de la tuna son diversos, entre estos se encuentra la melcocha, colonche, queso de tuna y miel de tuna; la semilla ofrece una fuente de aceite y proteínas; mientras que la “cascara” tiene aplicaciones como forraje (Granados & Castañeda 1991).

Uso Nopal-Verdura

Para la producción de nopal-verdura se utilizan *Opuntia ficus-indica* y *O. robusta*, en el caso del género *Nopalea* una sola especie *N. cochenillifera*. Las principales zonas de producción de nopal verdura en México se localizan en nueve estados de la República que son: Aguascalientes, Baja California, Distrito Federal, Jalisco, Oaxaca, Michoacán, Puebla, San Luis Potosí y Zacatecas. El área de producción más importante es el Distrito Federal, específicamente la región de Milpa Alta, la cual ocupa el 68% de la superficie y el 80% del volumen de la producción nacional, siguiéndole en orden de importancia San Luis Potosí, con el 8% y Oaxaca, con el 4%. La potencialidad del nopal verdura es muy amplia, toda vez que la demanda es creciente y que nuestro país presenta una variada gama de condiciones para su cultivo y desarrollo. (Flores *et al.* 1995).

Producción de Grana Cochinilla

México cuenta con una industria de colorantes a base de grana, donde las especies de *Opuntia* son utilizadas como hospederas para la cochinilla (Zimmermann *et al.* 2007). La grana cochinilla (*Dactylopius coccus*), es una de las plagas a partir de la cual se obtiene el tinte carmín empleado en la industria del vestido, cosméticos, pinturas, coloración de alimentos, de películas fotográficas, tinción de preparaciones anatómicas, y medicamentos. Su aprovechamiento se remonta al periodo tolteca, y originalmente se empleaba para colorear textiles, esculturas, edificios, pinturas de murales y códices. El sur del país se destaca por la producción de grana (Granados & Castañeda 1991).



DISTRIBUCIÓN DE LOS NOPALES EN MÉXICO

Los nopales silvestres se encuentran en diversos tipos de vegetación, siendo los sitios de mayor abundancia los matorrales xerófilos, pastizales y bosques tropicales caducifolios (Rzedowski 1971). *Opuntia* se distribuye especialmente en regiones áridas y semiáridas de la República Mexicana, en tanto el género *Nopalea*, se restringe a las zonas templadas y de mayor humedad (Bravo 1978).

De acuerdo con el Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI, 2003), 49% del territorio mexicano es semiárido o árido, cifra que se incrementa cada año. Los climas semiáridos, caracterizados por una precipitación media anual de 300-600 mm, afectan 28.3% del territorio, mientras que el restante 20.8% tiene climas áridos (>300 mm). La mayor parte de estas áreas corresponden a las dos grandes regiones semiáridas y áridas de México, los desiertos Chihuahuense y Sonorense, los cuales ocupan una gran extensión en el centro y norte del país. Dichas regiones, presentaron en su pasado, intensas perturbaciones en la estabilidad del clima, las cuales operaron como fuerzas que estimularon procesos activos en la evolución de los organismos, entre los que destacan las especies de *Opuntia*, dando pie a una alta frecuencia de especies endémicas restringidas a dichas áreas (Hernández & Bárcenas, 1996).

La Región del Desierto Chihuahuense (RDC), es considerada la zona con los más importantes patrones de diversidad y arreglos espaciales de miembros de la familia *Cactaceae*, tanto a nivel regional (Hernández & Bárcenas 1995, 1996; Hernández *et al.* 2004; Hernández & Gómez-Hinostrosa 2005) como a escalas locales (Gómez-Hinostrosa & Hernández 2000; Hernández *et al.* 2001a). Hernández *et al.* (2004), señala a la RDC como el refugio más rico del mundo, al conjuntar gran número de géneros de cactus (39) y de especies (329). De estos, 17 géneros (o 43,6% de la diversidad genérica en la zona) y 229 especies (69,6%) son estrictamente endémicas de la región. Las zonas de máxima concentración de especies de cactus, incluyendo las más raras y amenazadas, están concentradas hacia el sureste de la región y las zonas disjuntas de la RDC (sur de San Luis Potosí, zona árida Queretano-Hidalguense, y zonas secas de Guanajuato, estados que conforman la Región Central de México), al ser el mayor y más importante centro de diversidad de cactáceas del mundo, ya que gran parte de esta diversidad es regional o localmente endémica. En el listado de especies de cactáceas reportadas para la Región Central de México, el género *Opuntia* se encuentra representado por aproximadamente 30 especies (Hernández *et al.* 2004). En tanto, Scheinvar (2009) señala para esta región 63 especies del género *Opuntia* y 3 especies del género *Nopalea* (Cuadro 2).

FACTORES LIMITANTES

El género *Opuntia* se distribuye bajo diferentes condiciones ambientales, soporta escasa humedad y gran variación de temperaturas, de igual forma se encuentra prácticamente en cualquier tipo de topografía (Olivares *et al.* 2003). Sin embargo, al igual que cualquier grupo taxonómico, está limitado por parámetros ambientales que restringen su distribución; además de tener un efecto directo sobre su fenología, determinando así distintos procesos esenciales para su presencia. A continuación se discuten algunos factores.

Temperatura

Las especies de *Opuntia* pueden soportar temperaturas extremas de 10-50°C (Vázquez 1981). Los nopales toleran niveles bajos de temperatura siempre y cuando la disminución sea gradual (Nobel 1998). Olivares *et al.* (2003), señalan dentro de las condiciones ambientales óptimas, una temperatura media anual de 15-28°C, temperatura promedio durante el periodo de formación de fruto 15-25°C, temperaturas mínimas no inferiores a -5°C, ausencia de heladas en primavera durante la emisión de brotes y una precipitación anual de 300-700 mm. Las especies del género *Opuntia* se consideran resistentes a temperaturas extremas, la temperatura de los órganos fotosintéticos llega a ser 15°C superior a la del ambiente, indicando que estas plantas tienen la capacidad de soportar el calor en lugar de evitarlo. En el caso de bajas temperaturas, el grado de resistencia depende del sitio de origen o hábitat en el que se desarrollan. Así, las especies de *Opuntia* que crecen en elevaciones inferiores a 1 200 msnm muestran daños por frío cuando se exponen a temperaturas de -4 a -7°C; por el contrario, las especies que se desarrollan en altitudes mayores a 3 000 msnm soportan temperaturas inferiores a -20°C (Nobel 1982). Mientras que las variedades cultivadas en México, en su mayoría son severamente afectadas por temperaturas inferiores, considerada como umbral en México, a -5°C.

Precipitación

En cuanto a precipitación, el nopal es poco exigente y tolera la sequía, al presentar una serie de adaptaciones fisiológicas, entre las que se encuentra la facultad de almacenar agua en sus tejidos; presentar fotosíntesis con mecanismo MAC (Metabolismo Ácido Crasuláceo). Las especies de *Opuntia* se adaptan a condiciones que van desde zonas con precipitación pluvial muy escasa, hasta regiones con condiciones hídricas bastante elevadas. En tanto los cultivares, se adaptan bien en lugares que presentan precipitaciones que oscilan entre 150-1 800 mm/año (Velázquez 1962). Para México, el desarrollo del fruto de *Opuntia* coincide con la época de lluvias. Así, una sequía prolongada afectará la



calidad de frutos y la producción de semillas (Olivares *et al.* 2003).

Factores edáficos

El nopal se desarrolla en casi todos los tipos de suelo del país a excepción de suelos húmedos y ligeros, los cuales aportan poco sostén al sistema radicular, fibroso y superficial. La mayoría de las superficies cultivadas con nopal en México se presentan en vertisoles, luvisoles y feozem (Pimienta 1990).

Hábitat

El hábitat donde se desarrolla el género *Opuntia*, se caracteriza por presentar inviernos relativamente benignos, período seco que coincide con los meses invernales, lluvias en verano y precipitación media anual de 200-600 mm. Por su distribución presenta un amplio grado de adaptación ecológica, aunque un factor común es el grado de aridez. Sus especies, se desarrollan satisfactoriamente en localidades con precipitación pluvial de 300- 400 mm, y también son menos susceptibles a las bajas temperaturas del invierno. En algunas regiones (Sudáfrica) donde *Opuntia* ha sido introducida, la presencia de lluvias en verano hace su dispersión más agresiva, tornándose nocivas, lo cual indica que las lluvias en dicho periodo son claramente favorables para su desarrollo y presencia (Pimienta 1990).

NICHO ECOLÓGICO

La alta diversidad de especies de cactáceas en zonas desérticas de México, ha sido razonablemente bien documentado en diferentes escalas, mientras que los cambios en la composición de especies en el espacio geográfico apenas ha comenzado a ser entendido (Hernández *et al.* 2008). Para superar la carencia del conocimiento preciso de la distribución geográfica de las especies, se han definido modelos predictivos que ayudan a estimar su distribución potencial en función del *nicho ecológico* (Villaseñor & Téllez-Valdés 2004). El concepto de *nicho ecológico* es la base central de la delimitación de la distribución geográfica de las especies, al describir cómo los organismos en diferentes niveles de organización interactúan con su medio ambiente a distintas escalas espacio-temporales (Chase & Leibold 2003; Leibold & Geddes 2005), además de ser parte central en la ecología y la evolución que se remonta al menos a Grinnell (1917). El nicho ecológico de una especie puede definirse como el intervalo de las condiciones ambientales y bióticas en las que sus poblaciones pueden persistir sin la emigración (Hutchinson, 1957). Frente a cambios ambientales se puede dar una evolución del nicho o movimientos para realizar un seguimiento espacial del nicho, estas son las únicas alternativas a la extinción (Graham *et al.* 1996; Brown & Lomolino 1998).

Aunque se han propuesto muchas definiciones de los nichos, la definición propuesta por Hutchinson (1957) es particularmente útil y generalizada: *Nicho es el conjunto de condiciones bióticas y abióticas en la que una especie es capaz de resistir y mantener estables los tamaños de población*". Hutchinson (1957) también hizo la valiosa distinción entre *nicho fundamental* y *nicho realizado*. "El nicho fundamental describe las condiciones abióticas en la que una especie es capaz de persistir", mientras que "el nicho realizado describe las condiciones en las que persiste una especie dada ante la presencia de otras especies" (por ejemplo, los competidores y depredadores). De esta forma, las características de la biología de las especies, tales como la fisiología, ecología alimentaria, comportamiento reproductivo, entre otras, definen el nicho ecológico fundamental (Peterson *et al.* 1999).

Muchos aspectos del nicho fundamental pueden ser conservados durante largas escalas de tiempo evolutivo. La tendencia de las especies a conservar los aspectos de su nicho fundamental a lo largo del tiempo es llamado *conservadurismo del nicho*. El conservadurismo del nicho es considerado un proceso, aunque puede ser causado por más de un factor en el nivel de población (una característica que comparte con otros procesos evolutivos, tales como la especiación y anagénesis). La importancia del conservadurismo del nicho no depende de que los rasgos ecológicos se mantengan indefinidamente. En lugar de ello, la diversidad de patrones puede explicar el conservadurismo del nicho en diferentes escalas de tiempo. El Conservadurismo del nicho es la tendencia de las especies



ancestrales para conservar características ecológicas. Tiene importancia dentro de la especiación alopátrica, la biogeografía histórica, los patrones de riqueza de especies, la estructura de comunidades, la propagación de las especies invasoras y especies introducidas por el hombre, las respuestas de las especies al cambio climático global y en la historia de la humanidad, desde hace 13.000 años hasta la actualidad. Su estudio se desarrolla mediante las herramientas del modelado del nicho ecológico, que permiten ver las similitudes y diferencias de sus características (Wiens J. J. & C. H. Graham 2005).

Recientemente, varios autores han asumido el conservadurismo del nicho para evaluar el potencial a gran escala del impacto del calentamiento global sobre las biotas (Peterson *et al.* 2002; Thomas *et al.* 2004). Aunque los efectos del calentamiento del planeta puede ser muy difícil de mitigar, algunos autores han sugerido la intrigante posibilidad de que las especies pueden reducir al mínimo los efectos del conservadurismo de nicho y maximizar las posibilidades de adaptación con una rápida evolución, incluida su respuesta al cambio climático (Stockwell *et al.* 2003). Así, los eventos de cambio climático y el cambio observado en las distribuciones geográficas de las especies resultan una útil herramienta para confrontar la teoría del conservadurismo del nicho.

CAMBIO CLIMÁTICO

El fenómeno del cambio climático se define como el posible incremento en la temperatura superficial de la Tierra por el rápido aumento de la concentración de Gases de Efecto Invernadero (GEI) en la atmósfera (IPCC 2001). Tiene estrechas relaciones con otros fenómenos ambientales, como la desertificación y la pérdida de la biodiversidad, por nombrar algunos; estos son manifestaciones particulares de un problema general mayor, al ser consecuencia del cambio ambiental global del planeta (Moreno & Soria 2008). El clima depende de un gran número de factores que interactúan de manera compleja, lo que deja claro que el clima, es un estado cambiante de la atmósfera, mediante sus interacciones con el mar y el continente, en diversas escalas de tiempo y espacio. Saber que parte de la variabilidad del clima es predecible, puede traducirse en predicciones útiles en diversas actividades socioeconómicas (Magaña 2004). El cambio climático, tiene implicaciones en los procesos de la absorción de la radiación solar, pues cualquier proceso que altere tal balance, ya sea por cambios en la radiación recibida o re-emitida, o en su distribución en la Tierra, se reflejará como cambios en el clima. Las alteraciones en el clima por efecto de la actividad humana afectarán las variaciones naturales de éste en un amplio rango de escalas. Así, la variabilidad natural del sistema climático, podría verse afectada por la influencia humana, dando por resultado el incremento de sus efectos, el cual ha tenido mayores alcances en el funcionamiento de diferentes ecosistemas, afectando principalmente el régimen de lluvias de desiertos y bosques tropicales; acentuando más la época de lluvias o las sequías (Holmgren *et al.* 2001).

Para elaborar proyecciones sobre el impacto de las perturbaciones de origen humano es preciso calcular los efectos de todos los procesos clave que actúan en el sistema climático. Estos procesos se pueden representar mediante términos matemáticos, pero la complejidad del sistema implica que, en la práctica, los cálculos sólo se pueden hacer con computadora. Por consiguiente, la formulación matemática se realiza con un programa informático, al que se denomina "modelo". Si el modelo contiene suficientes elementos de los componentes del sistema climático para efectuar simulaciones del clima, se lo denomina comúnmente "modelo climático". El modelo más detallado de un proceso determinado es el que se basa en los principios físicos fundamentales, considerados invariantes. Ese modelo será aplicable a cualquier clima. En la medida de lo posible, los modelos climáticos emplean principios físicos básicos, o simplificaciones que crean la menor cantidad de incertidumbres. Esto es así porque las condiciones de un clima futuro pueden ser muy diferentes de las del clima actual, por lo que no se cumplirán necesariamente las relaciones obtenidas empírica o estadísticamente para el clima actual. Otra clase de simplificación que se emplea en los modelos climáticos consiste en integrar en



una dimensión espacial. (IPCC 1997). Las simulaciones realizadas por dichos “modelos” son conocidas como Modelos de Circulación General (GCM, General Circulation Models). Cada grupo de trabajo (Geophysical Fluids Dynamic Laboratory, Canadian Climatic Centre, etc.) utiliza diferentes algoritmos y parametrizaciones para las simulaciones, con lo cual, las predicciones que surgen de estos diferentes modelos difieren en magnitud pero tienen ciertos patrones en común: todos los modelos predicen un aumento en la temperatura media, así como un correspondiente aumento en las precipitaciones a nivel global; además, estos cambios tienden a no distribuirse uniformemente sobre la superficie de la Tierra (IPCC 1997; Magaña 2004).

Experimentos numéricos con Modelos de Circulación General de la Atmósfera, conocidos como MsCG, permiten concluir que el aumento en las concentraciones de gases de efecto invernadero tendrá impactos significativos en el clima global y regional. Sin embargo, es menos claro en qué medida las condiciones climáticas en sitios particulares se modificarán. Las llamadas técnicas de reducción de escala o “*downscaling*” se han desarrollado como puentes entre los encargados de los GCMs, con los que se hacen los experimentos de cambio climático, y aquellos encargados de estudiar los potenciales impactos del cambio climático. Un aspecto importante que se debe considerar en los escenarios es la incertidumbre. Esta se propaga de una estimación a otra, es decir, la incertidumbre de los escenarios produce incertidumbre en el ciclo del carbono para los modelos, y ésta se propaga en los climas globales y regionales proyectados en los modelos, que a su vez genera incertidumbre cuando se estiman los impactos en una región o localidad.

HadGEM1 es el último de una serie de modelos climáticos desarrollados por el Centro Hadley. Incorpora los principales cambios científicos a la atmósfera y el hielo marino en relación con los componentes HadCM3 (Pope *et al.* 2000, Gordon *et al.* 2000). El nombre HadGEM1 significa "Modelo Global Ambiental del Centro Hadley versión 1", que tiene por objeto indicar que el modelo (en tiempo) abarca otros componentes del sistema ambiental que no sea sólo la física del clima (Johns *et al.* 2005; Johns *et al.* 2005b).

CAMBIO CLIMÁTICO & BIODIVERSIDAD

El IPCC, en su cuarto informe (2007), señala un posible aumento de temperatura de 1.1 a 6.4°C. Dentro de los impactos a los ecosistemas asociados con el incremento mundial de la temperatura, se encuentran el cambio en los ecosistemas y desplazamientos geográficos de especies y el riesgo de incendios incontrolados (+1°C), hasta un 30% de especies en mayor riesgo de extinción (+1-3°C), número apreciable de extinciones en todo el mundo, 40% de los ecosistemas estarán afectados (3-6°C), 50% de extinción generalizada de especies (5-6°C). Los impactos esperados variaran en función del grado de adaptación y de la tasa del cambio de la temperatura. La vegetación semiárida será progresivamente sustituida por vegetación de tierras áridas. Para los dos decenios próximos las proyecciones indican un calentamiento de aproximadamente 0.2°C por decenio. La resiliencia de numerosos ecosistemas se verá probablemente superada en el presente siglo por una combinación sin precedentes de cambio climático, perturbaciones asociadas (inundaciones, sequías, incendios incontrolados, insectos, acidificación del océano), y otros originados del cambio mundial (cambio de uso de la tierra, polución fragmentación de los sistemas naturales, sobreexplotación de recursos). Los efectos de los cambios climáticos sobre los sistemas naturales son difíciles de detectar, debido a la adaptación y a los componentes no climáticos.

El cambio climático antropogénico reciente ya está afectando a la biodiversidad a diversas escalas, mediante el aumento de la extinción y la inducción de desplazamientos en la distribución de especies (Thuiller *et al.* 2005). Por lo cual es urgente la evaluación de los efectos potenciales de cambio climático en el futuro sobre la biodiversidad. Esta tarea se logra mejor utilizando herramientas de modelado. Durante las últimas décadas varios estudios han tratado de proyectar la distribución de especies en el futuro mediante una serie de escenarios futuros de cambio climático (Huntley *et al.* 1995; Sykes *et al.* 1996; Peterson *et al.* 2002; Thomas *et al.* 2004; Thuiller *et al.* 2005). Estos modelos basados en nicho, actualmente se utilizan para relacionar distribuciones actuales de las especies con un conjunto de variables climáticas y proyectar las futuras distribuciones potenciales en escenarios de cambio climático. Sin embargo, aunque estos modelos han producido estimaciones de recambio de especies, el rango de expansión y contracción bajo escenarios de cambio climático (Bakkenes *et al.* 2002; Peterson *et al.* 2002), ningún estudio ha explorado sistemáticamente la relación entre las propiedades ecológicas y la distribución de las especies. Sin embargo, una serie de hipótesis, basadas en la comprensión ecológica común, sostienen que las especies deberían ser más o menos sensibles al cambio climático. Estas incluyen las expectativas de que: (1) especies con requerimientos cercanos a condiciones climáticas promedio del área estudiada deben ser menos sensibles que las especies con nichos



periféricos (especie marginal) (Swihart *et al.* 2003), (2) especies que se encuentran en un rango más amplio de condiciones climáticas a través de su área de distribución (especies generalistas) se espera presenten una mayor tolerancia al cambio climático que especies climáticamente restringidas (especies especialistas) (Brown 1995), (3) especies con rangos restringidos son más propensas a ser sensibles al cambio climático que las especies de amplia distribución (Johnson 1998), y (4) especies de grupos fitogeográficos fuertemente expuestos al cambio climático deberían ser más sensibles. Si estas hipótesis son correctas, entonces debemos esperar una convergencia entre las inferencias simples basadas en las características ecológicas de las especies y las previsiones de los modelos de "envoltura" bioclimática. (Thuiller *et al.* 2005).

Se han examinado respuestas potenciales en especies y hábitats para predecir cambios bajo condiciones modificadas de clima; básicamente existen tres posibles respuestas de los organismos: migración, adaptación (fisiológica y genética) y extinción. Tanto para especies móviles como inmóviles existe la posibilidad de una rápida adecuación o utilización de un amplio espectro de tolerancia fisiológica. Si la adecuación no puede llevarse a cabo entonces el resultado es la extinción (Holt 1990). Por lo que el cambio climático representa un reto para la conservación de la biodiversidad que se basa en áreas protegidas fijas, pues se espera que el cambio climático cambie la distribución de áreas adecuadas para muchas especies. Algunas especies sólo persistirán si pueden colonizar nuevas áreas, aunque sus aptitudes dispersoras pueden ser muy limitadas en algunos casos (Williams *et al.* 2005).

Se prevé que las especies tolerantes a la aridez serán las más estables en condiciones climáticas futuras. En un contexto de calentamiento global, las especies que ocurren preferentemente en zonas cálidas y secas deben beneficiarse del cambio climático, lo cual se reflejara en la conservación de sus hábitats y / o la expansión a nuevos hábitats apropiados (Thuiller *et al.* 2005).

MODELO DEL NICHOS ECOLÓGICO Y CAMBIO CLIMÁTICO

Para analizar los cambios en la distribución de la vegetación por la influencia del cambio climático es necesario partir de la distribución actual de las especies. Los modelos predictivos de distribución geográfica potencial pueden contribuir a comprender los factores que controlan los patrones de distribución de especies, además de ayudar en la planeación, y en los programas de manejo y conservación (Farber & Kadmon 2003). Los modelos predictivos de cobertura climática (CEMs, por sus siglas en inglés), modelado de nicho ecológico, modelado bioclimático o modelado de la envoltura climática (MNE) (Martínez-Meyer 2005), generan mapas predictivos de distribución de especies usando datos de las características climáticas de los sitios donde las especies son registradas (Nix 1986). Los CEMs o MNE involucran la asociación de los registros de los sitios a un espacio multidimensional definido por un grupo de variables climáticas, el propósito es identificar el nicho climático (cobertura climática o perfil climático) de las especies. Además de la proyección del nicho climático desde el espacio climático multidimensional a un espacio geográfico (p. ej.: un mapa) para identificar áreas potenciales de su distribución, dicho proceso se denomina también “Homoclimate matching” o búsqueda homoclimática, en el cual se identifican áreas con condiciones climáticas similares (Lindenmayer *et al.* 1996), con el objetivo de identificar áreas de distribución potencial (Stockwell & Peters 1999; Peterson *et al.* 2001) y poder ser proyectados a escenarios pasados y futuros (Martínez-Meyer 2005; Téllez-Valdés & Dávila-Aranda 2003). Los modelos generados se basan exclusivamente en factores ambientales sin considerar factores bióticos e históricos, que pueden restringir la distribución potencial completa de las especies (Soberón & Peterson 2005). Asimismo, es necesario contar con otros parámetros físicos adicionales al clima que puedan afectar la distribución de una especie (Arriaga & Gómez, en Martínez J. & A. Fernández 2004). Sin embargo, aunque estos modelos han producido estimaciones en la distribución de las especies, el rango de expansión y contracción bajo escenarios de cambio climático (Bakkenes *et al.* 2002; Peterson *et al.* 2002), no ha estudiado sistemáticamente las relaciones entre las propiedades ecológicas y la distribución de las especies (posición de nicho y la amplitud, tamaño del rango) y la sensibilidad de las proyecciones al cambio climático (Theurillat & Guisan 2000; Peterson 2003).

El programa MAXENT “Método de la Máxima Entropía”, ofrece una alternativa para el modelado de la distribución geográfica de las especies, en función únicamente de datos de presencia (Phillips *et al.* 2004; Phillips *et al.* 2006) y presenta poca sobrepredicción en la distribución potencial (Anderson 2003; Joseph & Stokwell 2002; Peterson & Klusa 2003; Peterson & Robins 2003; Peterson & Shaw 2003; Phillips *et al.* 2006).

Estudios recientes indican que MAXENT es relativamente insensible a los errores espaciales asociados a los datos de localización, requiere pocos lugares para la construcción de modelos de utilidad, y funciona mejor que otros enfoques de modelado de sólo presencia (Baldwin, 2009). Es un método de “aprendizaje automático” que busca encontrar la distribución más cercana a la homogeneidad (situación de máxima entropía en la que todos los valores tienen la misma probabilidad de ocurrir) pero restringiendo ésta según la información biológica disponible y las condiciones ambientales del área de estudio. El resultado es un mapa en el que cada celda posee un valor de probabilidad que oscila entre 0 y 1 (Phillips *et al.* 2006). Los resultados del modelado proporcionan datos de salida en los formatos RAW, acumulativos, y de logística. El formato de logística se recomienda actualmente, dado que proporciona estimaciones de la probabilidad de ocurrencia. Al igual que con el formato acumulativo, los rangos de rendimiento logístico tienen valores de 0-1. Por lo tanto, el formato de logística permite una interpretación más fácil y potencialmente más precisa sobre los otros métodos. Todos los tipos de salida pueden ser importados a un SIG para mapear la distribución de probabilidad. (Phillips *et al.* 2008).

En la mayoría de los casos, es importante saber cómo cada variable influye en la presencia de la especie y, posteriormente, las variables que tienen la mayor influencia en el modelo y de qué manera estas variables influyen en la ocurrencia de las especies. La contribución porcentual de cada variable se proporciona en el modelo final. Este es un enfoque heurístico de la importancia del modelo en el que los valores de cotización se fijaron por el aumento de la ganancia en el modelo proporcionado por cada variable. (Baldwin *et al.* 2008; Phillips 2009) Un método alternativo para evaluar la importancia de la variable es el enfoque de Jackknife (Yost *et al.* 2008), el cual proporciona información sobre el desempeño de cada variable en el modelo en términos de la importancia al explicar la distribución de las especies y la cantidad de información específica. Esto puede señalar variables altamente correlacionadas, lo que permite al usuario determinar si los valores de la contribución por ciento son propensos a estar sesgadas debido a estas correlaciones. La construcción de curvas de respuesta, ilustra el efecto de las variables seleccionadas sobre la probabilidad de uso (Hoenes & Bender 2010), tendencias de las variables indican una asociación positiva, movimientos hacia abajo representan una relación negativa, y la magnitud de estos movimientos indica la intensidad de estas relaciones. Como ocurre con cualquier enfoque de modelado, el ajuste o la exactitud del modelo deben ser analizados para determinar la pertinencia del modelo. La trama ROC es un gráfico de la sensibilidad y especificidad, la sensibilidad representa lo bien que predice los datos de presencia, mientras que la especificidad proporciona una medida de ausencias predichas correctamente (Fielding & Bell 1997).

Un cierto porcentaje de los registros es seleccionado para los datos de formación; la otra parte se utiliza para los datos de prueba. Un buen modelo es definido por una curva que maximiza la sensibilidad para los valores bajos de la fracción de falsos positivos. El área bajo la curva (AUC) tiene valores que oscilan normalmente 0.5-1.0. Valores cercanos a 0.5 indican un ajuste no es mejor que el esperado por el azar, mientras que un valor de 1.0 indica un ajuste perfecto. Es posible tener un valor inferior a 0.5, lo que indica que un modelo se ajusta peor que al azar (Engler *et al.* 2004). Una guía general para la clasificación de la exactitud de los modelos es: AUC 1-0.90: excelente; 0.90-0.80: bueno; 0.80-0.70: favorable; 0.70-0.60: pobre y 0.60-0.50: malo (Swets 1988). Entre las ventajas de este método, se encuentra que sólo se requiere datos de presencia, junto con información sobre medio ambiente para toda el área de estudio; se pueden utilizar tanto datos continuos como categóricos, y es posible incorporar las interacciones entre las diferentes variables. MAXENT tiene una concisa definición matemática, y, por tanto, susceptible de análisis; el exceso de ajuste puede evitarse utilizando una regularización. Debido a la dependencia de la distribución de probabilidad sobre la distribución de las localidades de ocurrencia, existe la posibilidad para hacer frente a la cuestión del sesgo en la toma de muestras (Phillips *et al.* 2004; Phillips *et al.* 2006). Sin embargo, cualquier método de modelado que sea empleado para predecir la distribución, producirá dos tipos de errores, de omisión y de comisión (el primero se refiere al área en donde la especie está presente pero el modelo no predice su presencia y el segundo al área en donde la especie no se presenta y el modelo predice su presencia) (Alcantar 2001; Summers *et al.* 1993).

ANTECEDENTES

Se espera que los impactos del calentamiento global sobre diferentes ecosistemas sean tales como alteraciones en la distribución y abundancia de las especies (Hughes, 2000; Peterson *et al.* 2005; Root *et al.* 2005; Parmesan, 2006), la desaparición directa de algunas especies y poblaciones (Thomas *et al.* 2004), así como el agotamiento paulatino o rápido y la desaparición de los servicios que éstos ofrecen (Millenium Ecosystem Assessment, 2005). La creciente preocupación por las consecuencias del cambio climático en la biodiversidad ha llevado al uso de modelos sobre las especies y el clima, así como el desarrollo de modelos que proyecten el riesgo de extinción de especies bajo escenarios de cambio climático (Araujo *et al.* 2005; Gómez- Díaz *et al.* 2007). Wollan *et al.* (2008), demuestran que la temperatura es un factor clave en la distribución regional de la mayoría de las especies vegetales. En algunos casos resulta un factor determinante en la distribución de las especies, por lo cual, los análisis de las variables climáticas resulta una herramienta útil para entender su distribución (Lindenmayer *et al.*, 1991). Por lo tanto, son propensas a responder fuertemente al cambio climático mundial.

Gómez-Díaz *et al.* (2007), simularon y cuantificaron los cambios en las condiciones climáticas que un posible aumento en las concentraciones de gases de efecto invernadero pudieran ejercer en la Barranca de Metztitlán, Hidalgo. La tendencia fue hacia el incremento de los ambientes secos, por lo que se espera una alteración en la composición y distribución de las comunidades vegetales. Villers-Ruíz & Trejo-Vázquez (2003), realizaron una evaluación de la vulnerabilidad de ecosistemas forestales de México, como consecuencia de la aplicación de tres modelos de cambio climático (CC, GFDL-R30 y de sensibilidad). Los ecosistemas más afectados por el impacto humano son bosques tropicales y pastizales, en contraste con los bosques templados y matorrales xerófilos. Gómez-Mendoza & Arriaga (2007), examinaron la vulnerabilidad de 34 especies de encinos y pinos a los efectos del cambio climático global en México. Regionalizando el modelo de cambio climático HadCM2 con datos climáticos locales y reduciendo la escala del modelo. Sostienen que las respuestas a los diferentes escenarios de cambio climático serán específicas por especie y relacionadas con su afinidad climática. Monterroso-Rivas *et al.* (2007), aplicaron modelos de cambio climático para evaluar los rangos con distintos niveles de aptitud de crecimiento del maíz y café en México, de acuerdo a variables tales como temperatura, precipitación y altura. Sergio *et al.* (2007), propone el uso de nicho ecológico en conjunto con conocimientos acerca de las afinidades geográficas y ecológicas de las especies, para estimar su extensión geográfica. Ayala (2006), examina los efectos de dos escenarios de cambio climático sobre las áreas de distribución potencial de las especies de cactáceas en la Reserva de la Biosfera Tehuacán-Cuicatlán (RBTC), con el fin de evaluar el papel que jugará en su conservación a

largo plazo. Entre sus resultados destaca la reducción hasta en un 50% de las aéreas potenciales y la extinción de algunas especies.

Broennimann *et al.* (2006), modelaron la distribución futura en 2050 de especies vegetales endémicas en el sur de África, utilizaron únicamente especies endémicas como una manera de captar el nicho total de las especies. De igual forma consideran el impacto directo de la presión humana sobre el paisaje y la biodiversidad conjuntamente con el clima, además de la posible migración de especies. Confirman que la sensibilidad de las especies a los cambios climáticos ambientales depende de su distribución geográfica y propiedades ecológicas con lo que es posible estimar a priori la sensibilidad potencial a los cambios. Téllez-Valdés & Dávila-Aranda (2002), examinaron los efectos del cambio climático sobre futuros patrones de distribución de cactáceas en la Reserva de la Biosfera de Tehuacán-Cuicatlán, México. Consideran a las aproximaciones bioclimáticas como una herramienta útil para guiar la toma de decisiones concernientes a la definición de áreas protegidas una vez que se conozca el patrón de distribución potencial de las especies. Thomas *et al.* (2004) modelan los efectos del cambio climático en muchos grupos taxonómicos y regiones y llegan a la conclusión de que el calentamiento climático puede ser una importante amenaza para la biodiversidad mundial.

Aunque los efectos del calentamiento del planeta pueden ser muy difíciles de mitigar, algunos autores han sugerido la intrigante posibilidad de que las especies pueden reducir al mínimo los efectos del conservadurismo de nicho y maximizar las posibilidades de adaptación, rápida evolución, incluida la respuesta al cambio climático (Stockwell *et al.* 2003). Recientemente, varios autores han asumido el *conservadurismo de nicho* para evaluar el potencial a gran escala del impacto del calentamiento global sobre las biotas. El trabajo teórico sugiere que los nichos de las especies ecológicas deben permanecer relativamente constantes durante períodos de tiempo a largo plazo. Los nichos ecológicos representan problemas de estabilidad a largo plazo sobre la distribución potencial de las especies. Muchos modelos actuales centran sus esfuerzos en anticipar los efectos del cambio climático sobre las distribuciones geográficas potenciales de las especies. (Martínez-Meyer *et al.* 2004). Peterson *et al.* (2002) utilizan el modelado de nicho en aves, mariposas, y mamíferos mexicanos para ver el efecto del calentamiento global; demostraron que los nichos climáticos se conservan entre especies hermanas de mamíferos, aves y mariposas en México. Sin embargo, su estudio ha sido contrastado por otros, donde se sostiene que los nichos son evolutivamente lábiles (Losos *et al.* 2003; Böhning-Gaese *et al.* 2003; Graham *et al.* 2004b). Otros estudios han apoyado el conservadurismo del nicho (Ricklefs & Latham 1992; Prinzig *et al.* 2001, Pearman *et al.* 2007; Vandermeer 2008).

De esta forma, el adecuado conocimiento de la biogeografía de las especies se presenta como un requisito previo para la evaluación de los posibles efectos de las alteraciones en las condiciones ambientales derivadas del cambio climático. Lamentablemente, los patrones de distribución precisa de las especies de cactáceas comienzan a ser estudiados. En la Región del Desierto Chihuahuense se han desarrollado diversos trabajos enfocados a discernir los patrones geográficos de las cactáceas. Pues esta vasta área constituye el núcleo de concentración de especies de cactáceas amenazadas más importante del continente. Hernández & Bárcenas (1995), integran la distribución geográfica de cactáceas amenazadas para identificar las áreas de mayor concentración de especies en peligro de la Región del Desierto Chihuahuense. De igual forma se han evaluado las áreas ricas en especies. Las áreas de distribución de la gran mayoría de las especies amenazadas en la Región del Desierto Chihuahuense se concentran hacia sus porciones sureste y este, en donde un fenómeno fitogeográfico notable es la predominancia de endemismos restringidos (Hernández & Bárcenas 1996). Así, la diversidad de especies de cactus en zonas como “El Huizache” pueden explicarse por el clima relativamente favorable de este desierto, la heterogeneidad del medio ambiente, y su ubicación en una posición de transición entre las tres regiones con distintas floras cactus: la Región del Desierto Chihuahuense, la Zona Árida Queretano-Hidalguense y los valles de Tula-Jaumave (Hernández *et al.* 2001a). La Región del Desierto Chihuahuense da refugio al más rico ensamblaje de especies de *Cactaceae* en el mundo (Hernández *et al.* 2004).

JUSTIFICACIÓN

Uno de los grandes obstáculos para analizar la distribución geográfica de las cactáceas como lo reconoce Hernández & Godínez (1994), es la carencia de información inventarial, así como la gran inestabilidad taxonómica del grupo, por lo que los estudios dirigidos hacia este grupo, constituyen una valiosa aportación. De igual forma la familia *Cactaceae* está incluida de manera completa en el Apéndice II de la Convención sobre el Tráfico Internacional de Especies Silvestres de Flora y Fauna Amenazadas (CITES) y muchos de sus representantes están comprendidos en el Apéndice I, y en el listado de la Unión Internacional para la Conservación de la Naturaleza y los Recursos Naturales UICN). La mayoría de las especies de cactáceas habitan en las regiones áridas y semi-áridas de México, particularmente en la porción sureste del Desierto Chihuahuense, incluyendo la Zona Árida Querétaro-Hidalguense, esta última conjuntamente con las zonas secas de Guanajuato, forma parte de la Región Central de México. Muchas de ellas están sujetas a presiones de colecta y a la destrucción de su hábitat, además de presentar generalmente, una habilidad limitada para establecerse demográficamente después de un evento de perturbación, por lo que un número significativo de ellas se han incluido en listados de plantas amenazadas (Hernández & Godínez 1994). Aunado a esto, se espera en los próximos años un incremento en la temperatura mundial que alcanzará mayores tasas durante este siglo (IPPC 2007), como se ha mencionado anteriormente, por lo cual es de importancia la elaboración de una metodología capaz de anticipar las alteraciones que probablemente se producirán, lo que permitirá la elaboración de programas de conservación y manejo de los nopales silvestres mexicanos.

OBJETIVOS

OBJETIVO GENERAL

El objetivo del presente estudio es simular y cuantificar los cambios en las distribuciones de las especies silvestres de los géneros *Opuntia* y *Nopalea*, presentes en la Región Central de México (Guanajuato, Hidalgo, Querétaro y San Luis Potosí), ante los efectos en el clima derivados del posible aumento en las concentraciones de gases de efecto invernadero, a partir de la base de datos “Especies Silvestres de Nopales Mexicanos” (Scheinvar *et al.* 2009), el modelado de nicho ecológico, Sistemas de Información Geográfica (SIG), y el modelo de circulación general Inglés HADLEY, para los años de 2050 y 2080.

OBJETIVOS PARTICULARES

- Contribuir al conocimiento de los nopales silvestres mexicanos en cuatro estados de la Región Central de México, evaluando el estatus actual del conocimiento de la distribución geográfica de las especies de cactáceas de los géneros *Opuntia* Mill. y *Nopalea* Salm-Dyck.
- Enlistar las especies endémicas y microendémicas.
- Predicción de modelos de nicho ecológico bajo escenarios de cambio climático y sus posibles efectos sobre la distribución de las especies de *Opuntia* de la Región Central de México al año 2050 y 2080.
- Discutir posibles estrategias para el manejo y conservación de las especies del género *Opuntia* para contraponer los efectos esperados del cambio climático sobre los futuros patrones de distribución de las especies de la Región Central de México.
- Aumentar la representatividad en los herbarios mexicanos y *ex situ*, en el Jardín Botánico del Instituto de Biología de la Universidad Nacional Autónoma de México, con el objeto de contribuir a enriquecer la “Colección Nacional de Nopales Silvestres Mexicanos”.

ÁREA DE ESTUDIO

La Región central de México (RCM) comprende los estados de Guanajuato, Hidalgo, Querétaro y San Luis Potosí, cuenta con una extensión de 49, 327. 091 km². Presenta orografía accidentada, donde dominan los climas secos y semisecos. Formar parte del Desierto Chihuahuense, la parte occidental de San Luis Potosí cubierto por matorrales desérticos integra parte de la Subregión Principal de este importante desierto, mientras que la Subregión Meridional, corresponde a la zona árida Queretano-Hidalgense, así como las zonas secas de Guanajuato (Fig. 1).

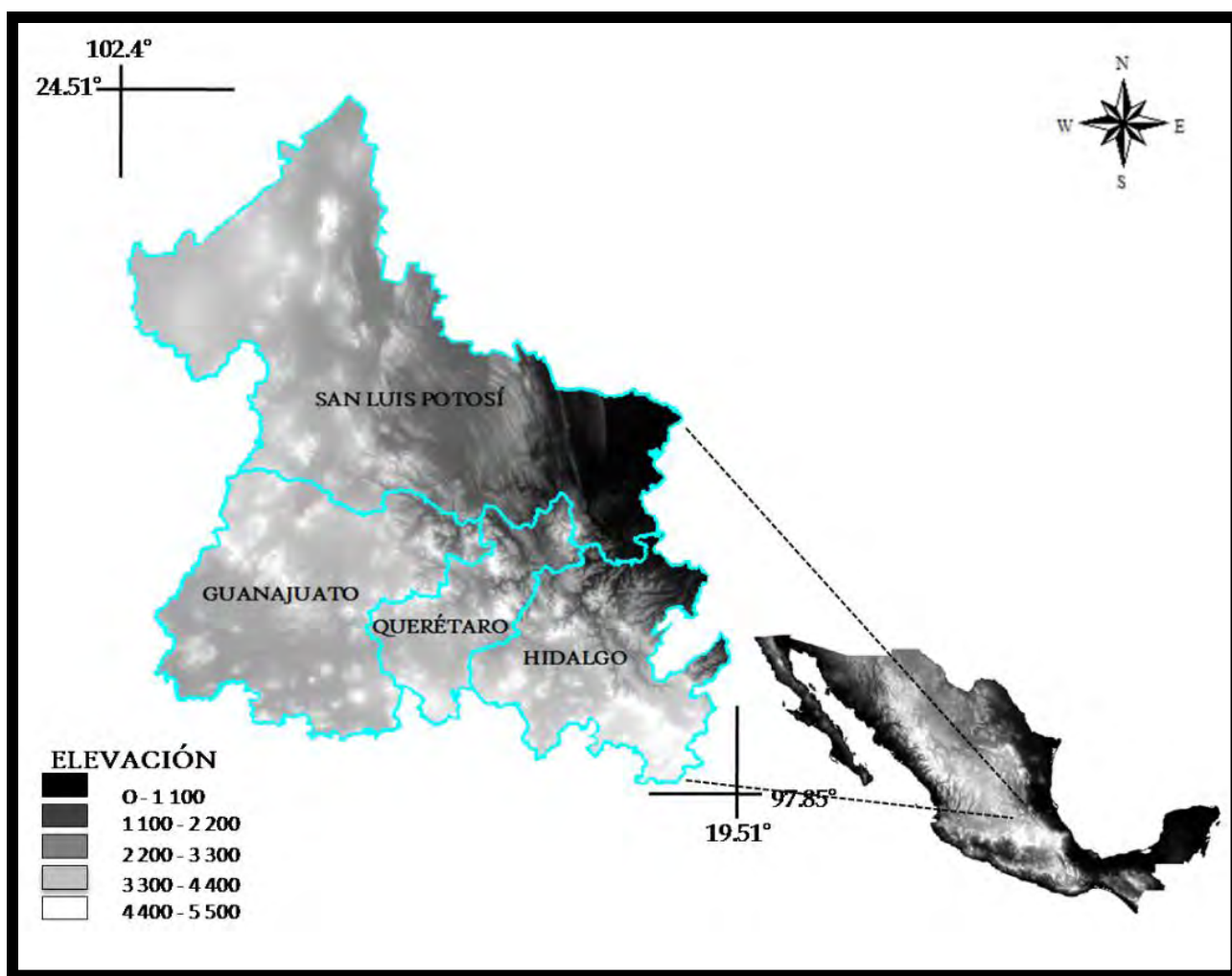


FIGURA 1. REGIÓN CENTRAL DE MÉXICO: ESTADOS DE GUANAJUATO, HIDALGO, QUERÉTARO Y SAN LUIS POTOSÍ.



SITUACIÓN GEOGRÁFICA Y OROGRAFÍA

La RCM, ocupa parte de la Altiplanicie Mexicana y las laderas de las sierras que la limitan y se inclinan hacia ella. Incluye las sierras transversales de Zacatecas, de Guanajuato y del Doctor, en Querétaro y la región de la Sierra Madre Oriental, en las porciones orientales de San Luis Potosí, Querétaro e Hidalgo. (Fig. 2).

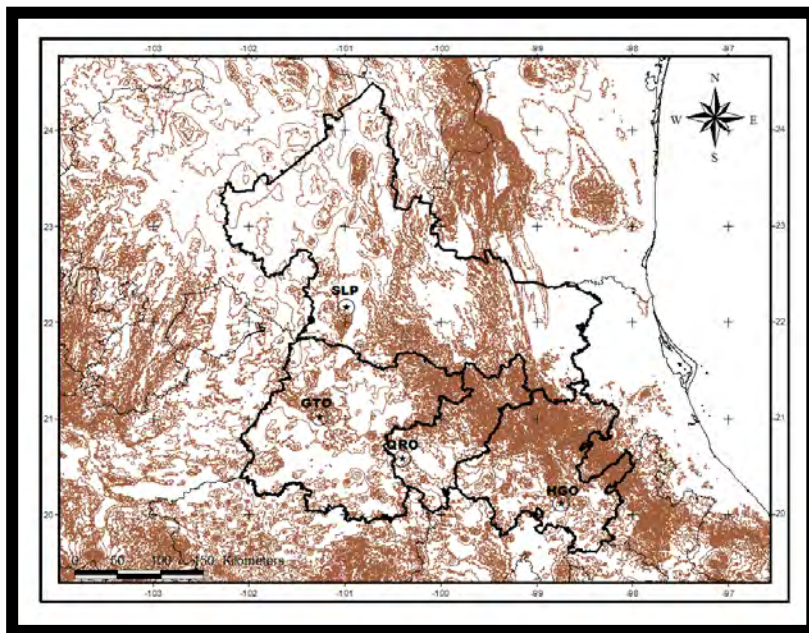


FIGURA 2. OROGRAFÍA DE LA RCM (CONABIO, 1998).

VEGETACIÓN

De acuerdo con Rzedowski (1978), en la RCM se presentan ocho tipos de vegetación: Bosque de coníferas y encinos, Bosque espinoso, Bosque mesófilo de montaña, Bosque tropical caducifolio, Bosque tropical perennifolio, Bosque tropical subcaducifolio, Matorral xerófilo y Pastizal (Fig. 3). La RCM se caracteriza por la predominancia de grandes extensiones de matorral xerófilo, las cuales ocupan el 70% de su territorio.

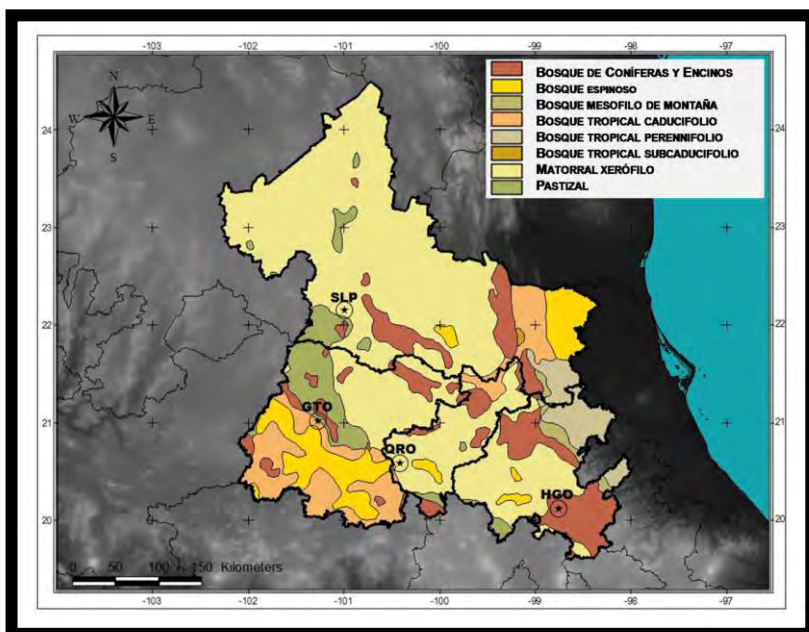


FIGURA 3. TIPOS DE VEGETACIÓN EN LA RCM (CONABIO, 1998).



SUELOS

Los suelos más abundantes en la Región Central de México son de tipo Calcisol, Feozem, y Leptosol. El Calcisol se presenta en las regiones más secas, se caracterizan por la baja cantidad de materia orgánica y la acumulación de sales en la superficie. Los Leptosoles son predominantes en el Desierto Chihuahuense y zonas montañosas, su escasa profundidad convierte los suelos a muy áridos. Los suelos de tipo

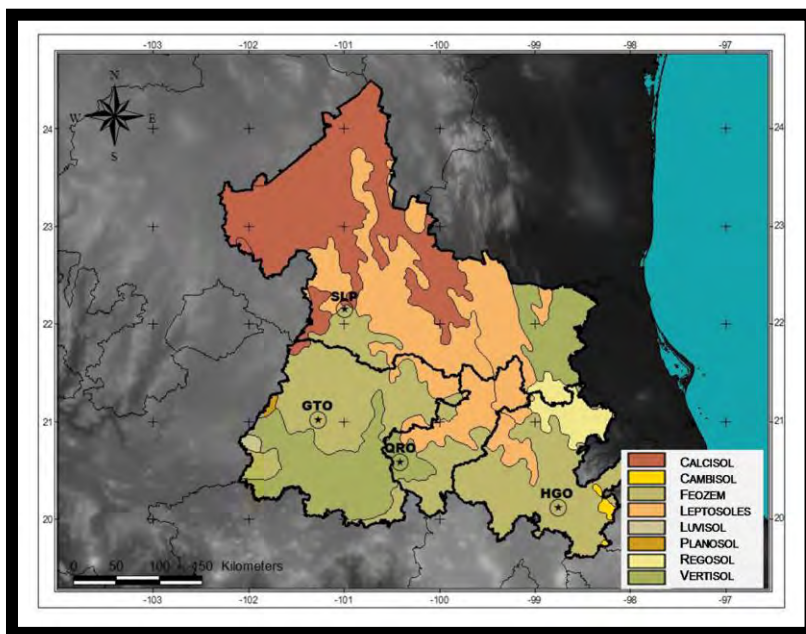


FIGURA 4. TIPOS DE SUELOS EN LA RMC (CONABIO, 2009).

Feozem recubren el Eje Neovolcánico Transversal y porciones de la Sierra Madre Occidental, son muy fértiles, pero sumamente proclives a la erosión, se desarrollan en climas templados y húmedos (Fig. 4).

CLIMAS

Los climas sobre la Altiplanicie corresponden a los subtipos BS₀ y BS₁. Por su precipitación están representados en la mayor parte de Guanajuato, Querétaro e Hidalgo los climas semisecos BS en sus dos subtipos: BS₁ y BS₀, y los climas subhúmedos en sus tres modalidades w₀, w₁ y w₂ (Fig. 5).

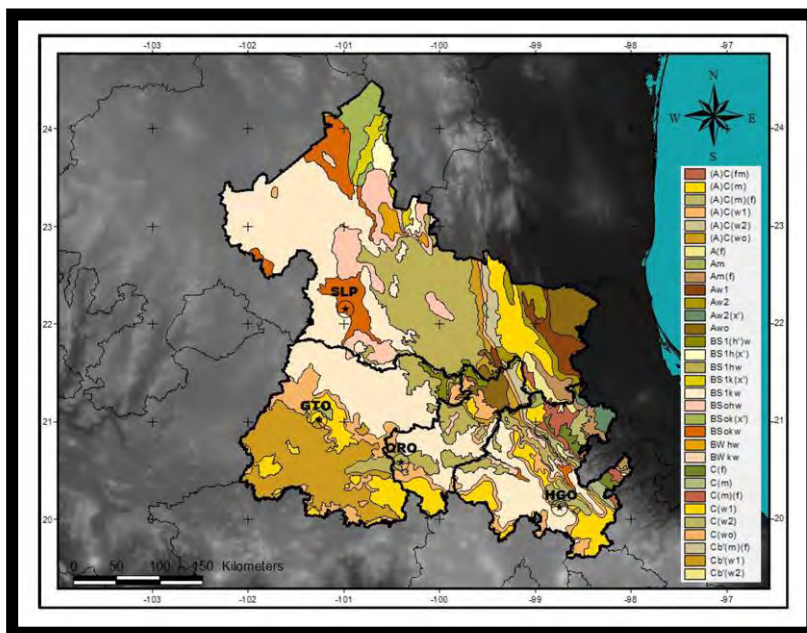


FIGURA 5. TIPOS DE CLIMA EN LA RCM (CONABIO, 1998).

METODOLOGIA

ESTRUCTURACIÓN DE LA BASE DE DATOS “NOPALES SILVESTRES DE LA REGIÓN CENTRAL DE MÉXICO”.

A partir de la Base de Datos “Nopales Silvestres Mexicanos” (Scheinvar *et al.*, 2009) y colectas en campo, se estructuró una Base de Datos con un total de 1, 788 registros de las especies del género *Opuntia* y *Nopalea* presentes en los estados de la Región Central de México: Guanajuato, Hidalgo, Querétaro y San Luis Potosí. El trabajo de campo consistió en cuatro salidas programadas durante los meses de febrero a octubre del 2008, para estudiar las 66 especies de nopales que habitan los cuatro estados de la República. De acuerdo al análisis realizado a la base de datos “Nopales Silvestres Mexicanos”, fueron seleccionadas las localidades con mayor diversidad de especies. El estudio en campo incluyó la colecta de material (cuatro cladodios), realizando la georreferenciación de las localidades y registro de datos en libreta de campo, toma de fotografías digitales del ejemplar (hábito, cladodio, flor, fruto), registro de su fenología, nombres comunes y usos. El material de campo fue identificado, elaborándose cuatro hojas para depositar en los herbarios MEXU, UACH, MO y ARIZ.

MODELADO DEL NICHOS ECOLÓGICO

Distribución Real y Potencial

Se determinó la distribución geográfica actual conocida de las 66 especies de *Opuntia*, presentes en la RCM a partir de la Base de Datos “Nopales Silvestres de la Región Central de México”. La estimación de la distribución potencial se llevó a cabo mediante MaxEnt 2.2 (Maximum Entropy, Phillips *et al.* 2006) utilizando los parámetros definidos por defecto en el programa, pero incluyendo únicamente características lineares y cuadráticas (Trotta *et al.* 2008). Se emplearon el 75% de los registros para la formación del modelo y el 25% restante como datos de prueba. Los resultados del modelo Maxent fueron bajo el formato de salida logístico, el cual proporciona estimaciones de la probabilidad de ocurrencia en un rango de 0-1, el formato logístico permite una interpretación fácil y potencialmente más precisa (Baldwin 2009). La exactitud del modelo se evaluó con los valores del área bajo la curva (AUC, por sus siglas en inglés) ROC (Curva Operada por el Receptor). Mediante la prueba de Jackknife, se obtuvo la información de cómo las variables ambientales influyen en la presencia de la especie, pues proporciona información sobre el desempeño de cada variable en el modelo al explicar la distribución de las especies y la cantidad de información específica. Aunado a lo anterior, con las curvas de respuesta se obtuvieron las cifras especificadas para las variables ambientales que contribuyen en mayor medida al modelo, resolviendo en un 80% la distribución de las especies.

CUADRO 1. PARÁMETROS BIOCLIMÁTICOS

1. Temperatura promedio/media anual °C.
2. Oscilación diurna de la temperatura °C (media del promedio mensual de temperatura máxima-temperatura mínima).
3. Isothermalidad °C (índice de variabilidad de la temperatura, cociente entre parámetros 2 y 7).
4. Estacionalidad de la temperatura (cociente de variación o desviación estándar, en %).
5. Temperatura máxima promedio del mes más cálido °C.
6. Temperatura mínima promedio del mes más frío °C.
7. Oscilación anual de la temperatura °C (rango de temperatura anual, cociente entre parámetros 5 y 6).
8. Temperatura promedio del cuatrimestre más lluvioso °C.
9. Temperatura promedio del cuatrimestre más seco °C.
10. Temperatura promedio del cuatrimestre más cálido °C.
11. Temperatura promedio del cuatrimestre más frío °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 cuatrimestre más lluvioso mm.
17. Precipitación del cuatrimestre más seco mm.
18. Precipitación del cuatrimestre más cálido mm.
19. Precipitación del cuatrimestre más frío mm.

Las proyecciones se editaron en ArcView 3.1, tomando el valor de corte para depurar la extensión potencial predicha. Bajo los anteriores parámetros fue modelado el nicho ecológico de las especies de nopales silvestres en la RCM con el programa MaxEnt, empleando el Modelo Digital de Elevación (MDE) celdas de 30 segundos de arco (0.00083° o aproximadamente 1 km² de superficie) de resolución espacial y 19 variables bioclimáticas con significado biológico (Cuadro 1). Las variables bioclimáticas se derivan de temperaturas mensuales (° Celsius) y valores de precipitaciones (mm). Representan valores anuales, estacionales y factores ambientales limitantes. Los cuatrimestres se



refieren a los cuartos, período de tres meses en que es dividido el año. De acuerdo a los datos climáticos para la RCM (obtenidos de la Climatología 1950-2000 del Centro de Ciencias de la Atmosfera, Martínez *et al.* 2008), el período más cálido corresponde de abril a septiembre, el más frío de octubre a marzo, el más lluvioso de mayo a octubre y el más seco de noviembre a abril; en tanto que los cuatrimestres, el más lluvioso de julio a septiembre; el más seco de febrero a abril; el más cálido de abril a junio y el más frío de diciembre a febrero.

Aplicación del Modelo de Cambio Climático

Para examinar las relaciones entre la sensibilidad de las especies del género *Opuntia* y *Nopalea* presentes en la RCM, las propiedades del nicho y los efectos generados por el cambio climático, fueron modificados los valores de las 19 variables ambientales en función del Modelo de Circulación General ARA4 (IPCC) UKMO HadGEM1 (Johns *et al.*, 2004; 2006). Se desarrollaron proyecciones climáticas futuras, bajo escenarios de cambio climático severos al año 2050 y 2080 en el programa BIOCLIM (ANUCLIM 5.1). Los valores de las variables ambientales al año 2050 prevén un aumento en la temperatura de 0.1-3.0°C y -32% en la precipitación. Durante el año 2080 se espera un incremento en la temperatura de 0.15-4,5°C y -36% en los valores de precipitación. Con las nuevas capas ambientales de los parámetros bioclimáticos (Cuadro1), MaxEnt, y el Modelo Digital de Elevación (MDE) a una resolución espacial de 30 arc-seg (ca. 1 km²) se proyectaron las distribuciones geográficas de las especies del género *Opuntia* y *Nopalea*. Las proyecciones se editaron en ArcView 3.1. Para cada especie, la precisión de cada modelo fue evaluada y se comparó el área bajo la curva (ROC) (índice AUC) (Pearce & Ferrier, 2000). Se calculó el porcentaje de estabilidad del hábitat climáticamente adecuado, definido por las celdas de la cuadrícula adecuadas para la especie tanto en la actualidad y bajo el escenario de cambio climático. De los actualmente adecuados, las celdas de la cuadrícula restantes, porcentaje de hábitat perdido. Por último, el porcentaje de nuevo hábitat climáticamente adecuado, definidos como hábitat inadecuado en la actualidad, pero se prevé que se vuelven más rentables, se calcula como el cociente entre el número de nuevas celdas de la cuadrícula climáticamente adecuadas y el tamaño actual de hábitat (Thuiller *et al.*, 2005). Así, la sensibilidad de las especies al cambio climático fue calculada a partir del porcentaje de píxeles que sigan siendo adecuados para la especie en el presente y las futuras condiciones climáticas. El resto de las cuadrículas, se predice que resulta impropio, y se utilizan para calcular el porcentaje de hábitat perdido (pérdida de hábitat). También se calculó el porcentaje de nuevo hábitat (ganancia de hábitat), definida como las condiciones inadecuadas en píxeles presentes, preo

prevé que adquiera la aptitud después del cambio climático, de acuerdo con la hipótesis de restricciones de dispersión.

FICHAS TAXONÓMICAS

Como producto final se realizó la redacción de las 66 fichas taxonómicas por especie, bajo el formato propuesto por CONABIO, después de realizar la consulta de los principales trabajos taxonómicos para el género *Opuntia* y *Nopalea*. Esta información se complementará con datos climáticos para las especies, las proyecciones de distribución geográfica real, potencial y bajo escenarios de cambio climático y el cambio en el tamaño del nicho ecológico.

RESULTADOS

BASE DE DATOS “NOPALES SILVESTRES DE LA REGIÓN CENTRAL DE MÉXICO”.

Se obtuvieron 147 nuevos registros a partir de la colecta en campo (ANEXO I). En la Región Central de México, se encuentran 3 especies del género *Nopalea* Salm-Dyck, y 63 especies de *Opuntia*. La mayor diversidad de nopales la presenta el estado de San Luis Potosí (48 sp.), en segundo sitio se encuentra Querétaro (40 sp.), seguido de Guanajuato (38 sp.) y finalmente Hidalgo (32 sp.) (Cuadro 2).

CUADRO 2. ESPECIES DEL GÉNERO *OPUNTIA* MILLER Y *NOPALEA* SALM-DYCK PRESENTES EN LA REGIÓN CENTRAL DE MÉXICO (GUANAJUATO♠, HIDALGO♣, QUERÉTARO♦ Y SAN LUIS POTOSÍ*), DISTRIBUCIÓN GEOGRÁFICA CONOCIDA Y NÚMERO DE REGISTROS GEOREFERENCIADOS.

ESPECIE	REGISTROS
<i>Nopalea auberi</i> (Pfeiff.) Salm-Dyck ♦	5
<i>Nopalea cochenillifera</i> (L.) Salm-Dyck ♦*	3
<i>Nopalea dejecta</i> ♦*	7
<i>Opuntia albicarpa</i> ♠♦	5
<i>Opuntia amarilla</i> ♠♠	2
<i>Opuntia atropes</i> Rose ♠	8
<i>Opuntia azurea</i> Rose ♠♠*	7
<i>Opuntia cantabrigiensis</i> Lynch ♠♠♦*	140
<i>Opuntia chavena</i> D. A. Griffiths ♠♠♦*	19
<i>Opuntia chlorotica</i> *	7
<i>Opuntia cochineria</i> D. A. Griffiths ♠♠♦*	16
<i>Opuntia cretochaetha</i> ♠♠♦*	4
<i>Opuntia decumbens</i> Salm-Dyck ♦*	18
<i>Opuntia dillenii</i> (Ker-Gawl.) Haw. ♦	4
<i>Opuntia durangensis</i> Britton & Rose ♠*	6
<i>Opuntia elizondoana</i> E. Sánchez & Villaseñor ♦	2
<i>Opuntia engelmannii</i> Salm-Dyck ♠♠♦*	238
<i>Opuntia erinacea</i> Engelm. et Bigelow *	1
<i>Opuntia ficus-indica</i> (Linn.) Miller ♠♠♦*	25
<i>Opuntia fuliginosa</i> D. A. Griffiths ♠♦*	46
<i>Opuntia glaucescens</i> Salm-Dyck ♠♦*	22
<i>Opuntia grandis</i> Pfeiffer ♣	1
<i>Opuntia guerrana</i> Griff. ♠♠	3
<i>Opuntia guilanchi</i> Griff. ♠♦*	27
<i>Opuntia heliabravoana</i> Scheinvar ♣*	15
<i>Opuntia humifusa</i> *	1
<i>Opuntia hyptiacantha</i> F.A.C. Weber in Bois ♠♠♦*	82
<i>Opuntia ictérica</i> D. A. Griffiths ♠♠♦*	74



CUADRO 2. CONTINUACIÓN.

ESPECIE	REGISTROS
<i>Opuntia incarnadilla</i> D. A. Griffiths ♣	5
<i>Opuntia joconostle</i> F.A.C. Weber in Diguët ♠♠♦*	31
<i>Opuntia lasiacantha</i> Pfeiff ♠♠♦*	77
<i>Opuntia leucotricha</i> De Candolle ♠♠♦*	81
<i>Opuntia lindheimeri</i> Engelman. ♠♦*	11
<i>Opuntia lucens</i> Griff. ♦	1
<i>Opuntia macrorhiza</i> Engelm. *	1
<i>Opuntia matudae</i> Scheinvar ♠♠♦*	12
<i>Opuntia megacantha</i> Salm-Dyck ♠♠♦*	38
<i>Opuntia megarhiza</i> Rose *	35
<i>Opuntia microdasys</i> Lehmann ♠♦*	77
<i>Opuntia nigrita</i> D. A. Griffiths ♠♦*	8
<i>Opuntia oligacantha</i> C. F. Först. ♠♠*	15
<i>Opuntia orbiculata</i> *	1
<i>Opuntia pachona</i> D. A. Griffiths ♠♦*	19
<i>Opuntia pachyrhiza</i> *	19
<i>Opuntia phaeacantha</i> *	8
<i>Opuntia pilifera</i> ♣	1
<i>Opuntia puberula</i> Pfeiff ♦	16
<i>Opuntia pubescens</i> (Lem.) H. Wendl. in Pfeiff ♠♠♦*	47
<i>Opuntia pumila</i> Rose ♠♠♦*	6
<i>Opuntia pyriformis</i> *	1
<i>Opuntia rastrera</i> F.A.C. Weber in Bois ♠♠♦*	70
<i>Opuntia rileyi</i> ♠	2
<i>Opuntia robusta</i> H. Wendl. ♠♠♦*	128
<i>Opuntia rzedowski</i> ♠	1
<i>Opuntia scheeri</i> F.A.C. Webwer in Bois ♠♦	4
<i>Opuntia setispina</i> ♦	1
<i>Opuntia spinulifera</i> ♠♠*	37
<i>Opuntia stenopetala</i> Engelm. ♠♠♦*	135
<i>Opuntia streptacantha</i> Lem. Engelman ♠♠♦*	127
<i>Opuntia stricta</i> Haw. ♠♦	10
<i>Opuntia tomentosa</i> Salm-Dyck ♠♠♦*	52
<i>Opuntia undulata</i> ♠*	2
<i>Opuntia velutina</i> ♠*	4
<i>Opuntia violácea</i> *	3
<i>Opuntia</i> x <i>andersonii</i> *	19
<i>Opuntia zamudioi</i> Scheinvar ♦	9



Dentro de los estados que conforman la RCM, existen 13 Áreas Naturales Protegidas con diferente grado de protección (RB; APFyF, APRN y PN) (cuadro 3).

CUADRO 3. ÁREAS NATURALES PROTEGIDAS EN LA REGIÓN CENTRAL DE MÉXICO	
Reserva de la Biosfera Barranca de Metztitlán	Hidalgo
RB Sierra del Abra Tanchipa	San Luis Potosí y Tamaulipas
RB Sierra Gorda	Querétaro
RB Sierra Gorda de Guanajuato	Guanajuato
Área de Protección de Flora y Fauna Sierra de Álvarez	San Luis Potosí
Área de Protección de Flora y Fauna Sierra La Mojonera	San Luis Potosí y Zacatecas
APRN Cuenca Hidrografica Río Necaxa	Hidalgo y Puebla
PN Cerra de las Campanas	Querétaro
Parque Nacional El Chico	Hidalgo
PN El Cimantaro	Querétaro
PN El Potosí	San Luis Potosí
PN Gogorrón	San Luis Potosí
PN Los Marmoles	Hidalgo

Los puntos georreferenciados en función de las Áreas Naturales Protegidas (ANP), muestran que de las trece ANP's ubicadas en la Región Central de México (Cuadro 3) sólo cinco presentaron localidades de colecta para el género *Opuntia* (Cuadro 4, Fig. 5-8), y en el caso de *Nopalea*, sus especies han sido colectadas únicamente en la Reserva de la Sierra Gorda de Querétaro (Fig. 7).

CUADRO 4. NÚMERO DE ESPECIES DE NOPALES COLECTADOS EN LAS ÁREAS NATURALES PROTEGIDAS DE LA REGIÓN CENTRAL DE MÉXICO.					
ANP	Categoría	Estado	Superficie	Especies	Registros
Sierra Gorda	Reserva de la Biosfera	Querétaro	383, 567	21	83
Sierra Gorda de Guanajuato	Reserva de la Biosfera	Guanajuato	236, 883	16	97
Barranca de Metztitlán	Reserva de la Biosfera	Hidalgo	96, 043	8	20
Sierra de Álvarez	Zona de Protección Forestal y Refugio de la Fauna Silvestre	San Luis Potosí	16, 900	8	12
Los Mármoles	Parque Nacional	Hidalgo	23, 150	2	2



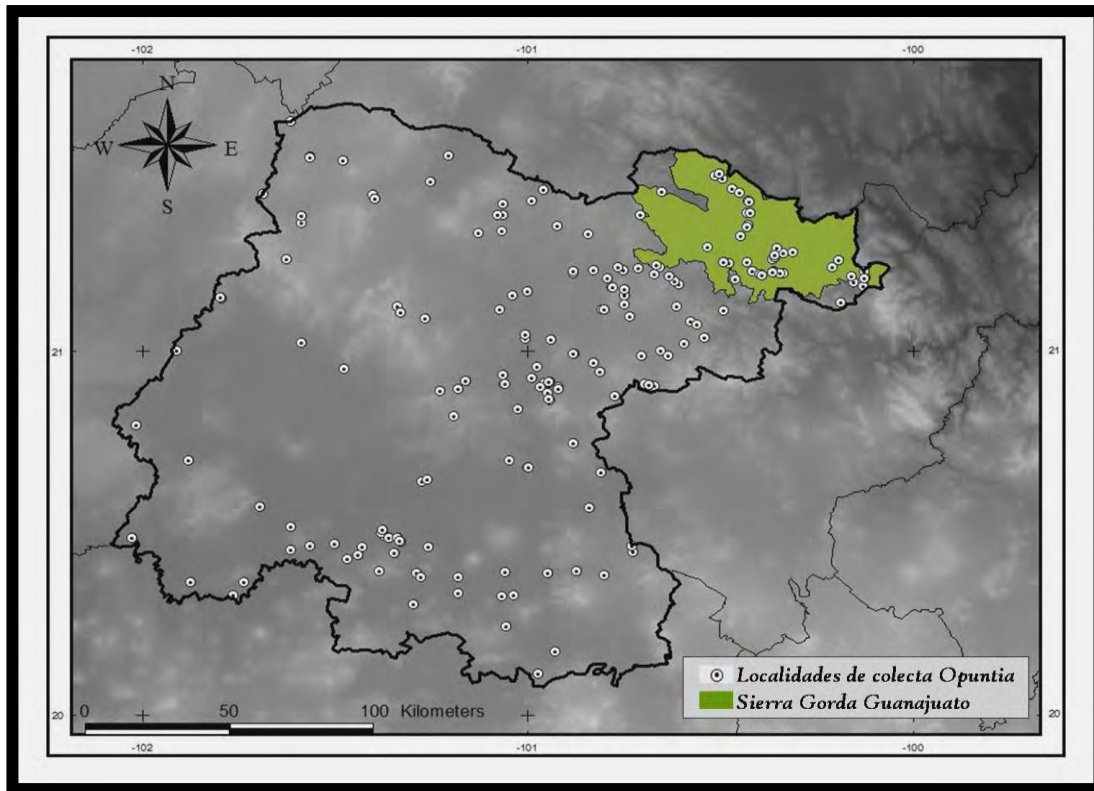


FIGURA 7. LOCALIDADES DEL GÉNERO *OPUNTIA* EN ANP'S DEL ESTADO DE GUANAJUATO.

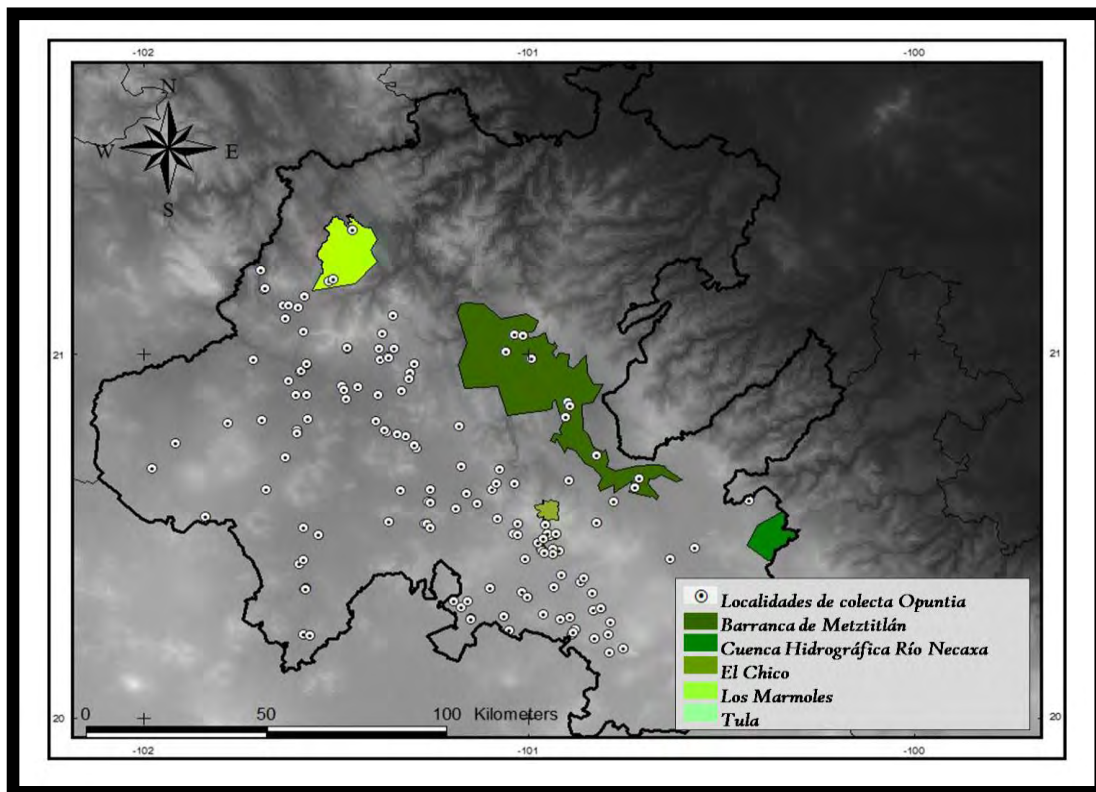


FIGURA 6. LOCALIDADES DEL GÉNERO *OPUNTIA* EN ANP'S DEL ESTADO DE HIDALGO.

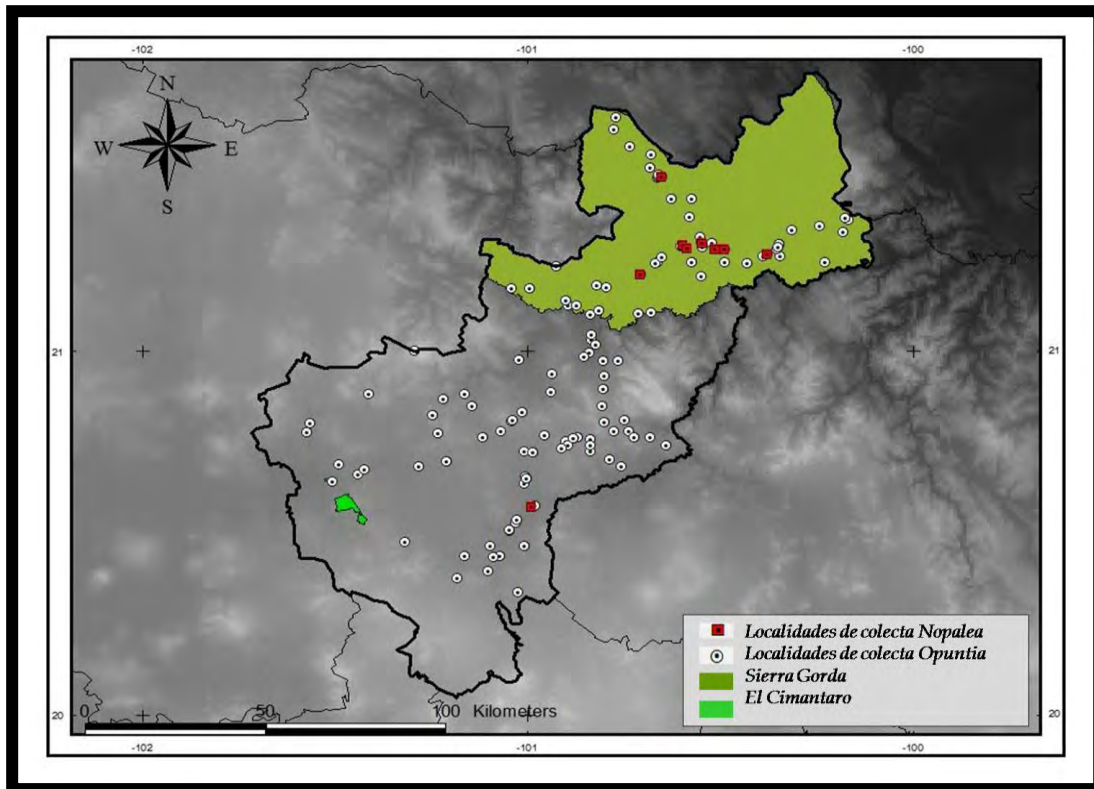


FIGURA 8. LOCALIDADES DEL GÉNERO *OPUNTIA* EN ANP'S DEL ESTADO DE QUERÉTARO.

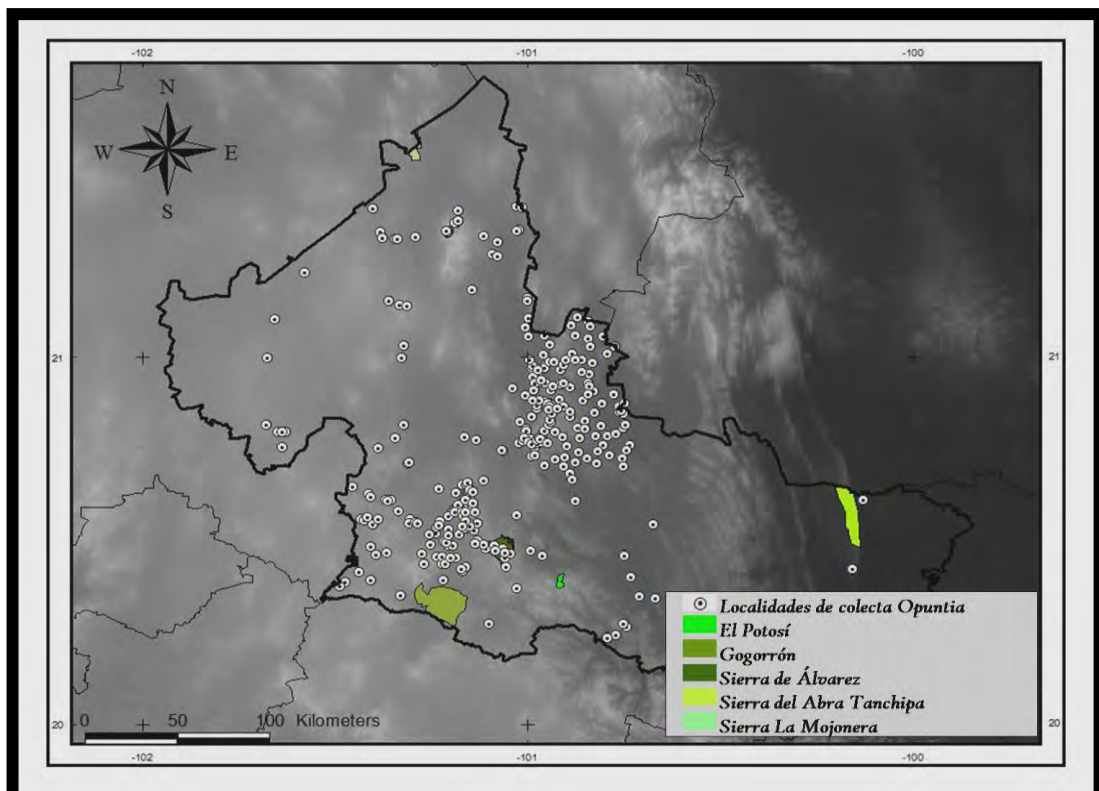


FIGURA 9. LOCALIDADES DEL GÉNERO *OPUNTIA* EN ANP'S DEL ESTADO DE SAN LUIS POTOSÍ.

MODELADO DEL NICHU ECOLÓGICO

A) EVALUACIÓN DEL MODELO

Los modelos generados por MaxEnt fueron evaluados a partir de los valores obtenidos para el Área bajo la Curva (AUC). El valor del AUC del género *Nopalea* para los datos de entrenamiento tiene valores de 0.898-0.987, es decir que los modelos generados son mejores que aquellos realizados al azar. En tanto, los datos de prueba presentan valores de 0.730-0.807 (regular). El valor del AUC del género *Opuntia* para los datos de entrenamiento tiene valores de 0.91-1.0, mientras que los datos de prueba presentan valores de 0.81-1.0. Por lo que la predicción tiene un alto nivel de precisión en la discriminación de las áreas donde la especie se encuentra y entre aquellas en las que está ausente.

CUADRO 5. VALORES DE AUC PARA LOS MODELOS DEL GÉNERO *NOPALEA* Y *OPUNTIA*.

ESPECIE	AUC (TRAINING)	AUC (TEST)	VALOR DE CORTE
<i>Nopalea auberi</i>	0.898	0.807	0.586
<i>N dejecta</i>	0.987	0.730	0.540
<i>Opuntia albicarpa</i>	0.998	0.995	0.635
<i>O atropes</i>	0.986	0.978	0.582
<i>O azurea</i>	0.996	0.997	0.569
<i>O cantabrigiensis</i>	0.996	0.995	0.471
<i>O chavena</i>	0.984	0.969	0.488
<i>O chlorotica</i>	0.983	0.976	0.517
<i>O cochinera</i>	0.994	0.993	0.216
<i>O cretochaetha</i>	0.992	0.830	0.491
<i>O decumbens</i>	0.998	0.992	0.491
<i>O dillenii</i>	0.994	1.000	0.602
<i>O durangensis</i>	0.997	0.991	0.493
<i>O engelmannii</i>	0.994	0.992	0.533
<i>O ficus-indica</i>	0.996	0.993	0.542
<i>O fuliginosa</i>	0.994	0.961	0.422
<i>O glaucescens</i>	0.996	0.993	0.48
<i>O guilanchi</i>	0.992	0.997	0.324
<i>O heliabravoana</i>	0.999	1.000	0.416
<i>O hyptiakantha</i>	0.990	0.988	0.214
<i>O icterica</i>	0.993	0.983	0.416
<i>O incarnadilla</i>	1.000	0.989	0.726
<i>O joconostle</i>	0.997	0.993	0.630
<i>O lasiakantha</i>	0.993	0.990	0.433
<i>O leucotricha</i>	0.993	0.992	0.330
<i>O lindheimeri</i>	0.988	0.961	0.417
<i>O matudae</i>	0.965	0.962	0.389
<i>O megakantha</i>	0.992	0.993	0.249
<i>O megarrhiza</i>	0.997	0.986	0.504



CUADRO 5. CONTINUACIÓN.

ESPECIE	AUC (TRAINING)	AUC (TEST)	VALOR DE CORTE
<i>Omicrodasys</i>	0.996	0.996	0.372
<i>Onigritha</i>	0.980	0.942	0.526
<i>Ooligacantha</i>	0.992	0.994	0.248
<i>Opachona</i>	0.992	0.996	0.569
<i>Opachyrrhiza</i>	0.998	0.997	0.558
<i>Ophaeacantha</i>	0.995	0.981	0.525
<i>Opuberula</i>	0.998	1.000	0.483
<i>Opubescens</i>	0.995	0.993	0.390
<i>Opumila</i>	0.964	0.908	0.332
<i>Orastrera</i>	0.997	0.994	0.477
<i>Orobusta</i>	0.995	0.991	0.454
<i>Oscheeri</i>	0.991	0.810	0.506
<i>Ospinulifera</i>	0.994	0.999	0.255
<i>Ostenopetala</i>	0.997	0.997	0.488
<i>Ostreptacantha</i>	0.996	0.987	0.423
<i>Ostricta</i>	0.997	1.000	0.578
<i>Otomentosa</i>	0.995	0.988	0.302
<i>Ovelutina</i>	0.918	0.952	0.512
<i>Oxandersonii</i>	0.999	1.000	0.723
<i>Ozamudoi</i>	0.994	1.000	0.599

VARIABLES AMBIENTALES RELACIONADAS A LA PRESENCIA DE ESPECIES

Las variables bioclimáticas que explican y resuelven en conjunto el 80% de los modelos de distribución geográfica potencial de las especies del género *Nopalea* fueron, en orden de importancia

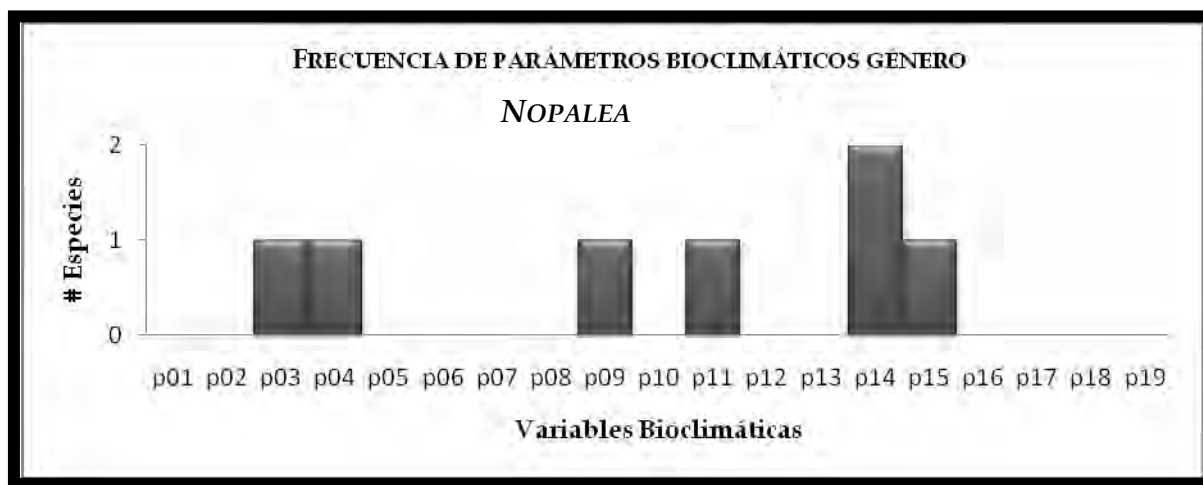


FIGURA 9. FRECUENCIA DE LOS PARÁMETROS BIOCLIMÁTICOS PARA EL GÉNERO *NOPALEA*.

fueron la precipitación del periodo más seco (**p14**), isothermalidad (**p03**), estacionalidad de la temperatura (**p04**), temperatura promedio del cuatrimestre más frío (**p11**), temperatura promedio del cuatrimestre más seco (**p09**) y estacionalidad de la precipitación (**p15**) (Fig. 9 y Cuadro 6). En el caso de las especies del género *Opuntia* las variables bioclimáticas fueron la estacionalidad de la temperatura (**p04**), temperatura promedio del cuatrimestre más cálido (**p10**), precipitación del cuatrimestre más frío (**p19**), precipitación del periodo más lluvioso (p13), precipitación del cuatrimestre más seco (**p17**), y temperatura mínima promedio del periodo más frío (**p06**) (Fig. 10 y Cuadro 6).

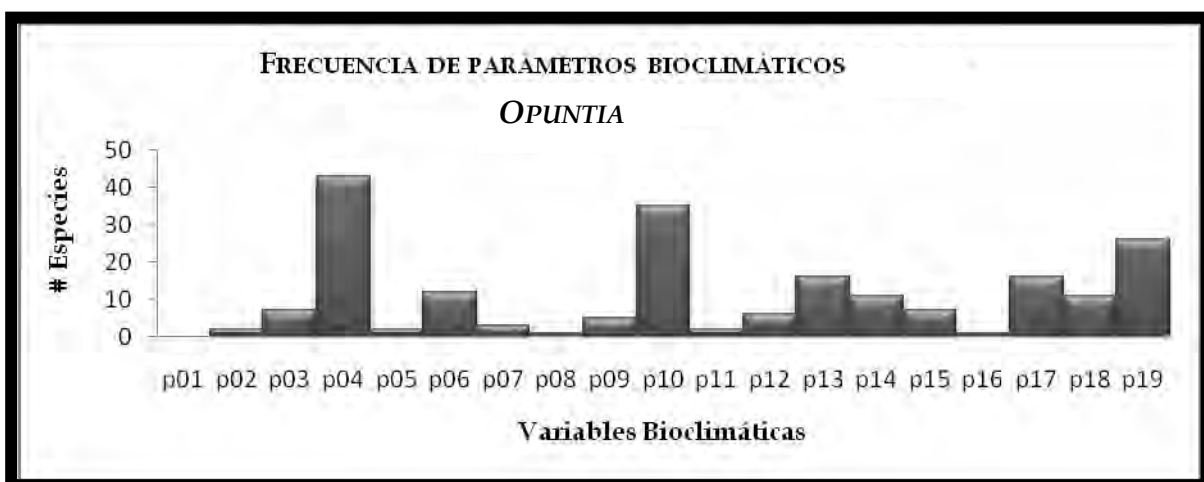


FIGURA 10. FRECUENCIA DE LOS PARÁMETROS BIOCLIMÁTICOS PARA EL GÉNERO *OPUNTIA*.

CUADRO 6. VALORES PORCENTUALES DE PARÁMETROS BIOCLIMÁTICOS EN ESPECIES DEL GÉNERO *OPUNTIA* Y *NOPALEA*.

Especie	p 01	p 02	p 03	p 04	p 05	p 06	p 07	p 08	p 09	p 10	p 11	p 12	p 13	p 14	p 15	p 16	p 17	p 18	p 19
<i>Nopalea auberi</i>	0	0	3.6	31.2	0	0	0	0	0	0	0	0	3.7	55.5	4.4	0	0	0	1.5
<i>N dejecta</i>	4.2	0.8	8.9	4.5	1.8	0	0	0	18.5	0	18.7	0	1.8	16.6	20.8	0	1.8	0	1.6
<i>O atropes</i>	0	12.7	10.2	29.7	0	0.3	0	0	0	13.1	0	0	0	7.8	11.1	0	0	2.3	12.7
<i>O azurea</i>	0	0	1.8	14.3	0	0	0	0	0	41.2	0	0.5	0	2.8	0	17.2	6.4	7.2	8.7
<i>O chlorotica</i>	0	0	0	22.9	0	0	0	0.2	0	14.7	0	0	35.6	11.2	4.1	0	6.1	0	5.1
<i>O cochineria</i>	1.1	0.1	0.5	25.5	0	9.9	0	0	0	35	0	0.8	14.4	0	0	0	4.6	4.9	3.4
<i>O decumbens</i>	7.8	0	12.9	22.7	6	1.5	0.7	0	13	0	0	0	2.6	7.3	7.1	0.1	2.8	9.1	6.3
<i>O dillenii</i>	0.9	0.7	3.7	0.5	0	0	0	0	17.2	0	21.3	0	1.6	11.5	19.6	0	11.4	4.8	6.9
<i>O durangensis</i>	0	4.6	3.5	27.5	0	0.1	2.5	0	0	25	0	5.6	0	12.3	0	0	1.8	11.7	5.4
<i>O engelmannii</i>	0	0	2.8	28.9	0.1	2.3	0	0	4.1	22.6	0.7	8.8	1.6	0	0	6.5	10.5	4.8	4.8
<i>O fuliginosa</i>	0	0.5	0.3	31	0.1	2.7	7.7	0	0	24.2	0	0	0	0.2	0	3	8.8	2.7	18.8
<i>O glaucescens</i>	4.5	0.7	0.1	27.2	0.8	12.1	5.7	0	0	18.5	0	0	6.5	0.3	0.3	1.4	11.8	1.3	8.7
<i>O guilanchi</i>	0.1	0.2	0.3	19.3	0	3.5	6.4	0	0.2	36.3	0	0.3		0.2	2.2	0.4	12.6	2.6	15.3
<i>O hyptiacantha</i>	0.3	2.1	0.5	15.4	0	5.3	0	0	0	40.2	0	0.5	13.1	0	0.7	1.3	10.3	0.1	10.1
<i>O joconostle</i>	0.4	3.6	0.1	26.4	0	9.5	6.3	0	0	38.4	1.5	0.6	2.9	0.1	0.7	0.1	2.2	0.3	6.9
<i>O lasiacantha</i>	0	0.8	0.3	26.4	0.3	16.6	0	0	0	31.4	0	0.5	0.1	0.1	0.4	0.8	9.3	4.3	8.5
<i>O leucotricha</i>	0	1.8	0.4	28.6	0.2	5.8	0.1	0.2	0	30.8	0	0	10.1	0.1	0.2	0	9.8	2.2	9.7
<i>O lindheimeri</i>	0	0	0.6	22.1	0	0.5	0.1	0	0	36.3	0	0	24.4	6.2	0.9	0	1.9	0	7
<i>O megacantha</i>	0	5.1	0	19.6	0.1	1.3	1.9	0	0	40.9	0	0.2	14.6	0	0.6	0	2.8	4.2	8.7
<i>O megarrhiza</i>	0	0	5.6	18.6	0	0.9	0	2.1	0	30.7	0	0	27.5	4	0	0	6.1	0	4.4
<i>O microdasys</i>	0	0.6	4.4	31.9	3.4	13.5	0	0	0.5	10.6	0	1	19.9	0.1	5.3	1	3.1	3	1.9
<i>O pachyrrhiza</i>	0.3	0	4.2	15.4	0	1.7	0	0.2	1.9	28	0	0	25.9	5.1	3.7	0.5	5.7	3	4.2
<i>O phaeacantha</i>	0	0	2.5	16.9	0	0	0.1	0.9	0	35.1	0	0	29.3	4.1	0	0	6.1	0	4.8
<i>O pubescens</i>	1.5	1.9	0.2	37.4	0	8.1	16.1	1.4	6	0	0	5.4	0.2	0.2	0.4	1.2	1.9	2.6	15.5



CUADRO 6. CONTINUACIÓN.

Especie	P 01	P 02	P 03	P 04	P 05	P 06	P 07	P 08	P 09	P 10	P 11	P 12	P 13	P 14	P 15	P 16	P 17	P 18	P 19
<i>O rastrera</i>	0	1.6	1.2	19.9	0	4.2	0	0	2.8	26.9	0	0	28.8	0	0.1	0	13.6	0.5	0.3
<i>O robusta</i>	0	0.7	2.1	27.6		0.5	0.2	0.8	0.5	24.1	0.2	8.1	0	0.3	0.1	0.5	11.4	15.7	7.2
<i>O scheeri</i>	0	0	1.3	17.1	0	0	0	0	15.2	47.6	0	0	0	4.3	0.2	0	0	14	0.2
<i>O spinulifera</i>	0	0	0	15.1	0	0.3	0	0	0.6	51.7	0	0	17.2	0.2	0.5	0	3.6	6.7	4.1
<i>O stenopetala</i>	0	0	5.7	30.1	0.1	4.5	0.4	0	4.5	16.5	3.7	0.1	0.1	0.2	2.4	16.1	5.2	6.6	3.7
<i>O streptacantha</i>	0	3.6	0.6	18.9	0.1	6.9	0	0	0	44.1	0	0.2	10.1	0.1	1	0	5.7	0.4	8.2
<i>O stricta</i>	2.9	0.4	2	3.4	0.1	0	0	0	11	0	6.2	0	1.6	7.2	25.3	0	15.7	7.7	16.4
<i>O tomentosa</i>	0	2.2	0.3	30.9	0	5.7	5.8	0	0	20	0	0.4	0.7	0.1	0.6	0.6	9.6	0.7	22.3
<i>O velutina</i>	0	0	0.3	29.7	0	0	0.7	0	1.4	7.6	0	0	0	29.3	1.7	0	0	7.2	22.2
<i>O x andersonii</i>	1.3	0	0.4	31.8	0	7.5	0.1	6.5	0	0	1.7	0	29.2	5.7	8.8	0.9	2.1	0	3.9
<i>O zamudioi</i>	0	0	0.7	29.5	0	0	1.1	0	2.6	0	0	0	0	37.8	14.2	0	4.1	0	10.1



MODELAJE DEL NICHU ECOLÓGICO: DISTRIBUCIÓN REAL Y POTENCIAL

DISTRIBUCIÓN REAL

El género *Nopalea* en la Región Central de México (RCM), se distribuye principalmente en la porción SE de San Luis Potosí, y norte de Querétaro. Ha sido colectado en el ANP Reserva de la Biosfera Sierra Gorda de Querétaro (Cuadro 4).

Las especies del género *Opuntia* se distribuyen al norte de la RCM, en la porción noreste y en el suroeste de San Luis Potosí, NO y SE del estado de Guanajuato, de forma regular en Querétaro y finalmente hacia la porción oeste y sur del estado de Hidalgo. Los registros de 27 especies de *Opuntia* (Cuadro 4), se presentan en cinco de las 13 áreas bajo algún grado de protección ubicadas en el área de estudio: Reserva de la Biosfera Sierra Gorda de Guanajuato, Guanajuato; Reserva de la Biosfera Barranca de Metztitlán y Parque Nacional Los Mármoles, Hidalgo; Reserva de la Biosfera Sierra Gorda, Querétaro y la Zona de Protección Forestal y Refugio de la Fauna Silvestre Sierra de Álvarez en San Luis Potosí.

DISTRIBUCIÓN POTENCIAL ACTUAL

Las distribuciones geográficas potenciales de *Nopalea*, fueron realizadas a dos de las tres especies presentes en la Región Central de México. A *Nopalea cochenillifera* no se generó el modelo ya que contó con tres registros de colecta (Cuadro 2, Mapa 2). En el cuadro 7 se indica la superficie estimada que ocupa cada especie. Las áreas de las distribuciones geográficas potenciales de *N. auberi* y *N. dejecta* se extienden hacia zonas donde aun no han sido muestreadas, principalmente la región Noroeste de la RCM (Mapa 1a y 2a).

Cuadro 7. DISTRIBUCIÓN DEL HÁBITAT BAJO EFECTOS DE CAMBIO CLIMÁTICO Y PORCENTAJE DE ESTABILIDAD DEL HÁBITAT CLIMÁTICAMENTE ADECUADO DEL GÉNERO *NOPALEA*

Especie	No. de Registros	Distribución Potencial Actual (km ²)	Distribución Potencial UKMO HadGEM1							
			km ²		Hábitat (%)					
			2050	2080	Ganancia		Pérdida		Estabilidad	
				2050	2080	2050	2080	2050	2080	
<i>N auberi</i>	5	5,686	138	15	0	0	97.6	99.7	2.4	0.3
<i>N dejecta</i>	7	3,244	2,067	2,001	2.6	1.5	37.6	38.9	59.7	59.6

En el cuadro 8 se indica la superficie estimada para cada taxón del género *Opuntia*. *Opuntia pumila* presentó la mayor extensión geográfica (42,750 km²), y *O. x andersonii* la menor (560 km²).



Cuadro 8. DISTRIBUCIÓN DEL HÁBITAT BAJO EFECTOS DE CAMBIO CLIMÁTICO Y PORCENTAJE DE ESTABILIDAD DEL HÁBITAT CLIMÁTICAMENTE ADECUADO DEL GÉNERO *OPUNTIA*

Especie	No. de Registros	Distribución Potencial Actual (km ²)	Distribución Potencial UKMO HadGEM1							
			km ²		Hábitat (%)					
			2050	2080	Ganancia		Pérdida		Estabilidad	
				2050	2080	2050	2080	2050	2080	
<i>O albicarpa</i>	5	8,568	6,979	4,952	43.1	36.3	53.7	63.1	3.2	0.6
<i>O atropes</i>	8	16,726	19,554	21,858	17.3	24.7	3.3	1.7	79.4	73.6
<i>O azurea</i>	7	9,265	4,799	2,905	23.7	14.7	60.5	73.3	15.9	12
<i>O cantabrigiense</i>	140	19,126	3,597	1,521	6.5	3.8	82.4	92.3	11.1	3.9
<i>O chavena</i>	19	23,230	35,828	36,783	35.2	36.8	0.0	0.0	64.8	63.1
<i>O chlorotica</i>	7	20,847	25,445	26,435	13.3	13.4	20.2	17.3	66.5	69.3
<i>O cochineria</i>	16	27,674	23,918	21,996	10.9	10.7	23.0	29	66	60.3
<i>O cretochaetha</i>	4	34,922	41,098	41,996	15.7	17.1	0.7	0.3	83.6	82.6
<i>O decumbens</i>	18	5,293	4,143	4,507	24.0	31.9	40.5	42.0	35.5	26.1
<i>O dillenii</i>	4	1,865	1,638	2,575	32.0	46.5	40.3	26.1	27.6	27.3
<i>O durangensis</i>	6	28,249	40,371	41,007	30.6	31.7	0.9	0.8	68.4	67.5
<i>O engelmannii</i>	238	20,863	5,326	2,282	7.4	5.4	76.4	89.6	16.2	5.0
<i>O fuliginosa</i>	46	22,876	10,618	7,858	9.4	7.4	58	68.2	32.5	24.4
<i>O glaucescens</i>	22	10,801	7,664	5,606	21.2	25.7	44.0	61.4	34.7	12.1
<i>O guilanchi</i>	27	27,952	10,459	8,203	10.8	13.2	66.6	74.5	22.5	12.3
<i>O heliabravoana</i>	15	4,570	5,315	6,171	50.6	50.7	42.5	33.5	6.9	15.8
<i>O hyptiacantha</i>	82	32,295	35,549	30,354	11.7	4.4	2.8	10.2	85.5	85.4
<i>O icterica</i>	74	8,884	4,844	5,097	35.2	36.4	64.7	63.5		
<i>O incarnadilla</i>	5	1,626	2,210	2,806	57.6	59.5	42.4	30.2		10.3
<i>O joconostle</i>	31	11,875	2,502	670.48	11.6	4.3	84.7	94.6	3.7	1.0
<i>O lasiacantha</i>	77	27,057	19,994	10,520	13.7	10.0	36.2	65.0	550.0	25
<i>O leucotricha</i>	81	27,187	23,798	25,486	10.8	14.9	21.9	20.2	67.3	65
<i>O lindheimeri</i>	11	28,722	35,153	39,911	19.2	28.0	1.08	0.0	79.7	72
<i>O matudae</i>	12	25,355	38,733	39,648	34.5	36.0	0.0	0.0	65.4	64
<i>O megacantha</i>	38	22,291	20,616	12,228	15.4	14.0	21.7	52.9	62.8	33.2
<i>O megarrhiza</i>	35	14,895	6,896	9,499	9.1	14.7	57.9	45.6	33	39.7

CUADRO 8. CONTINUACIÓN.

Especie	No. de Registros	Distribución Potencial Actual (km ²)	Distribución Potencial UKMO HadGEM1								
			km ²		Ganancia			Pérdida		Estabilidad	
			2050	2080	2050	2080	2050	2080	2050	2080	
<i>O microdasys</i>	77	14,397	15,908	20,413	29.9	37.0	22.5	10.7	47.6	52.3	
<i>O nigritha</i>	8	28,470	38,371	42,854	28.0	33.6	3.02	0.0	68.9	66.4	
<i>O oligacantha</i>	15	20,926	32,747	29,882	38.9	34.7	4.4	6.79	56.7	58.5	
<i>O pachona</i>	19	13,238	17,852	624	32.0	1.5	8.4	95.3	59.5	3.2	
<i>O pachyrrhiza</i>	19	9,832	1,891	577	1.9	0.3	81.1	94.1	16.9	5.6	
<i>O phaeacantha</i>	8	18,655	14,914	24,199	17.1	27.5	33.8	6.0	49.1	66.5	
<i>O puberula</i>	16	3,648	3,937	3,39	40.2	37.4	35.5	41.9	24.3	20.7	
<i>O pubescens</i>	47	19,043	12,700	3,903	6.7	3.8	37.7	80.3	55.6	15.9	
<i>O pumila</i>	6	47,750	42,505	40,866	1.8	0.1	0.0	2.2	98.2	97.6	
<i>O rastrera</i>	70	9,735	3,852	3,587	5.3	11.9	62.5	67.5	32.1	20.6	
<i>O robusta</i>	128	17,845	4,812	3,142	10.2	6.9	75.8	83.6	14	9.5	
<i>O scheeri</i>	4	34,544	9,502	6,732	0.8	0.3	72.7	80.6	26.5	19.0	
<i>O spinulifera</i>	37	14,597	10,283	4,929	29.0	22.1	50.0	73.7	21	4.1	
<i>O stenopetala</i>	135	11,126	6,804	6,143	16.8	11.9	49.1	51.4	34.1	36.7	
<i>O streptacantha</i>	127	1,872	5,059	6,886	5.8	6.2	77.1	69	17.1	24.8	
<i>O stricta</i>	10	941	1,860	1,049	61.7	45.8	24.3	39.6	14.0	14.7	
<i>O tomentosa</i>	52	22,218	6,877	5,520	9.5	10.7	72	77.8	18.5	11.5	
<i>O velutina</i>	4	37,777	42,361	21,853	10.8	0	0.0	42.1	89.2	57.8	
<i>O x andersonii</i>	19	560.63	1,493	1,396	67.8	71.3	14.2	28.6	18	0.1	
<i>O zamudioi</i>	9	4,556	4,193	5,509	19.6	33.2	26.0	19.2	54.3	47.6	

APLICACIÓN DEL MODELO DE CAMBIO CLIMÁTICO

DISTRIBUCIÓN DEL HÁBITAT BAJO EFECTOS DE CAMBIO CLIMÁTICO Y CÁLCULO DEL PORCENTAJE DE ESTABILIDAD DEL HÁBITAT CLIMÁTICAMENTE ADECUADO.

Los valores de las 19 variables ambientales se modificaron en función del Modelo de Circulación General ARA4 (IPCC) UKMO HadGEM1. El Modelo prevé para el año 2050 un aumento en la temperatura de 0.1-3.0°C y -32% en los valores de precipitación. *Nopalea auberi* presentó una distribución potencial de 5,686 km² (Mapa 1a), extensión que decrece drásticamente hacia el 2050, con



una pérdida del hábitat del 97.6% y presentando solo 138 km² en su superficie estimada (Mapa 1b). El área potencial para *N. dejecta* fue de 3,244 km² (Mapa 3a), la cual decrece en un 37.6%, conservando 2,067 km² de su hábitat (Mapa 3b). La distribución geográfica de las especies del género *Opuntia* posiblemente se incrementará de 1-60%. *Opuntia pachyrrhiza*, *O. pumila*, *O. rastrera*, y *O. streptacantha* aumentaran la extensión geográfica de su hábitat de 1-5%.

O. heliabravoana, *O. incarnadilla*, *O. stricta* y *O. x andersonii* incrementaran de 50-60% su distribución potencial. *O. x andersonii* tendrá la mayor ganancia en cuanto a incremento de hábitat en un 67.8%; en tanto que *O. scheeri* obtuvo el menor porcentaje de aumento en su superficie (0.8%). Los porcentajes de reducción en la distribución potencial varían de 1 a 99%. *O. atropes*, *O. hyptiacantha*, *O. lindheimeri*, *O. nigrita*, y *O. oligacantha* redujeron sus extensiones de 1-5%; *O. albicarpa*, *O. azurea*, *O. cantabrigiensis*, *O. engelmannii*, *O. fuliginosa*, *O. guilanchi*, *O. ictérica*, *O. joconostle*, *O. megarrhiza*, *O. pachyrrhiza*, *O. rastrera*, *O. robusta*, *O. scheeri*, *O. spinulifera*, *O. streptacantha*, y *O. tomentosa* tuvieron una pérdida en la extensión de su hábitat de 50-99%. *O. joconostle* presentó la mayor reducción (84.7%); en tanto que *O. pumila* el menor valor de reducción en su superficie (0.0051%). La estabilidad del hábitat presentó valores de 1-98%. *O. albicarpa* y *O. joconostle* conservaron en un 3.2% y 3.7% de su extensión geográfica; *O. atropes*, *O. chavena*, *O. chlorotica*, *O. cochineria*, *O. cretochaetha*, *O. durangensis*, *O. hyptiacantha*, *O. lasiacantha*, *O. leucotricha*, *O. lindheimeri*, *O. matudae*, *O. megacantha*, *O. nigrita*, *O. oligacantha*, *O. pachona*, *O. pubescens*, *O. pumila*, *O. velutina* y *O. zamudioi* presentan valores de persistencia del 50-98%. La más alta tasa estabilidad la presentó *O. pumila* (98.2%); en tanto la menor se dio en *O. albicarpa* (3.2%).

Durante el año 2080 el MCG HadGEM1 predice un incremento en los valores de temperatura de 0.15-4,5°C y -36% en precipitación. Se calcula que para el 2080 la distribución potencial de *N. auberi* decrecerá un 99.7%, presentando solo 15.46 km²; en tanto la extensión estimada de *N. dejecta* disminuirá en un 38.9%, teniendo una superficie estimada de 2,001km². En el 2080, las opuntias presentan una ganancia en el hábitat de 1-70%. Especies como *O. cantabrigiensis*, *O. engelmannii*, *O. hyptiacantha*, *O. joconostle*, *O. pachona*, *O. pubescens*, aumentan las distribuciones estimadas de 1-5%; los mayores incrementos en la superficie del hábitat climáticamente adecuado los presentan *O. heliabravoana*, *O. incarnadilla*, y *O. x andersonii* (50-70%). El mayor aumento se da en el área potencial de *O. x andersonii* (71.3%); *O. velutina* no ve incrementada su superficie estimada. Los porcentajes en la pérdida del hábitat varían de 1-95%. *O. atropes*, *O. phaeacantha* y *O. pumila* se reducen de 1-5%; *O. albicarpa*, *O. azurea*, *O. cantabrigiensis*, *O. engelmannii*, *O. fuliginosa*, *O. glaucescens*, *O. guilanchi*, *O.*



icterica, *O. joconostle*, *O. lasiacantha*, *O. megacantha*, *O. pachona*, *O. pachyrrhiza*, *O. pubescens*, *O. rastrera*, *O. robusta*, *O. scheeri*, *O. spinulifera*, *O. stenopetala*, *O. streptacantha* y *O. tomentosa* presentan porcentajes de reducción en su superficie del 50-95%. La mayor pérdida del hábitat la tiene *O. pachona* (95.3%) y la menor *O. nigrita* (0.0051%). La conservación del hábitat es de 1-97%. *O. cantabrigiensis*, *O. engelmannii*, *O. joconostle*, *O. pachona*, *O. pachyrrhiza* y *O. spinulifera* persisten de 1-5%; la superficie de *O. atropes*, *O. chavena*, *O. chlorotica*, *O. cochineria*, *O. cretochaetha*, *O. durangensis*, *O. hyptiacantha*, *O. leucotricha*, *O. lindheimeri*, *O. matudae*, *O. microdasys*, *O. nigrita*, *O. oligacantha*, *O. phaeacantha*, *O. pumila* y *O. velutina* persiste de 50-97%. La mayor persistencia o estabilidad del hábitat la tiene *O. pumila* (97.6%), en tanto que la menor persistencia la presenta *O. x andersonii* (0.08%).

La tendencia de las especies de *Opuntia* durante el 2050 es a la reducción de sus distribuciones potenciales (59%), en tanto que un 49% de las especies muestran una ganancia en el incremento del hábitat. En el 2050, el 9% del género mostro un incremento en su distribución estimada mayor al 50%. El 35% de las especies del grupo tuvieron una reducción mayor al 50% en las extensiones calculadas. En el 41% de las especies, la distribución potencial actual se conservó en más de un 50% hacia el 2050. Durante el 2080 el 63% de las especies disminuyen su extensión y un 37% la aumentan. Sólo el 7% de las opuntias aumentaron su distribución a más del 50%. La reducción en la distribución potencial de las especies mayor al 50% se dio en el 48% de las especies. La persistencia entre años al conservar sus áreas estimadas en más de un 50% fue para el 35% del grupo.



DISCUSIÓN

Los datos muestran una evidente variación en el número de localidades de colecta por especie, y el número de especies en una localidad, las cuales presentan de 1 a 238 registros. Estos valores reflejan la abundancia de algunas especies en una misma localidad, la falta de colecta en algunos casos, y el valor de número de especies por localidad indica endemismo o distribución geográfica restringida. Algunos autores subrayan la necesidad de contar con más y mejor información para un modelado eficiente de la distribución potencial de las especies. Lindenmayer *et al.* (1996) y Peterson *et al.* (2000) sugieren el uso de un mínimo de 50 localidades con sus coordenadas geográficas bien determinadas para efectuar el análisis (Villaseñor & Téllez-Valdés, 2004). En el presente trabajo se utilizaron entre 1 y 238 localidades. Únicamente 12 de las 66 especies, cumplen las condiciones deseadas sugeridas, presentando más de 50 localidades (Cuadro 2, Anexo II). Desafortunadamente, este es el escenario para la mayoría de las especies de la flora de México. Debido a la escases de trabajos para documentar el área total que una especie ocupa (Villaseñor & Téllez-Valdés, 2004).

En cuanto a la información disponible sobre las especies de *Opuntia* en las Áreas Naturales Protegidas (ANP's), se cuenta con listados parciales e incompletos, los registros de nopales silvestre son escasos, y pocas especies se encuentran registradas en las trece ANP's de la Región Central de México (Cuadro 4, Fig. 4-9). Los mapas de modelos generados de distribución geográfica potencial actual, sirven de guía para dirigir el trabajo de campo hacia sitios específicos; donde, según el modelo, las especies podrían encontrarse, pero para las cuales todavía no existe una prueba de su presencia (Anexo II). De esta forma se podría estimar la diversidad de las ANP's, y ayudar en la planificación y diseño del sistema de Áreas Naturales Protegidas (Peterson *et al.*, 2000).

Las distribuciones potenciales de las especies de *Opuntia* y *Nopalea* abarcan regiones donde aun no han sido registradas. Un alto porcentaje de reducción en las áreas potenciales estimadas bajo efectos de cambio climático, ubica a las especies de *Nopalea* en peligro dentro de la RCM. El área potencial actual de distribución de *Opuntia* se ubica a lo largo del Altiplano, donde dominan comunidades vegetales características de ambientes xerófilos. La distribución generada, concuerda con algunos patrones de regionalización propuestos para el territorio mexicano, tal es el caso de las ecorregiones, las provincias florísticas y las provincias fisiográficas. El área estimada para *Opuntia* abarca las ecorregiones de los matorrales xerófilos del norte y sur de la Meseta Central, las selvas secas del bajío y los bosques de coníferas y encinos de la Sierra Madre Oriental. (De igual forma se distribuye en las provincias florísticas de la Altiplanicie y la Sierra Madre Oriental. La distribución del



género en las provincias fisiográficas abarca las Sierras y Llanuras Occidentales, Sierras y Llanuras de Aldama y Río Grande, Llanuras y Sierras Potosino-Zacatecanas, Sierras y Llanuras del norte de Guanajuato, Bajío Guanajuatense, Karst Huasteco y las Llanuras y Sierras de Querétaro e Hidalgo.

La tendencia general para las especies del género *Nopalea* y *Opuntia*, es hacia la reducción de su hábitat (Anexo II, Mapas 1-16). Sin embargo, se predice un porcentaje importante en el incremento del nuevo hábitat adecuado derivado de las alteraciones del cambio climático). El género *Nopalea* presenta valores pequeños en su distribución geográfica potencial actual. Estos resultados pueden deberse a la pequeña cantidad de información con que se contaba de este género dentro de la Región Central de México. Bajo los efectos de cambio climático al año 2050, más del 59% de las especies del género *Opuntia* reducirán su hábitat, en tanto para el escenario de cambio climático 2080, 63% de las especies disminuirán su distribución.

Al año 2050 especies como *O. heliabravoana*, *O. incarnadilla*, *O. stricta* y *O. x andersonii* incrementaran (50-60%) su distribución potencial, registrando una evolución del hábitat; *O. joconostle* presenta la mayor pérdida de hábitat (84%), lo que la convierte en una especie en riesgo; la mayor conservación del hábitat o persistencia (50-98%) ante los efectos de cambio climático la muestran *O. atropes*, *O. chavena*, *O. chlorotica*, *O. cochineria*, *O. cretochaetha*, *O. durangensis*, *O. hyptiacantha*, *O. lasiacantha*, *O. leucotricha*, *O. lindheimeri*, *O. matudae*, *O. megacantha*, *O. nigrita*, *O. oligacantha*, *O. pachona*, *O. pubescens*, *O. pumila*, *O. velutina* y *O. zamudioi* (Anexo II: Mapas: 6, 7, 8 y 16); la tasa más alta de persistencia la obtuvo *O. pumila*, es decir, se espera que esta especie vea mitigados los efectos del cambio climático en su distribución geográfica potencial. La menor conservación de hábitat fue de *O. albicarpa*, lo que indica que el nicho en el caso de esta especie no se mantendrá estable, punto sobre el cual se debe poner especial atención al ser un nopal de importancia comercial al ser el productor de la tuna blanca.

Para el horizonte de tiempo 2080, los mayores incrementos en la superficie los presentaran *O. heliabravoana*, *O. incarnadilla*, y *O. x andersonii* (50-70%) (Anexo II: Mapa 15). El mayor aumento se da en el área potencial de *O. x andersonii* (71.3%); *O. albicarpa*, *O. azurea*, *O. cantabrigiensis*, *O. engelmannii*, *O. fuliginosa*, *O. glaucescens*, *O. guilanchi*, *O. ictérica*, *O. joconostle*, *O. lasiacantha*, *O. megacantha*, *O. pachona*, *O. pachyrrhiza*, *O. pubescens*, *O. rastrera*, *O. robusta*, *O. scheeri*, *O. spinulifera*, *O. stenopetala*, *O. streptacantha* y *O. tomentosa* tiene importantes porcentajes de reducción en su superficie (50-95%)(Anexo II: Mapas 4, 5, 10 11, 13). La mayor reducción es para *O. pachona* (95.3%). *O. atropes*, *O. chavena*, *O. chlorotica*, *O. cochineria*, *O. cretochaetha*, *O. durangensis*, *O. hyptiacantha*, *O. leucotricha*, *O.*



lindheimeri, *O. matudae*, *O. microdasys*, *O. nigrita*, *O. oligacantha*, *O. phaeacantha*, *O. pumila* y *O. velutina* (Anexo: Mapas 6 y 8), conservaran su distribución geográfica potencial (50-97%). La menor persistencia la presenta *O. x andersonii* (0.08%), especie que con el escenario de cambio climático al 2050 fue beneficiada con un aumento de hábitat potencial, sin embargo para el 2080, las condiciones climáticas dejaran de ser idóneas para su presencia (Cuadro 8).

Las alteraciones en los valores de las variables bioclimáticas que determinan la presencia de las especies de nopales bajo efecto de cambio climático, podrían afectar las condiciones de floración y fructificación, alterando la producción floral o la calidad de los frutos debido a las condiciones extremas de aridez que podrían suscitarse. Lo cual puede ser una amenaza tanto para la riqueza genética de *Opuntia* como al sector productivo de tuna y nopal verdura.

Algunas de las áreas potenciales no tienen cubierta vegetal o tienen cubierta vegetal secundaria (perturbada en distintos grados). México experimenta un rápido proceso de cambio en la cubierta vegetal y uso de suelo, sin embargo, a pesar de su importancia no se cuentan con estadísticas precisas. La estimación sobre la tasa de deforestación oscila entre 365,000 a más de 1,500,000 hectáreas por año (Mas *et al.*, 2003). Con la devastación de la vegetación y el rápido crecimiento urbano, las posibles áreas de aumento estimadas para los nopales, podrían no estar disponibles. La acción humana se convierte en una limitante elemental para la existencia de la vegetación natural y de sus especies, por lo que es importante considerarlo dentro de la evaluación de cambio climático. Bajo este escenario, es necesario una evaluación en las zonas semiáridas del país de la fragmentación y pérdida de hábitat, la tasa de deforestación, la recuperación natural de cubierta vegetal y la evaluación de la eficacia de áreas protegidas para el resguardo de la biodiversidad de nopales.

Estudios recientes han demostrado una variabilidad significativa en las predicciones de los modelos y existe una necesidad urgente para validarlos y reducir incertidumbres. La validación es problemática, ya que las predicciones se hacen para eventos que todavía no han ocurrido. La substitución y participación de datos son comunes para probar la eficacia predictiva de los modelos. Sin embargo, estos enfoques sufren problemas de autocorrelación espacial y temporal en la calibración y validación (Araújo *et al.*, 2005). Los modelos aquí generados deben considerarse un aproximación al conocimiento de la distribución potencial de los organismos, en el hipotético caso de que los factores capaces de restringir el rango de distribución no operasen (factores históricos, interacciones bióticas o limitantes de dispersión). Las distribuciones potenciales que se presentan en este estudio deberían considerarse como una hipótesis de las tendencias de la distribución de estas especies, debido a que



los modelos bioclimáticos propuestos sufren además errores de omisión (no consideran el espacio que la especie debería estar ocupando) y de comisión (consideran un espacio que en realidad la especie no ocupa o no debe ocupar) (Peterson & Vieglais, 2001).

La aplicación de los modelos de cambio climático proporciona información muy valiosa en relación con la vulnerabilidad de los ecosistemas ante el impacto en el clima del incremento en las concentraciones de CO₂ atmosférico. El modelo aplicado resalta las especies más sensibles y las áreas geográficas que podrían ser mayormente afectadas por los cambios. Sin embargo, el desarrollo de proyectos que permitan evaluar las posibles alteraciones, desacoplos ecosistémicos y las nuevas interacciones, entre los integrantes de zonas semiáridas serán de gran importancia para entender las posibles alteraciones entre las distintas relaciones interespecíficas. Ejemplo de lo anterior es la fauna asociada a este grupo vegetal, sin los polinizadores y dispersores la riqueza genética de los nopales se encontraría en peligro, por lo que es de importancia el desarrollo de estudios enfocados hacia esta dirección, para discernir los posibles efectos del cambio climático sobre dichos organismos. Así, la migración de especies puede limitar drásticamente la expansión ya que depende del éxito de la fecundidad, la dispersión, y el crecimiento, los cuales dependen del clima, el uso del suelo y de las interacciones bióticas.

Las especies que ocupan hábitats especializados por definición, son más susceptibles a los cambios en sus hábitats, por lo que se pierde una importante proporción de sus distribuciones actuales y hay poca ganancia de nuevos hábitats potenciales. Las especies de poca tolerancia en el gradiente de temperatura, son más susceptibles al cambio, y tienen un pequeño nicho ecológico. Por lo tanto, podrían considerarse como especialmente sensibles al cambio climático. Las especies que encuentran una gama más amplia de las condiciones climáticas en toda su área, tendrán más amplia tolerancia al cambio climático que las especies restringidas. La temperatura es un factor clave en la distribución de las especies, lo cual indica que las especies de *Opuntia* pueden responder de forma favorable al calentamiento global, al estar adaptadas a la vida de ambientes áridos. A pesar de que se estima que los ambientes secos se verán beneficiados con las alteraciones climáticas (Gómez-Díaz et al., 2007), y que los ecosistemas menos afectados serán bosques templados y matorrales xerófilos, con esta visión no es posible cuantificar de que manera las especies que componen estas comunidades vegetales se verán afectadas, debido a que las respuestas al cambio climático serán específicas por especie y relacionadas con su afinidad climática (Gómez-Mendoza & Arriaga (2007). Fischer et al. (2001), sostienen que cada especie tiene su propio perfil bioclimático, por lo que el análisis de las



variables que determinan dicho perfil puede servir para cuantificar las diferencias en los dominios climáticos que tienen diferentes especies. Lo anterior queda demostrado en el presente trabajo, donde las especies de *Opuntia* ante condiciones climáticas bajo efectos de cambio climático, se comportan de manera distinta. Algunas expanden su hábitat, otras ven reducida su distribución geográfica y algunas mantienen parte de su hábitat estable. Debido a lo anterior, es necesario desarrollarlo investigaciones a nivel específico, como la presente, para percibir las diferencias en los dominios climáticos entre las especies, aun cuando pertenezcan a un mismo género.

El éxito de los modelos depende en parte de las especies y sus características de distribución, en particular sobre la distribución y la extensión de la zona de estudio.

CONCLUSIONES

1. Las zonas áridas y semiáridas se verán beneficiadas con el cambio climático, expandiendo sus extensiones, sin embargo, la mancha urbana podría tener considerables consecuencias sobre la transformación en el hábitat.
2. El cambio en la distribución de las especies que predicen los modelos, implica que los nopales deberían tener la capacidad de respuesta para adaptarse o migrar en un tiempo menor del que normalmente requieren estos procesos, lo cual es poco probable. La capacidad de adaptación se verá afectada por el estado de conservación de la vegetación y por factores de deforestación.
3. Debido a su complejidad, los sistemas naturales no permiten una adecuada modelación de la distribución geográfica de las especies, principalmente por su incapacidad para explicar las interacciones bióticas, el cambio evolutivo y la dispersión ocasionando errores en la predicción.
4. Las investigaciones a nivel específico, podrán ayudar a percibir las diferencias en los dominios climáticos entre las especies, aun cuando pertenezcan a un mismo género.
5. Es necesario dirigir estudios que actualicen las listas de especies presentes y su abundancia dentro de las ANP's, ya que esta información será clave en las estrategias de conservación ante el cambio climático.
6. Se debe enfatizar la protección de las áreas naturales donde se presentan grandes e importantes centros de diversidad de nopales, que actualmente no cuentan con protección ante el cambio acelerado de uso de suelo y el crecimiento urbano.
7. La identificación de las regiones con alto número de especies, permitirá la planificación para la conservación. El nivel de protección en el caso de San Luis Potosí, requiere una detallada revisión y la estructuración de ANP's que beneficien a la conservación de especies de *Opuntia* y cactáceas en general. En esta entidad, la mayoría de áreas protegidas se encuentran a un nivel estatal cuando los esfuerzos deberían de ser a nivel nacional, debido a la gran riqueza que presentan.
8. Las anomalías climáticas en la RMC deben ser consideradas por los grandes productoras de nopal verdura y tuna, pues es muy probable que ante efectos de cambio climático los procesos fenológicos vean afectados sus tiempos. La sensibilidad de una especie dada depende de su distribución geográfica y las propiedades del nicho ecológico



9. No se debe olvidar que los análisis realizados dependen fundamentalmente del modelo del nicho ecológico como limitante para establecer la distribución geográfica potencial de las especies. Las proyecciones de los posibles hábitats climáticamente adecuados también están fuertemente ligadas a la resolución del análisis bioclimático.
10. Las proyecciones no capturan la gama de interacciones entre el medio ambiente y las especies para describir con precisión sus nichos ecológicos.
11. A la incertidumbre de los modelos de distribución potencial, se debe sumar la incertidumbre de las proyecciones a futuro.
12. El no contar con estimaciones del grado en que las interacciones bióticas pueden limitar la distribución de las especies, puede llevar a sobreestimar las distribuciones potenciales actuales y por tanto alterar las proyecciones a futuro.



LITERATURA CONSULTADA

- Alcantar L. G. 2001. La entropía como medida de incertidumbre de Modelos de distribución de especies. Tesis Licenciatura. FES Iztacala, UNAM.
- Anderson R. P., Lew, D. & A. T. Peterson. 2003. Evaluating predictive models of species distributions: Criteria for selecting optimal models. *Ecological Modelling*, 162:211-232.
- Araújo M., Pearson R., Thuiller W. & M. Erhard. 2005. Validation of species-climate impact models under climate change. *Global Change Biology*, 11: 1504-1513.
- Arriaga L. & L. Gómez, 2004. Posibles efectos del cambio climático en algunos componentes de la biodiversidad de México. En Martínez, J. y A. Fernández Bremauntz (comps.), *Cambio Climático: una visión desde México*. Instituto Nacional de Ecología y Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, México, p. 255-265.
- Ayala R. J. 2006. Evaluación del papel del clima en la distribución potencial de las especies de la familia Cactaceae, en la Reserva de la Biosfera Tehuacán-Cuicatlán, para proponer estrategias de conservación a largo plazo. Tesis Maestría. FES-Iztacala. UNAM. México, D. F.
- Bakkenes M., Alkemade, R. M., Ihle E., Leemans R. & B. Latour. 2002. Assessing effects of forecasted climate change on the diversity and distribution of European higher plants for 2050. *Global Change Biology* 8: 390-407.
- Baldwin R. A. 2009. Use of Maximum Entropy Modeling in Wildlife Research. *Entropy* (11): 854-866.
- Baldwin R. B. & L. C. Bender. 2008. Densite characteristics of black bears in Rocky Mountain National Park, Colorado. *J. Wildl. Manag.* 72, 1717-1724.
- Barbera G. 1995. History, economic and agro-ecological importance, pp. 1-11. In G. Barbera, P. Inglese, & E. Pimienta-Barrios (eds.). *Agro-ecology, cultivation and uses of cactus pear*. FAO Plant Production and Protection paper 132. Rome, Italy.
- Böhning-Gaese K. Schuda M. D. & A. J. Helbing. 2003. Weak phylogenetic effects on ecological niches of *Sylvia warblers*. *J. Evol. Biol.* 16:956-65.
- Bravo, H. 1978. Las Cactáceas de México. Vol I. Universidad Nacional Autónoma de México, Mexico.
- Bravo H. & L. Scheinvar. 1995. El interesante mundo de las cactáceas. Fondo de Cultura Económica. México, D. F.
- Britton N. L. & J. N. Rose. 1919. The Cactaceae. Vol I. Carnegie Institution of Washington, D. C.
- Broennimann O. Thuiller W., Hughe G., Midgley G. F., R. J. M., Alkemade S and A. Guisan. 2006. Do geographic distribution, niche property and life form explain plants' vulnerability to global change?. *Global Change Biology*, 12: 1079-1093.
- Brown J. H., & M. V. Lomolino. 1998. Biogeography. Sinauer Associates.
- Chase J. M and M. A. Leibold. 2003. Ecological Niches: Linking Classical and Contemporary Approaches. University of Chicago Press, Chicago, IL.
- Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (CONABIO). 1998. "Curvas de nivel para la República Mexicana". Escala 1:250000. Extraído del Modelo Digital del Terreno. Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEG). México.
- Engler R., Guisan A., Rechsteiner L. 2004. An improved approach for predicting the distribution of rare and endangered



- species from occurrence and pseudo-absence data. *J. Appl. Ecol.* 41: 263–274.
- Farber, O. & R. Kadmon. 2003. Assessment of alternative approaches for bioclimatic modeling with special emphasis on the Mahalanobis distance. *Ecological Modelling* 160 (1-2): 115-130.
- Fielding, A. H. & J. F. Bell. 1997. A review of methods for the assessment of prediction errors in conservation presence/absence models. *Environ. Conserv.* 24: 38–49.
- Flores Valdez C. A., Esquivel J. M. & P. P. Ramírez. 1995. Mercado Mundial de la tuna. Chapingo, México.
- González Durán A., Riojas López M. E. & H. J. Arreola Nava. 2001. *El Género Opuntia en Jalisco*. Universidad de Guadalajara, CONABIO. México.
- Gómez-Díaz J. D., Monterroso-Rivas A. I., Tinoco-Rueda J. A. & J. López-García. 2007. Comportamiento de la vegetación bajo escenarios de cambio climático en la Reserva de la Biosfera Barranca de Metztitlán, Hidalgo, México. *Zonas Áridas* 11(1): 61-69.
- Gómez-Hinostrosa, C. & H. M. Hernández. 2000. Diversity, geographical distribution, and conservation of Cactaceae in the Mier y Noriega region, Mexico. *Biodivers. Conserv.*, 9:403–418.
- Gómez-Mendoza L. & L. Arriaga. 2007. Modeling the effect of climate change on the distribution of oak and pin species of Mexico. *Conservation Biology*, 21(6):1545-1555.
- Guzmán U., Arias S. & P. Dávila. 2003. *Catálogo de Cactáceas Mexicanas*. Universidad Nacional Autónoma de México. México D. F.
- Graham, C. H., Ron S. R., Santos J. C. Schneider C. J. & C. Moritz. 2004. Integrating phylogenetics and environmental niche models to explore speciation mechanisms in dendrobatid frogs. *Evolution*, 58:1781-1793.
- Graham R. W. & the Faunmap Working Group. 1996. Spatial response of mammals to late - Quaternary environmental fluctuations. *Science* 272:1601-1606.
- Granados ,S. D. & A. Castañeda. 1991. El nopal. Historia, fisiología e importancia frutícola. Ed. Trillas. México. D. F.
- Guisan, A. & N. E. Zimmermann. 2000. Predictive habitat distribution models in ecology. *Ecological Modelling*, 135:147-186.
- Hernández, H. M., Goettsch B., Gómez-Hinostrosa C. & H. T. Arita. 2008. Cactus species turnover and diversity along a latitudinal transect in the Chihuahuan Desert Region. *Biodivers. Conserv.*, 17:703-720.
- Hernández, H. M. & H. Godínez. 1994. Contribución al conocimiento de las cactáceas mexicanas amenazadas. *Acta Botánica Mexicana*, 26:33-52.
- Hernández, H. M. & C. Gómez-Hinostrosa. 2005. Cactus diversity and endemism in the Chihuahuan Desert Region. In: Cartron JL, Felger R, Ceballos G (eds) Biodiversity and conservation in Northern Mexico. Oxford University Press, New York, USA, pp 264–275.
- Hernández, H. M., Gómez-Hinostrosa C. & B. Goettsch. 2004. Checklist of Chihuahuan Desert Cactaceae. Harvard. *Papers Bot*, 9:51–68.
- Hernández, H. M., Gómez-Hinostrosa C. & R. T. Bárcenas. 2002. Studies on Mexican Cactaceae. III. A new hybrid in the Genus *Opuntia*. *Haseltonia*, 9:62-68.
- Hernández, H. M., Gómez-Hinostrosa C. & R. T. Bárcenas. 2001a. Diversity, spatial arrangement, and endemism of Cactaceae in the Huizache area, a hot-spot in the Chihuahuan Desert. *Biodivers. Conserv.*, 10:1097–1112.
- Hernández, H. M. & R. T. Bárcenas. 1996. Endangered cacti in the Chihuahuan Desert. II. Biogeography and conservation. *Conserv. Biol.*, 10:1200–



- 1209.
- Hernández, H. M. & , R. T. Bárcenas. 1995. Endangered cacti in the Chihuahuan Desert. I. Distribution patterns. *Conserv. Biol.*, 9:1176-1190.
- Holmgren, M., Scheffer M., Ezcurra E., Gutiérrez J. R. & G. M. J. Mohren. 2001. El Niño effects on the dynamics of terrestrial ecosystems. *TRENDS in Ecology & Evolution*, 16(2):89-94.
- Hughes J. B., Dally G. C., & P. R. Ehrlich. 2000. Conservation of insect diversity: a hábitat approach. *Conservation Biology* 23:1788-1797.
- Huntley B., Berry P. M., Cramer W. & A. P. McDonald. 1995. Modelling present and potential future ranges of some European higher plants using climate response. *Journal of Biogeography* 22: 967-1001.
- IPCC. 2007. Informe especial del grupo de trabajo III del IPCC. Escenarios de Emisiones. Resumen para responsables de Políticas. Grupo Intergubernamental de Expertos sobre Cambio Climático.
- IPCC. 1997. Introducción a los modelos climáticos simples utilizados en el Segundo Informe de Evaluación del IPCC. Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático.
- Johns T. C., Durman C. F., Banks H. T., Roberts M. J., McLaren A. J., Ridley J. K., Senior C. A., Williams K. D., Jones A., Rickard G. J., Cusack S., Ingram W. J., Crucifix M., Sexton D. M., Joshi M.M., Dong B. W., Spencer H., Hill R. S., Gregory J. M., Keen A. B., Pardaens A. K., Lowe J. A., Bodas-Salcedo A., Stark S. & Y. Searl. 2006. The New Hadley Centre Climate Model (HadGEM1): Evaluation of Coupled Simulations. *Journal of Climate* 19: 1327-1353.
- Johns T., Durman C., Banks H., Roberts M., McLaren A., Ridley J., Senior C., Williams K., Jones A., Keen A., Rickard G., Cusack S., Joshi M., Ringer M., Dong B., Spencer H., Hill R., Gregory J., Pardaens A., Lowe J., Bodas-Salcedo A., Stark S. & Y. Searl. 2004. HadGEM1-Model description and analysis of preliminary experiments for the IPCC Fourth Assessment Report. Hadley Centre Technical Note No. 55.
- Johnson D. M. & P. D. Stiling. 1998. Distribution and dispersal of *Cactoblastis cactorum* (Lepidoptera: Pyralidae), an exotic *Opuntia*-feeding moth, in Florida. *Florida entomol.* 81: 12-22.
- Joseph L. & D. Stockwell. 2002. Climatic modeling of the distribution of some *Pyrrhura* parakeets of northwestern South America with notes on their systematics and special reference to *Pyrrhura caeruleiceps* Todd, 1947. *Ornitología Neotropical* 13: 1-8.
- Leibold, M. A. & P. Geddes. 2005. El concepto de nicho en las metacomunidades. *Ecología Austral* 15:117- 129.
- Lindenmayer, D. B., Mackey B. G. & H. A. Nix. 1996. The bioclimatic domains of four species of commercially important eucalypts from south-eastern *Australia*. *Australian Forestry* 59: 74-89.
- Losos J. B., Leal M. Glor R. E. de Queiroz K. & P. E. Hertz. 2003. Niche lability in the evolution of a Caribbean lizard community. *Nature*, 424:542-550.
- Magaña, Rueda V. O. 2004. El cambio climático global: Comprender el problema, en Martínez J. & A. Fernández (coord.), Cambio climático: una visión desde México, INE-SEMARNAT.
- 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., Peterson T. A. And W. W. Hargrove§. 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.
- Mas J., Velázquez A., Reyes J., Mayorga R., Alcántara C., Castro R., Fernández T. and A. Pérez. 2003. Assessing land use/cover Changes in México: a wall-to-wall multirate GIS Database. *SEMARNAT*, 3359-3361.
- Millennium Ecosystems Assessment, 2005. Ecosystems and Human Well-Being: Synthesis. Island Press, Washington, D.C., E.U.A. <http://www.millenniumassessment.org/proxy/document440.aspx>
- Monterroso-Rivas, A., Conde-Álvarez, & A., Gómez-Díaz. 2007. Vulnerabilidad y riesgo en agricultura por cambio climático en la región centro del estado de Veracruz, México. *Zonas Áridas*, 11:47-60.
- Moreno R. A. & J. U. Soria. 2008. Impactos sociales del cambio climático en México. 1^{ra} ed. INE-PNUD.
- Nobel, P. 1998. Los incomparables Agaves y Cactus. Ed. Trillas. México.
- Nobel, S. P. 1982. Low temperature tolerance and cold hardening of cacti. *Ecology*, 63(6): 219-224.
- Olivares O. J., Zavaleta B. P., Chimal H. A., Montiel S. D., Fierro A. A. & L. Scheinvar. 2003. Xoconostle Biología y manejo agronómico. UAM. Unidad Xochimilco. México. D. F.
- Parmesan, C. 2006. Ecological and evolutionary responses to recent climate change. *Annual Reviews of Ecology, Evolution, and Systematics* 37:637-669.
- Pearman, P. B., Guisan A. Broennimann O. & C. F. 2007. Randin. Niche dynamics in space and time. *Trends in Ecology and Evolution*, 23(3): 149-158.
- Pearce J. & S. Ferrier. 2000. Evaluating the predictive performance of habitat models developed using logistic regression. *Ecological Modelling* 133, 225-245.
- Pérez-Sandi, M. 2001. Addressing the threat of *Cactoblastis cactorum* (Lepidoptera: Piralidae), to *Opuntia* in Mexico. *Florida Entomologist* 84(4): 499-522.
- Peterson, A. T. 2003. Predicting the geography of species invasions via ecological niche modeling *Q. Rev. Biol.* 78:419-33.
- Peterson, A.T. & D. A.. Kluza. 2003. New distributional modeling approaches for gap analysis. *Anim. Conserv.* 6: 47-54.
- Peterson, A.T. & C.R. Robins. 2003. Using ecological-niche modeling to predict barred owl invasions with implications for spotted owl conservation. *Conserv. Biol.* 17: 1161-1165.
- Peterson, A.T., Shaw, J., 2003. *Lutzomyia* vectors for cutaneous leishmaniasis in southern Brazil: ecological niche models, predicted geographic distribution, and climate change effects. *Int. J. Parasitol.* 33: 919-931.
- Peterson, A. T., Ortega-Huerta, M.A., Bartley, J., Sánchez-Cordero V., Soberón, J., Buddemeier, R. H., and D. R. Stockwell. 2002. Future projections for Mexican faunas under global climate change scenarios. *Nature*, 416:626-629.
- Peterson, A. T., Sánchez-Cordero, V., Soberón, J., Bartley, J., Buddemeier, R. W. , and A. G. Navarro-Sigüenza. 2001. Effects of global climate change on geographic distributions of Mexican Cracide. *Ecological Modelling*, 144:21-30.
- Peterson, A. T., Egbert S. L., Sánchez-Cordero V. & K. P. Price. 2000. Geographic analysis of conservation priority: endemic mammals in Veracruz, Mexico. *Biological Conservation*, 93:85-94.
- Peterson, A.T., Soberón, J. & V. Sánchez-Cordero. 1999. Conservatism of ecological niches in evolutionary time. *Science*, 285:1265-1267.
- Peterson A. T & D. A. Vieglais. 2001. Predicting species invasions using ecological niche modeling: new approaches from



- bioinformatics attack a pressing problem. *Bioscience* 51: 363-71.
- Phillips, S.J. A brief tutorial on Maxent, versions: 3.3.1. Available online: <http://www.cs.princeton.edu/~schapire/maxent/> (accessed on August 19, 2009).
- Phillips, S.J.; Dudík, M. 2008. Modeling of species distributions with Maxent: New extensions and a comprehensive evaluation. *Ecography* 31, 161-175.
- Phillips, S. J., Anderson, R. P., and R. E. Schapire. 2006. Maximum entropy modelling of species geographic distributions. *Ecological Modelling*, 190: 231-259.
- Phillips, S. J., Anderson, R. P., and R. E. Schapire. A Maximum Entropy approach to species distribution modeling. Appearing in *Proceedings of the 21st International Conference on Machine Learning*, Banff, Canada, 2004. Copyright 2004 by the authors.
- Pimienta, B. E. 1990. El nopal tunero. Universidad de Guadalajara, Guadalajara, Jalisco.
- Quintero G. L. 1972. Las cactáceas subfósiles de Tehuacán, Puebla. *Cact. Suc. Mex.* 17 (1): 3-15.
- Prinzing A., Durka W., Klotz S. & R. 2001. Brand. The niche of higher plants: evidence for phylogenetic conservatism. *Proc. R. Soc. Lond. B*, 268: 2383-2389.
- Ricklefs, R. E & R. E. Latham. 1992. Intercontinental correlation of geographical ranges suggests stasis in ecological traits of relict genera of temperate perennial herbs. *Am. Nat.*, 139:1305-1321.
- Rzedowski, J. 1991. Diversidad y Orígenes de la flora fanerogámica de México. *Acta Botánica Mexicana* 14: 3-21.
- Rzedowski, J. 1971. Vegetación de México. Limusa. México.
- Scheinvar L. 2004. Flora Cactológica del Estado de Querétaro: Diversidad y riqueza. Fondo de Cultura Económica. México.
- Sergio C., Figueira R., Draper D., Menezes R. & A. Sousa. 2007. Modelling bryophyte distribution base don ecological information for extent of occurrence assessment. *Biological Conservation* 135:341-351.
- Swihart R.K, Gehring T.M., Kolozsvary M.B & T. E. Nupp. 2003 Responses of resistant vertebrates to habitat loss and fragmentation: the importance of niche breadth and range boundaries. *Divers. Distrib* 9: 1-18.
- Soberón, J. and A. T. Peterson. 2005. Interpretation of models of fundamental ecological niches and specie's distributional areas. *Biodiversity Informatics* 2:1-10
- Soberón, J., Golubov, J. and J. Sarukhán. 2001. The impotance of *Opuntia* in Mexico and routes of invasion and impact of *cactoblastis cactorum* (Lepidoptera:Pyralidae). *Florida Entomologist*, 84(4):486-492.
- Stockwell, C. A., Hendry A. P. & M. T. Kinnison. 2003. Contemporary evolution meets conservation biology. *Trends Ecol. Evol.*, 18:94-101.
- Stockwell, D. & D. Peters. 1999. The GARP modeling systems: problems & solutions to automated spatial prediction. *Int. J. Geogr. Inf. Science.*, 13:143-158.
- Summers, J. K., Wilson, H. Y. & J. Kou. 1993. A method for quantifying the prediction uncertainties associated with wáter quality models. *Ecological Modelling* 65:161-176.
- Téllez-Valdés, O. & P. Dávila-Aranda. 2003. Protected areas and climate change: A case study of the cacti in the Tehuacán-Cuicatlán Biosphere Reserve, México. *Conser. Biol.*, 17: 846-853.
- Theurillat, J. & A. Guisan. 2000. Potential impact of climate change on vegetation in the European Alps: A review. *Climate*



- Change* 50 (1-2): 77-109.
- Thomas, C. D., Cameron A., Green R. E., Bakkenes M. & L. J. Beaumont. 2004. Extinction risk from climate change. *Nature*, 427:145-148.
- Thuiller, W. Lavorel S. & M. B. Araújo. 2005. Niche properties and geographical extent as predictors of species sensitivity to climate change. *Global Ecol. Biogeogr.*, 14: 347-357.
- Trotta M. N., Lobo J. M. & F. J. Cabrero. 2008. Distribución conocida y potencial de las especies de geotrupinae (Coleoptera:Scarabaeoidea) en México. *Acta Zoológica Mexicana (nueva serie)* 24(2):39-65.
- Vandermeer, J. 2008. The niche construction paradigm in ecological time. *Ecological modelling*, 214: 385-390.
- Vázquez A. A. 1981. El nopal. Instituto Nacional de Investigaciones Forestales-Comisión Nacional de Zonas Áridas. México.
- Velázquez, C. R. 1962. Aspectos ecológicos. Distribución y abundancia de *Opuntia streptacantha* y *O. leucotricha* en la región árida de Zacatecas y San Luis Potosí. Tesis Licenciatura. ENA. Chapingo, México.
- Villaseñor, J. L. & O. Téllez-Valdés. 2004. Distribución potencial de las especies del género *Jefea* (Asteraceae) en México. *Anales del Instituto de Biología, Universidad Nacional Autónoma de México, Serie Botánica*, 75(2): 205-220.
- Villers-Ruíz, L. e I. Trejo-Vázquez, 1995. Vegetación actual de México y escenario aplicando un incremento de 2°C en temperatura y disminución del 10% en la precipitación. En SEMARNAT-UNAM-US. México ante cambio climático. Segundo Taller de Estudio de País, México.
- Wiens J. J. & C. H. Graham. 2005. Niche CONservatism: Integrating evolution, ecology and conservation biology. *Reviews in Advance* 519-539.
- Williams, P., Hannah L., Andelamn S., Midgley G. & M. Araujo. 2005. Planning for Climate Change: Identifying Minimum-Dispersal Corridors for the Cape Proteaceae. 2004. *Conservation Biology* 19(4):1063-1074.
- Wollan A. K., Bakkerstuen V., Kauserud H., Gulden G. & R. Halvorsen. 2008. Modelling and predicting fungal distribution patterns using herbarium data. *Journal of Biogeography* 35:2298-2310.
- Yost, A.C.; Petersen, S.L.; Gregg, M.; Miller, R. Predictive modeling and mapping sage grouse (*Centrocercus urophasianus*) nesting habitat using Maximum Entropy and a long-term dataset from Southern Oregon. *Ecol. Inform.* 2008, 3, 375-386.
- Zimmermann H. G., Bloem S.&H. Klein. 2007. Biología, historia, amenaza, monitoreo y control de la palomilla del nopal, *Cactoblastis cactorum*. IAEA. Pp 96.



ANEXO I. Listado de Colectas de especies del género *Opuntia* Mill. y *Nopalea* Salm-Dyck presentes en la Región Central de México (Guanajuato, Hidalgo, Querétaro, San Luis Potosí).

No. de Colecta	Especie	Ejemplares Herborizados
TLAXCALA		
LS7203	<i>O. robusta</i> var. <i>robusta</i>	5
LS7204	<i>O. hyptiacantha</i>	5
LS7205	<i>O. robusta</i> var. <i>robusta</i>	6
LS7206	<i>O. streptacantha</i> var. <i>aguirrana</i>	2
LS7207	<i>O. megacantha</i>	2
LS7208	<i>O. oligacantha</i>	2
LS7209	<i>O. streptacantha</i>	2
LS7210	<i>O. cochineria</i>	2
LS7211	<i>O. tomentosa</i>	4
LS7212	<i>O. robusta</i> var. <i>larreyi</i>	4
LS7213	<i>O. tomentosa</i>	2
LS7214	<i>O. robusta</i> var. <i>guerrana</i>	4
LS7215	<i>O. streptacantha</i> var. <i>streptacantha</i>	2
LS7216	<i>O. streptacantha</i> var. <i>aguirrana</i>	2
LS7217	<i>O. robusta</i> var. <i>guerrana</i>	5
LS7218	<i>O. lasiacantha</i>	4
LS7219	<i>O. hyptiacantha</i>	4
LS7220	<i>O. cochineria</i>	4
LS7225	<i>O. megacantha</i>	2
LS7227	<i>O. robusta</i>	4
LS7228	<i>O. robusta</i>	1
LS7241	<i>O. hyptiacantha</i>	4
LS7242	<i>O. streptacantha</i> var. <i>aguirrana</i>	2
LS7243	<i>O. cochineria</i>	4
LS7281	<i>O. cochineria</i>	1
LS7284	<i>O. cochineria</i>	6
LS7288	<i>O. streptacantha</i> var. <i>aguirrana</i>	4
GUANAJUATO		
PP1	<i>O. cochineria</i>	4
PP2	<i>O. tomentosa</i>	4
PP3	<i>O. cuija</i>	4
PP4	<i>O. guilanchi</i>	4
PP5	<i>O. guilanchi</i>	4
PP6	<i>O. robusta</i>	4
PP7	<i>O. cochineria</i>	4
PP8	<i>O. pachona</i>	4
PP9	<i>O. engelmannii</i>	4



PP10	<i>O. streptacantha</i>	4
PP11	<i>O. icterica</i>	5
PP12	<i>O. guilanchi</i>	4
PP13	<i>O. tomentosa</i>	3
PP14	<i>O. matudae</i>	6
PP15	<i>O. leucotricha</i>	4
PP16	<i>O. tomentosa</i>	4
PP20	<i>O. elizondoana</i>	4
PP23	<i>O. elizondoana</i>	8
PP25	<i>O. ictérica</i>	3
PP27	<i>O. ictérica</i>	4
PP28	<i>O. atropes</i>	4
PP29	<i>O. ictérica</i>	4
PP30	<i>O. glaucescens</i>	4
PP31	<i>O. zamudioi</i>	4
PP32	<i>O. zamudio</i>	4
PP33	<i>O. robusta</i>	4
PP34	<i>O. robusta</i>	4
PP35	<i>O. fuliginosa</i>	4
PP36	<i>O. fuliginosa</i>	4
PP37	<i>O. robusta</i> var. <i>robusta</i>	4
PP38	<i>O. robusta</i> var. <i>robusta</i>	4
PP39	<i>O. streptacantha</i>	4
PP40	<i>O. streptacantha</i>	4
PP41	<i>O. robusta</i> var. <i>robusta</i>	6
PP42	<i>O. engelmanni</i>	7
PP43	<i>O. streptacantha</i>	8
PP44	<i>O. engelmannii</i>	8
PP45	<i>O. leucotricha</i>	4
PP47	<i>O. leucotricha</i>	4
PP48	<i>O. engelmannii</i>	6
PP49	<i>O. joconostle</i>	2
PP50	<i>O. megacantha</i>	4
PP53	<i>O. glaucescens</i>	5
PP54	<i>O. glaucescens</i>	4
PP58	<i>O. streptacantha</i>	2
PP65	<i>O. joconostle</i>	4
PP71	<i>O. robusta</i> var. <i>robusta</i>	4
PP73	<i>O. robusta</i> var. <i>robusta</i>	4
PP78	<i>O. leucotricha</i>	4
PP80	<i>O. engelmannii</i>	6



SAN LUIS POTOSÍ		
HA1724	<i>O. robusta</i>	4
HA1725	<i>O. guilanchi</i>	4
HA1726	<i>O. streptacantha</i>	4
HA1727	<i>O. glaucescens</i>	4
HA1728	<i>O. glaucescens</i>	4
HA1729	<i>O. macrorhiza</i>	4
HA1730	<i>O. cuija</i>	4
HA1731	<i>O. microdasys</i>	4
HA1733	<i>O. leucotricha</i>	4
HA1734	<i>O. azurea</i>	4
HA1735	<i>O. rastrera</i>	4
HA1736	<i>O. hyptiacantha</i>	4
HA1737	<i>O. engelmannii</i>	4
HA1738	<i>O. engelmannii</i>	4
HA1741	<i>O. robusta</i>	4
PP89	<i>O. streptacantha</i>	4
PP90	<i>O. rastrera</i>	6
PP99	<i>O. stenopetala</i>	4
PP103	<i>O. engelmannii</i>	4
PP105	<i>O. stenopetala</i>	4



ANEXO II

DISTRIBUCIÓN POTENCIAL BAJO EFECTOS DE CAMBIO CLIMÁTICO DE LAS ESPECIES DEL GÉNERO *NOPALEA* Y *OPUNTIA* DE LA REGIÓN CENTRAL DE MÉXICO

Nopalea SALM-DYCK, *Cact. Hort. Dyck.* 1849. 63. 1850

Arborescentes, con tronco cilíndrico bien definido, muy ramificado. Cladodios aplanados, largos y angostos, generalmente oblongos a veces obovados; hojas pequeñas subuladas o cilíndricas y caducas. Epidermis glabra. Aréolas reducidas, con fieltro, muy separadas entre sí. Glóquidas presentes. Espinas aciculares, subuladas, hasta de 4 cm de longitud, blancas, amarillas a rojizas, ausentes en algunas de las especies. Flores hacia el extremo superior; segmentos del perianto rosa a rojizos, erectos, inapertos; estambres numerosos y exertos, estilo más largo que los estambres, lóbulos del estigma verdes; pericarpelo tuberculado, aréolas con abundantes glóquidas, con o sin espinas. Frutos muy umbilicados. Semillas numerosas, aplanadas, con arilo grueso y testa con pequeños tricomas o pelos. Semejante al *Opuntia*, con la diferencia de que las flores en *Nopalea* presentan los estambres y estilo exertos.

Fenología

El periodo de floración es muy amplio, pero generalmente va de enero a mayo. Esto puede variar en cultivo.

Distribución

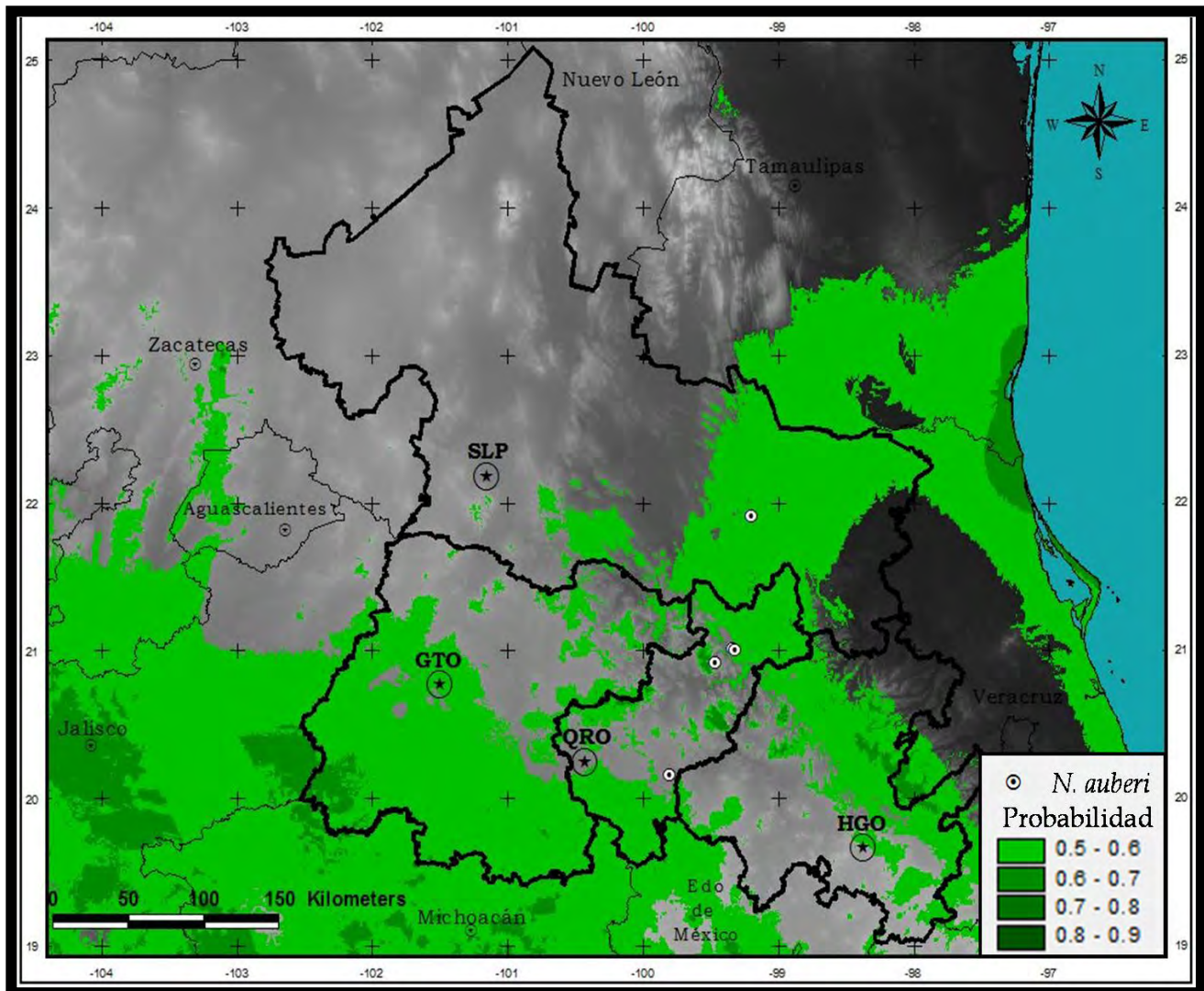
Género nativo de México y Guatemala, son llamados comúnmente “nopales”, al igual que *Opuntia*. Algunas de sus especies son cultivadas para el consumo de sus cladodios y frutos. Es un grupo de amplia distribución en el país; se han encontrado por toda la costa del Pacífico y del Golfo de México. Se tienen registradas para el país 10 especies (Bravo-Hollis, 1978).



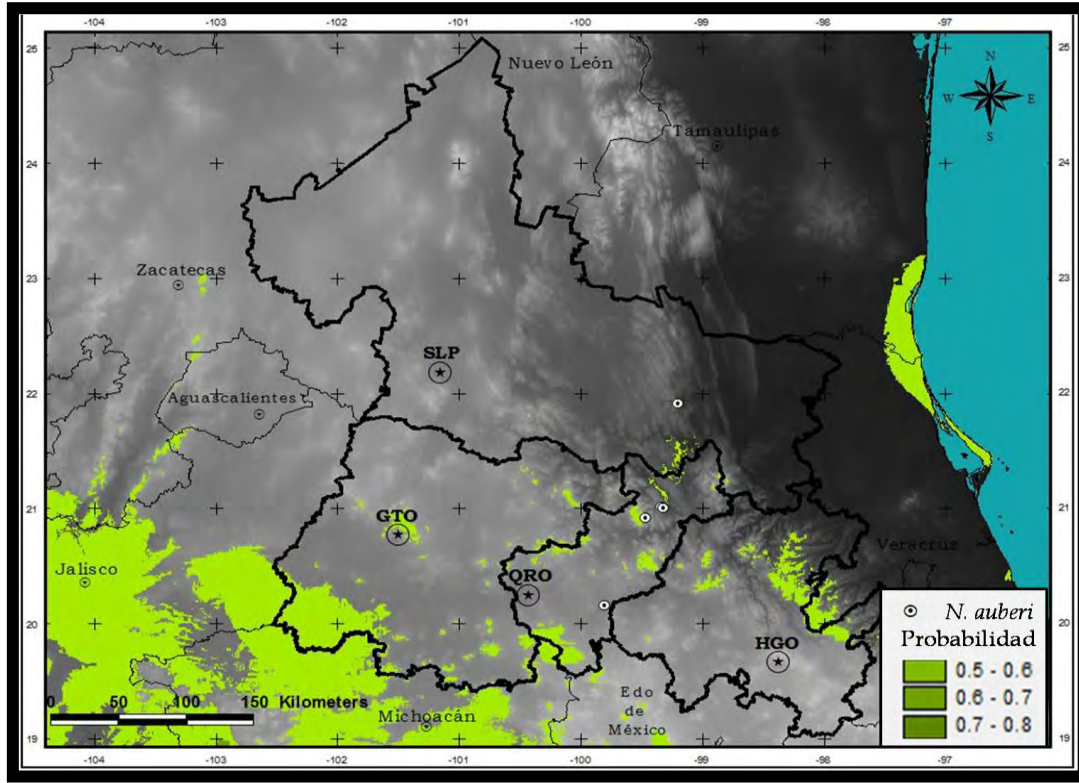
Nopalea auberi (PFEIFFER) SALM-DYCK, *Cactaceae in horto Dyckensis cultae anno 1849: 64, 233. 1850.*
Nopal de lengüita, lengua de vaca

Distribución

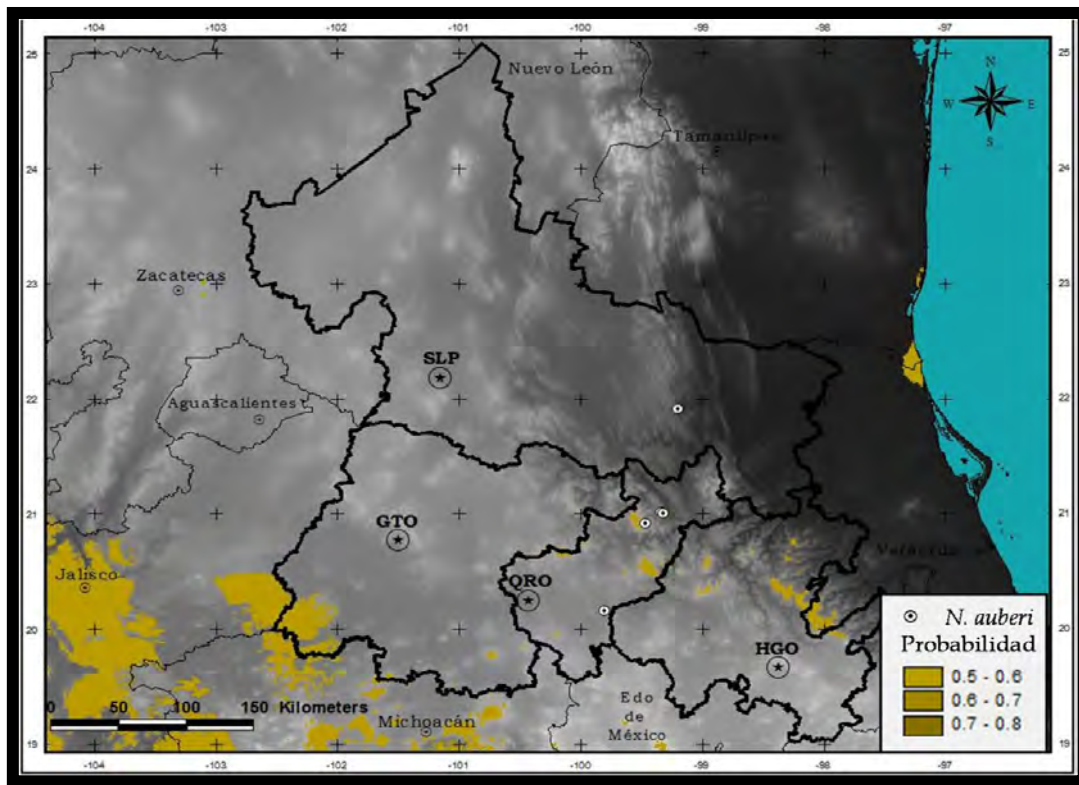
Centro y sur de México (González et al., 2001: 46). Se cultiva en varios lugares, es frecuente cerca de Mitla, Oaxaca; Bravo la colecto cerca de Totolapan, Oaxaca y en Cintalapa, Chiapas (Bravo, 1978: 347). Guzmán et al. (2003, 174), la reporta de igual forma para el estado de Guerrero. Crece en el matorral crasicaule, en bosque tropical caducifolio y bosque de niebla, a una altitud de 850-2 300 msnm.



Mapa 1a. Distribución Potencial Actual de *Nopalea auberi* en la RCM (5,686.22 km², AUC=0.898, Valor de Corte=0.586).



Mapa 1b. Distribución de *N. auberi* al año 2050 en la RCM estimada a partir del modelo HadGEM1 (138.58 km², AUC=0.898, Valor de Corte=0.586).



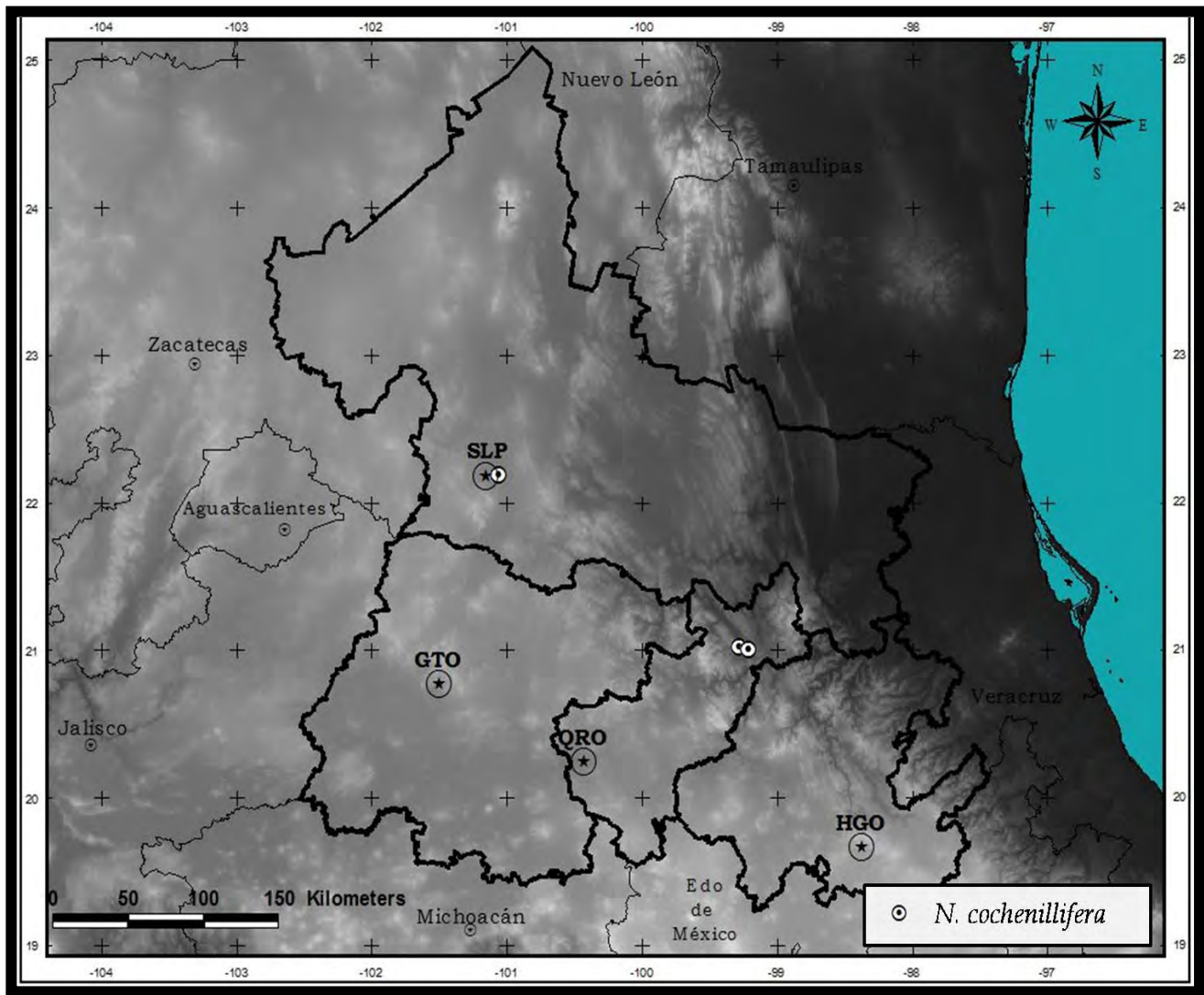
Mapa 1c. Distribución de *N. auberi* al año 2080 en la RCM estimada a partir del modelo HadGEM1 (15.46 km², AUC=0.898, Valor de Corte=0.586).

Nopalea cochenillifera* (LINNAEUS) SALM-DYCK, *Cactaceae in horto Dyckensi cultae anno 1849: 64. 1850.

Nopalnocheztli (Nauatl), *cactus de la grana cochinilla*

Distribución

Cultivada en América tropical. En México se encuentra cultivada en diversas poblaciones del Estado de Oaxaca, Bravo (1978: 345) la reporto silvestre en planicies cercanas a Tehuantepec formando parte de la selva caducifolia. Crece en matorral xerófilo crasicaule, bosque tropical caducifolio, bosque de niebla, bosques de juníperos, y pino-encino (Scheinvar, 2004: 74).



Mapa 2. Distribución conocida de *Nopalea cochenillifera* en la RCM

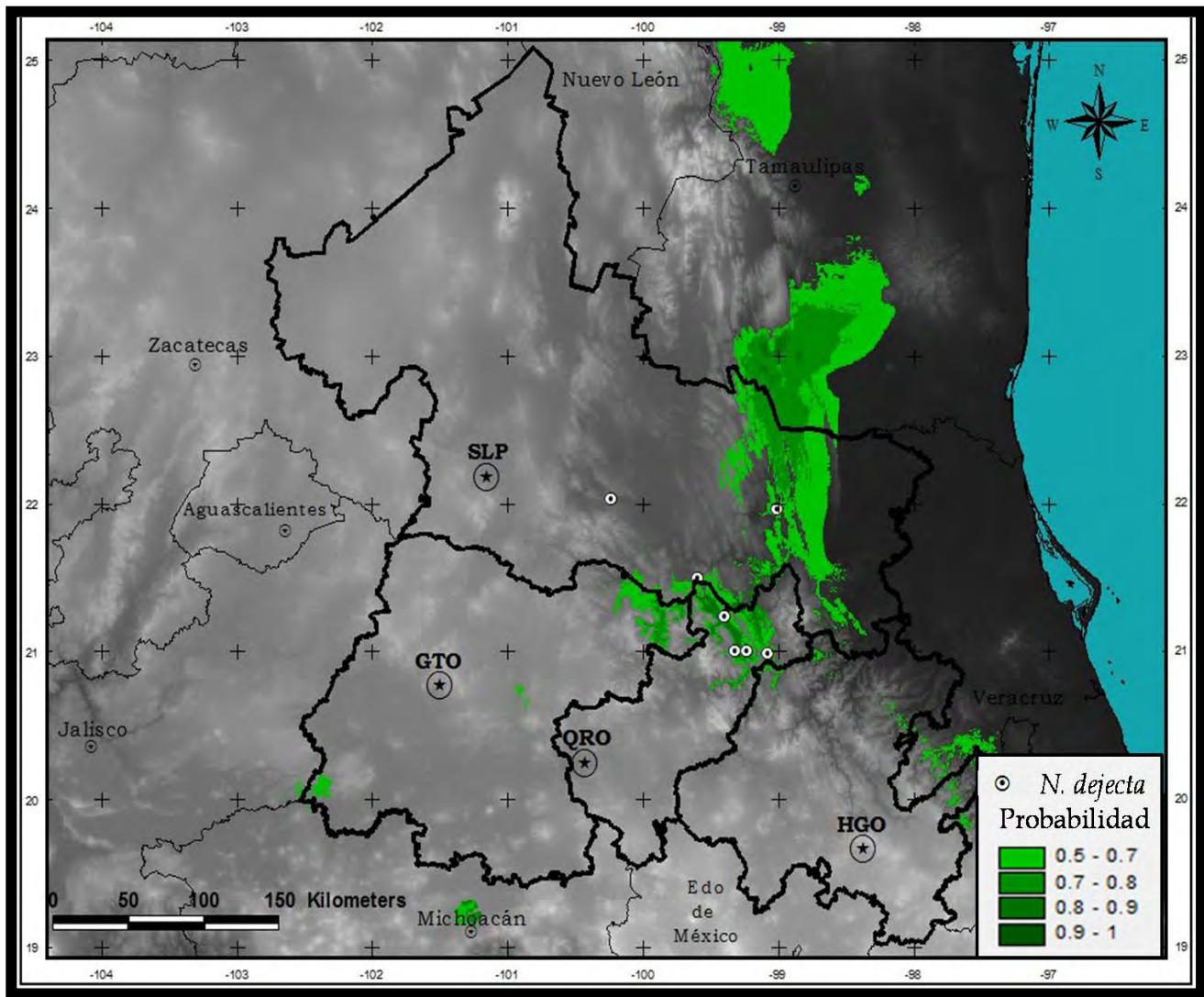


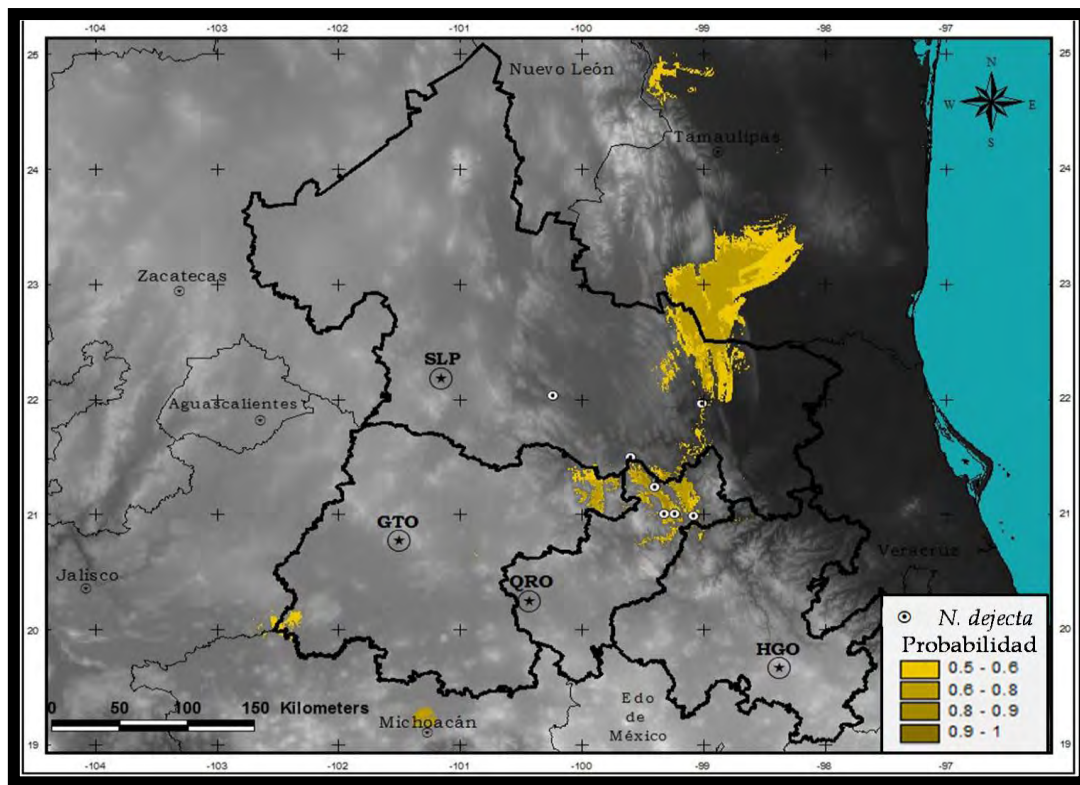
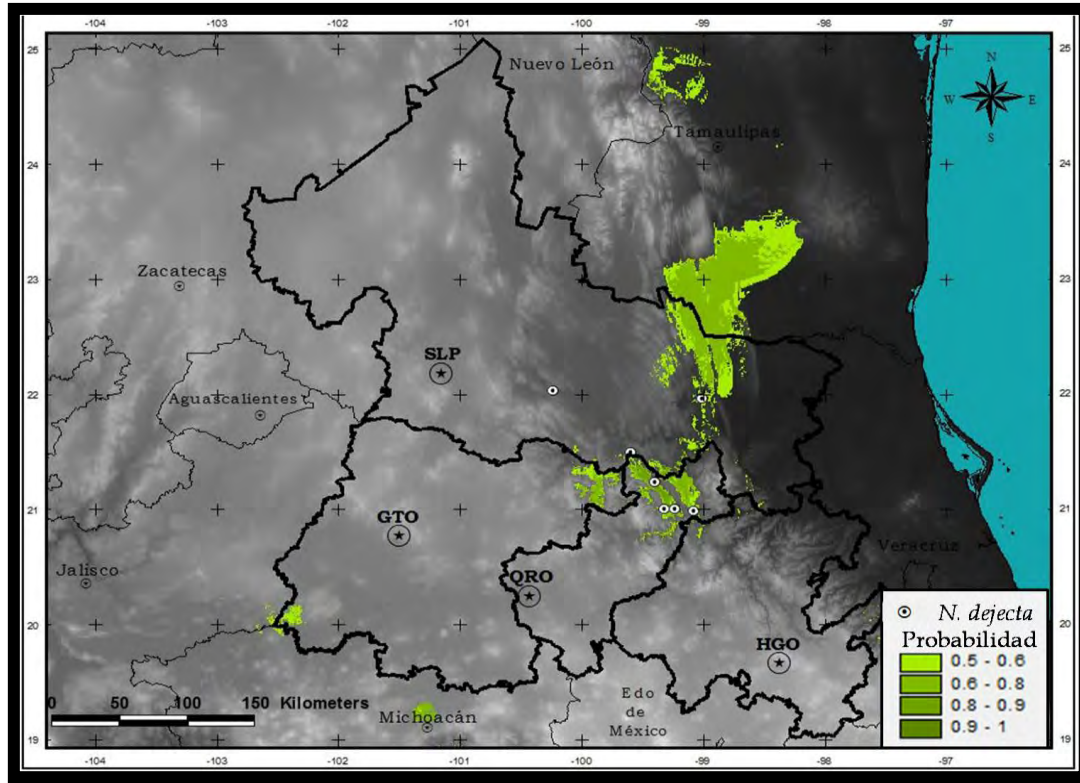
Nopalea dejecta* (SALM-DYCK) SALM-DYCK, *Cactaeae in horto Dyckensi cultae anno 1849: 64. 1850.

Nopal chamacuero

Distribución

Cultivada en América tropical; posiblemente nativa de Panamá. El profesor Eizi Matuda la encontró en Paredón, cerca de Tonalá, Chiapas. Bravo ha colectado ejemplares con caracteres de esta especie en Jacala y Valles, de la Huasteca Potosina y en selvas bajas, espinosas, deciduas cercanas a El Mante, Antiguo y Nuevo Morelos, en el Suroeste de Tamaulipas, así como entre Jalapa y Puente Nacional, en Veracruz (Bravo, 1978: 350). Guzmán et al. (2003: 178), reporta su distribución para los estados de Chiapas, Oaxaca, San Luis Potosí, Tamaulipas y Veracruz. Crece bosque tropical caducifolio, a una altitud de 850 a 1 100 msnm (Scheinvar, 2004: 78).





Opuntia MILL. Gard. Dict. Abr. Ed. 4 1754.

Arbóreas, arbustivas o rastreras; pueden o no presentar tronco bien definido. Raíces fibrosas, muy extendidas y superficiales, a veces tuberosas. Cladodios aplanados, con formas desde oblongas hasta circulares; también pueden ser subcilíndricos, crasos, encadenados, cubiertos de una capa cerosa. Hojas subuladas, cuspidadas, caducas, 2-5 mm de longitud. Tubérculos más o menos marcados. Epidermis glabra o pubescente. Aréolas hundidas o elevadas, pequeñas a grandes, dispuestas en series espiraladas. Espinas sin vaina, aciculares o subuladas, con la base a veces aplanada, retrobarbadas, sin vaina papirácea. Flores grandes con los segmentos del perianto comúnmente amarillos, a veces se presentan de color rosa, anaranjado o rojizo, pueden variar de tono después de la antesis; estambres y estilo más cortos que los segmentos; androceo y gineceo incluidos en el perianto; lóbulos del estigma obtusos, en número de 5 a 10; estambres muy numerosos, a veces sensitivos. Frutos globosos a elipsoides, en el ápice se presenta una concavidad receptacular u ombligo más o menos profunda; el pericarpelo presenta aréolas con glóquidas y espinas setosas, con pulpa jugosa dulce (tuna) o seca ácida (xoconostle). Semillas deltoides, poligonales o circulares, con o sin pelos en la superficie de la testa, envueltas en un arilo esclerenquimatoso desarrollado desde el funículo.

Fenología

En general florecen de febrero a abril, aunque en algunas especies este periodo puede prolongarse hasta septiembre. En algunos individuos puede adelantarse o retardarse la floración debido a que en las plantas de las regiones áridas y semiáridas esta depende de las condiciones climáticas. El fruto madura aproximadamente dos meses después de la floración, en algunas especies éste permanece en la planta todo el año, por lo que no es raro encontrar plantas floreciendo y con frutos de la floración anterior.

Distribución

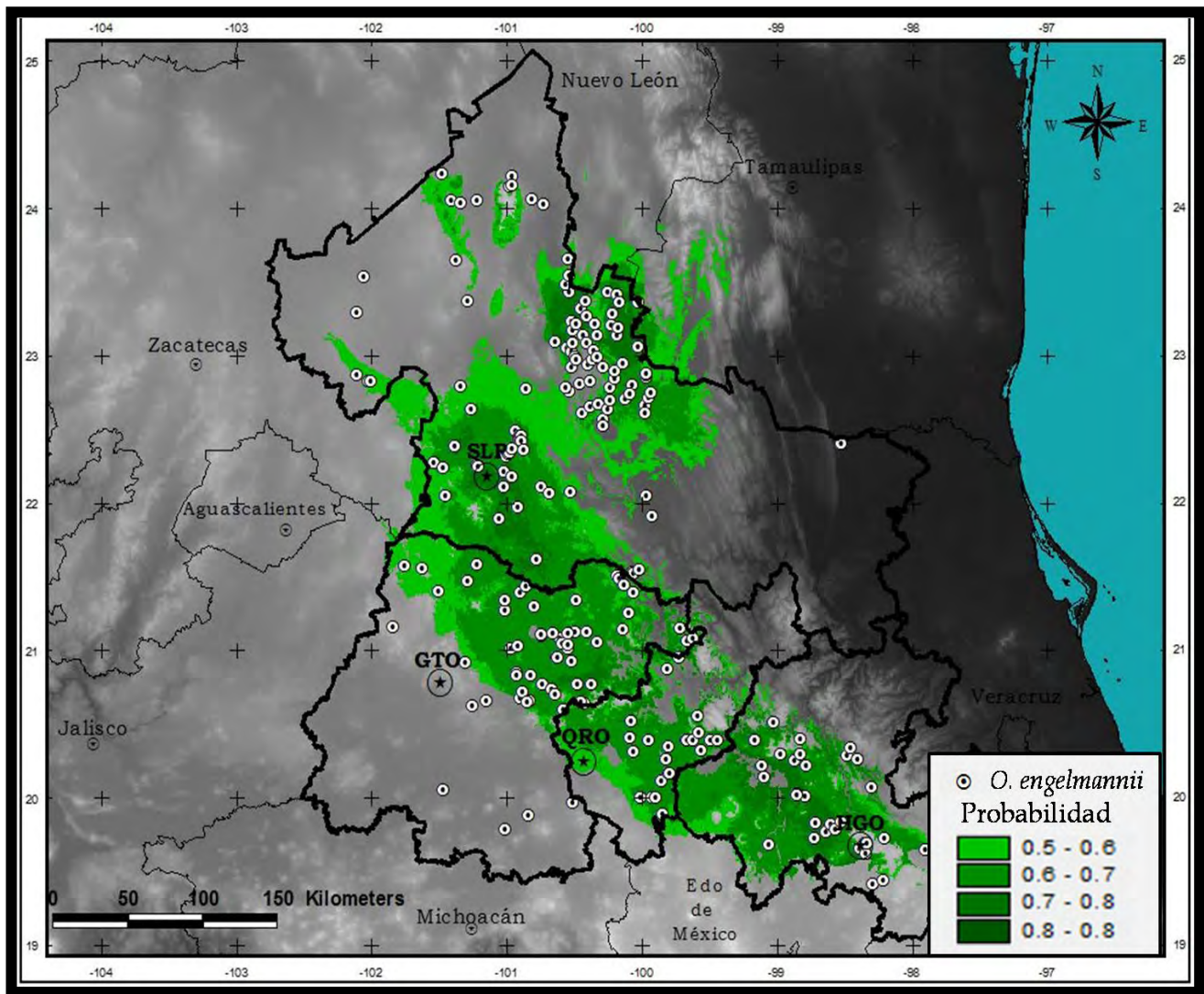
Crece generalmente en las planicies áridas del centro y norte de México en diferentes climas. No obstante, es en las zonas semiáridas donde existe la más amplia variación, por lo que algunos botánicos consideran a éstas como el centro de origen de los nopales.

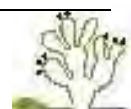
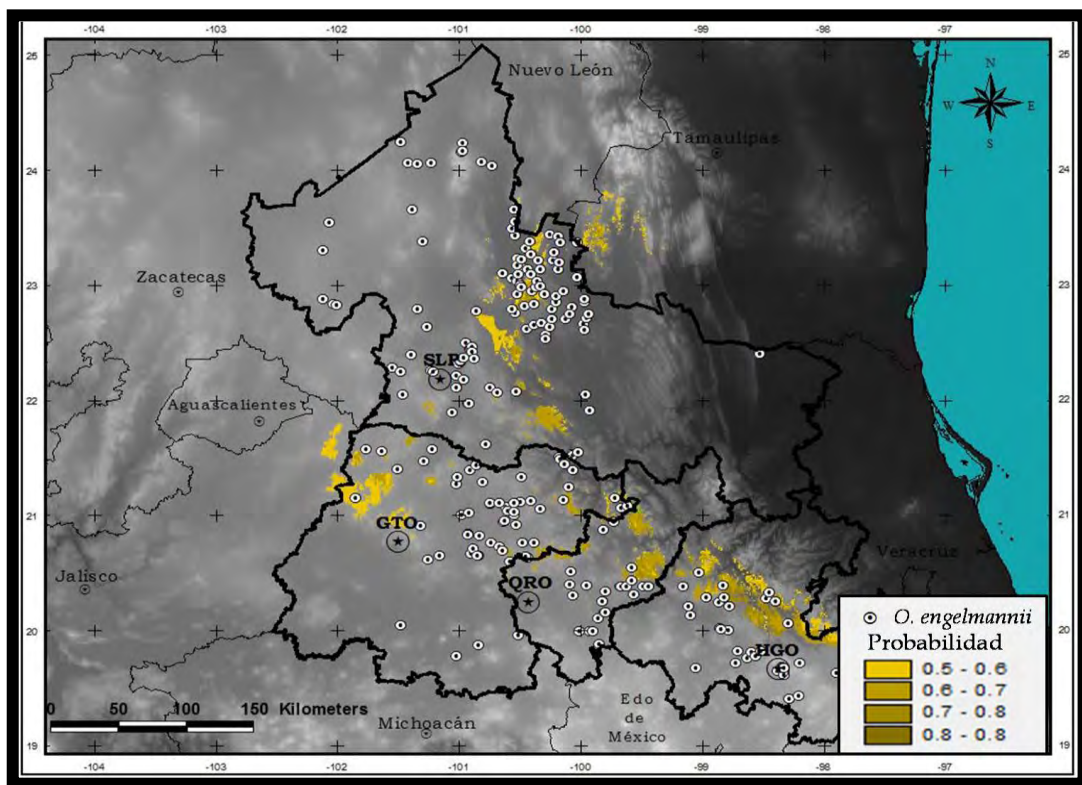
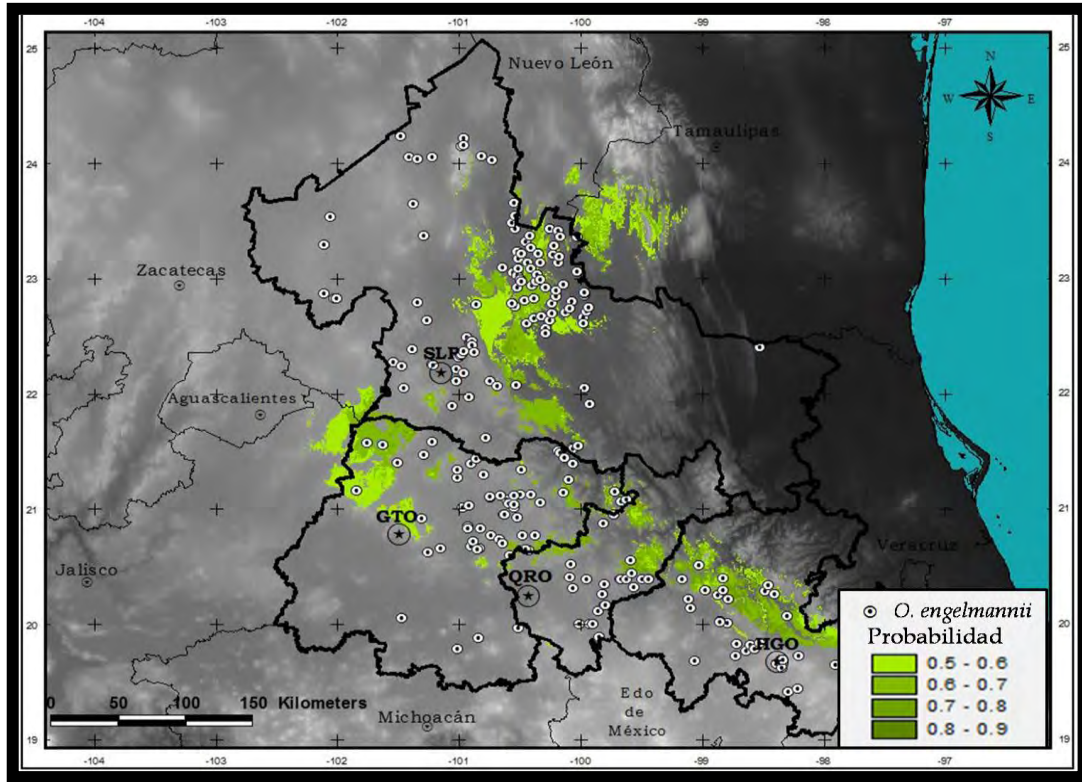


Opuntia engelmannii SALM-DYCK, *Cactae in horto Dyckensi cultae anno 1849: 67, 235-236. 1850.*

Distribución

Chihuahua, Durango, Sonora, Arizona, Nuevo México y Texas (Britton & Rose, 1919: 147).

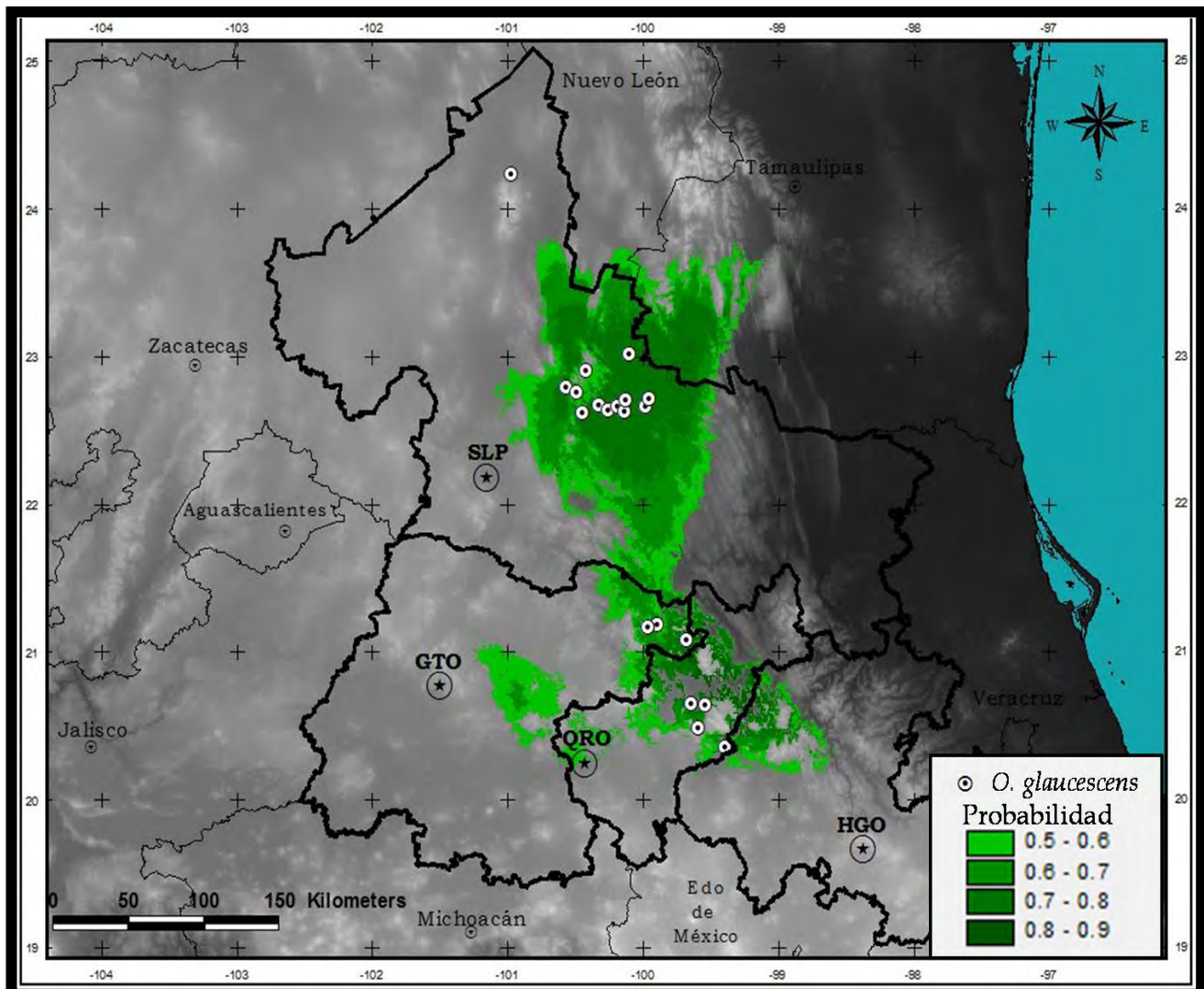


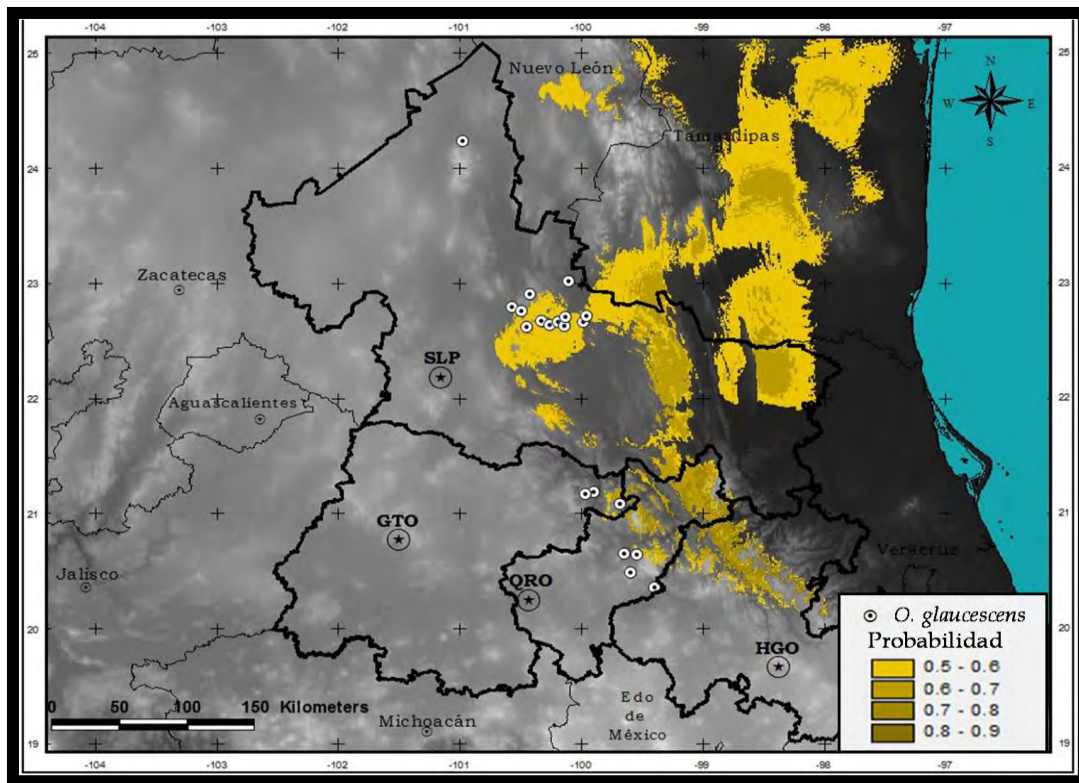
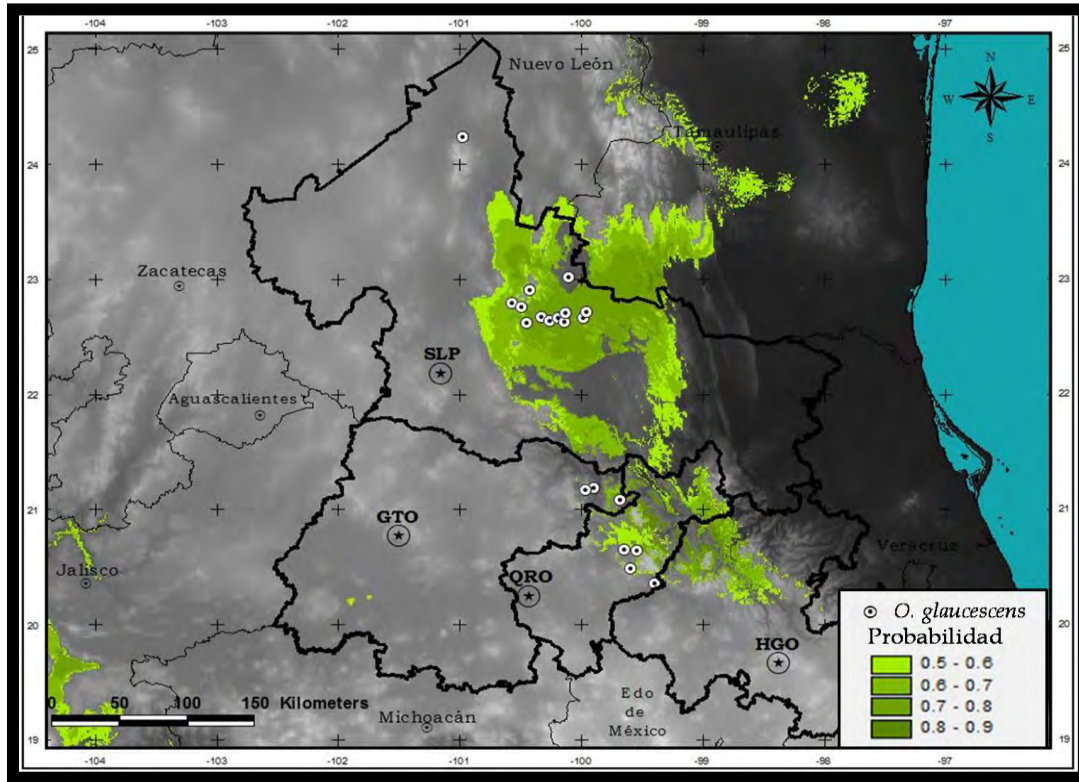


Opuntia glaucescens Salm-Dyck, Hortus Dyckensis: 185,362. 1834.

Distribución

Se distribuye en el estado de San Luis Potosí.



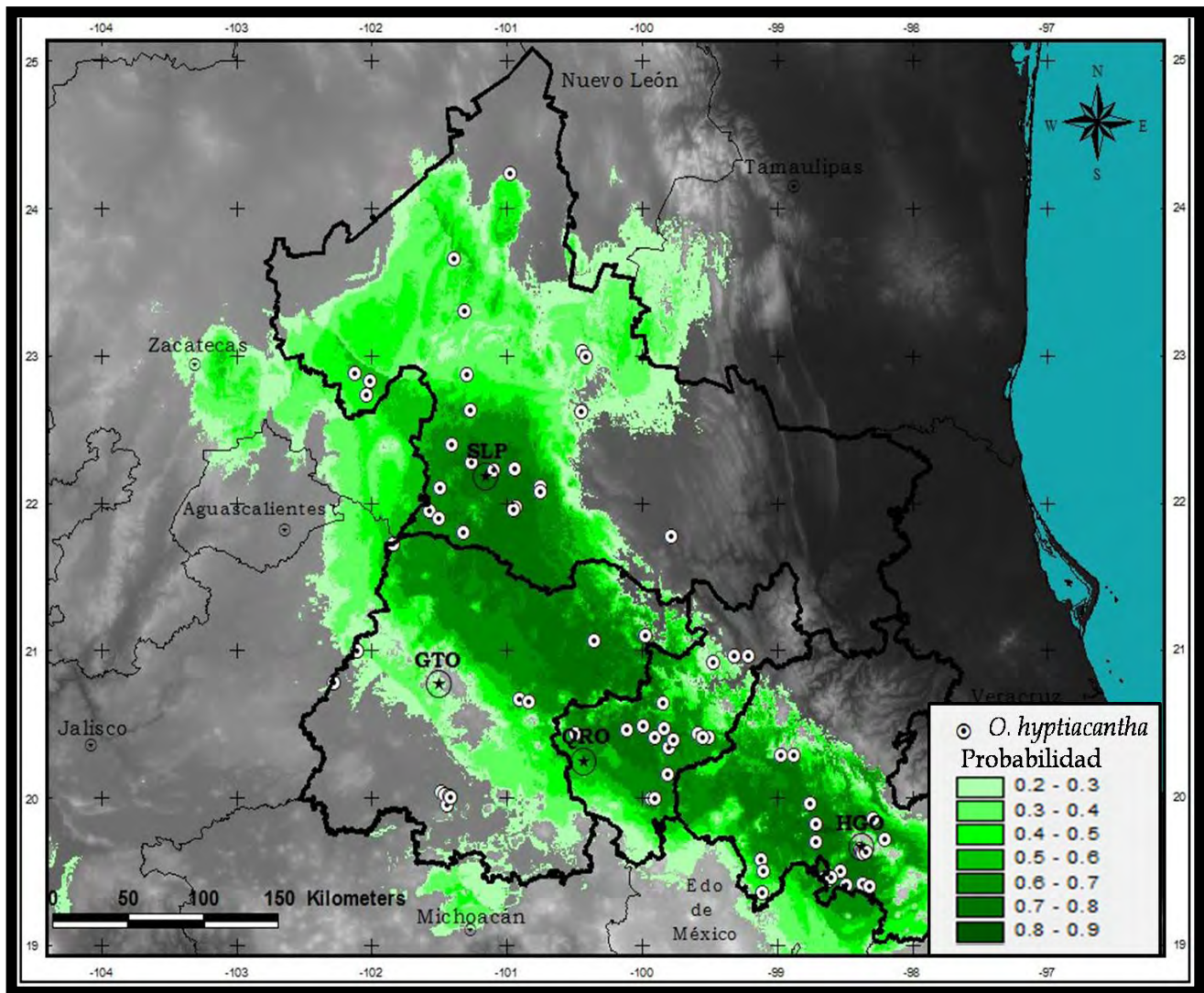


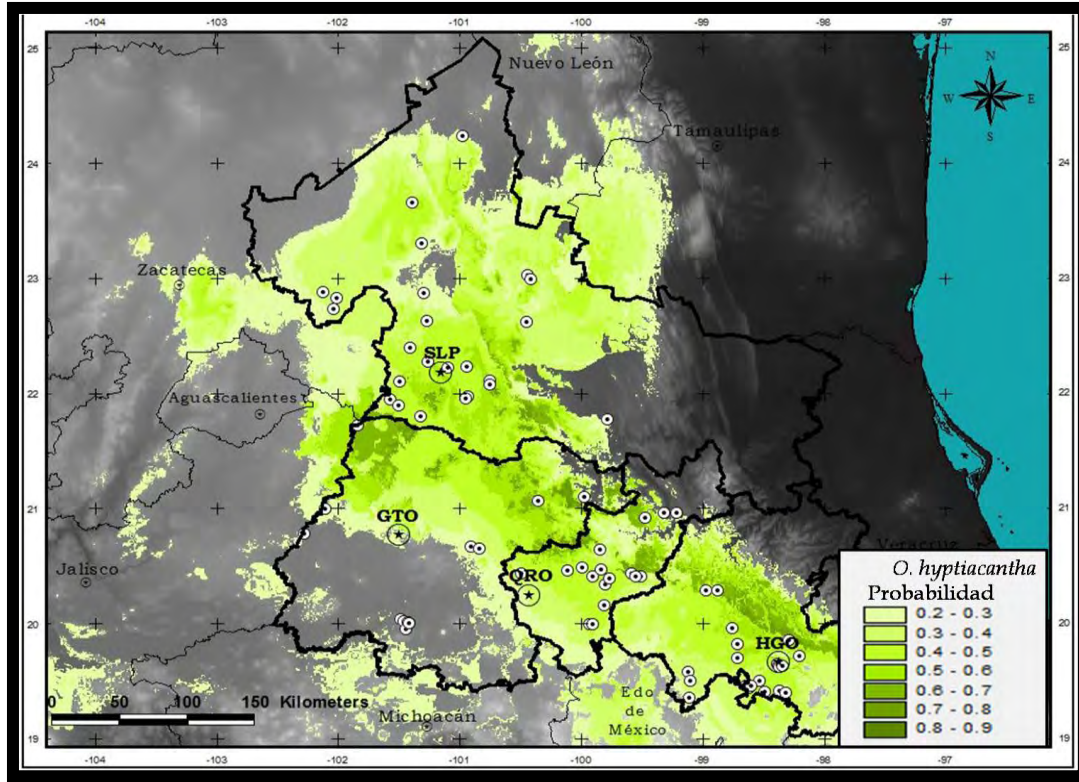
Opuntia hyptiacantha WEBER EX BOIS, *Dictionarie d'Horticulture*. 2(28): 894.
1898.

Nopal cascarón, tuna chaveña, tuna cardona, nopal memelo, nopal cardón

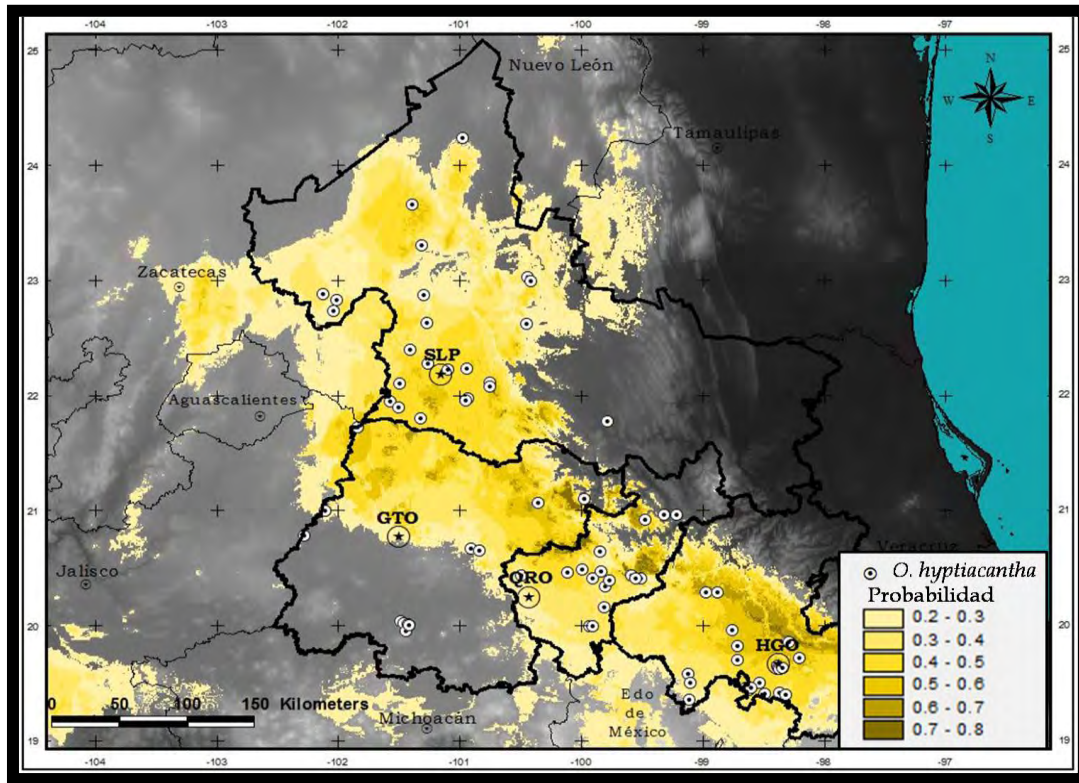
Distribución

Ampliamente distribuida en la Mesa Central (Bravo, 1978: 326), en los estados de Aguascalientes, Guanajuato, Hidalgo, Jalisco, México, Oaxaca, Puebla, Querétaro, San Luis Potosí, Tlaxcala y Zacatecas (Guzmán et al., 2003: 182). Crece en altitudes de 1800 a 2 200 msnm. Habita en pastizal y matorral xerófilo a menudo agrupándose en nopaleras densas (González et al., 2001: 58).





Mapa 6b. Distribución de *O. hyptiacantha* al año 2050 en la RCM estimada a partir del modelo HadGEM1 (35,549.85 km², AUC=0.99, Valor de corte=0.2).



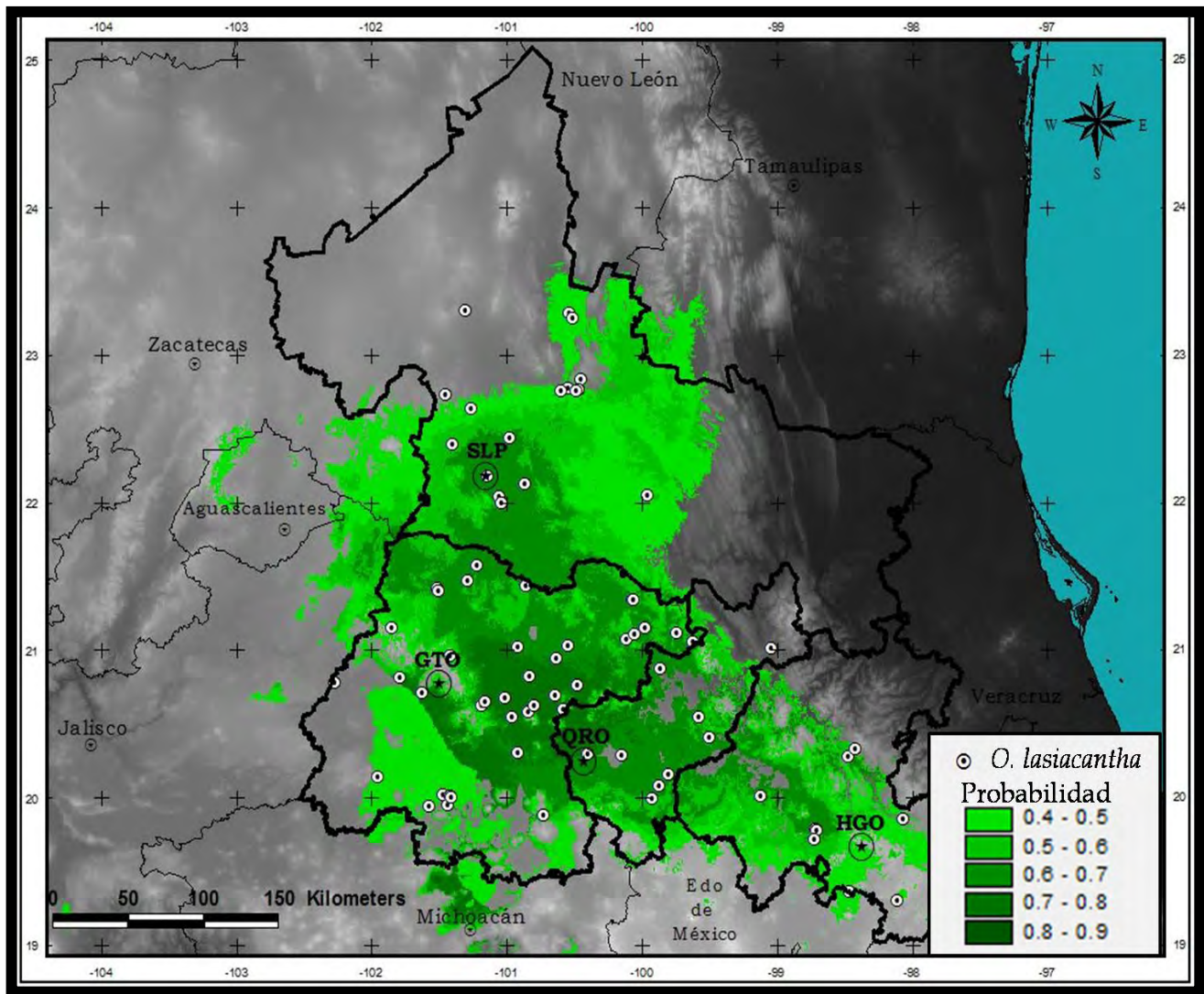
Mapa 6c. Distribución de *O. hyptiacantha* al año 2080 en la RCM estimada a partir del modelo HadGEM1 (30,354.18 km², AUC=0.99, Valor de corte=0.2).

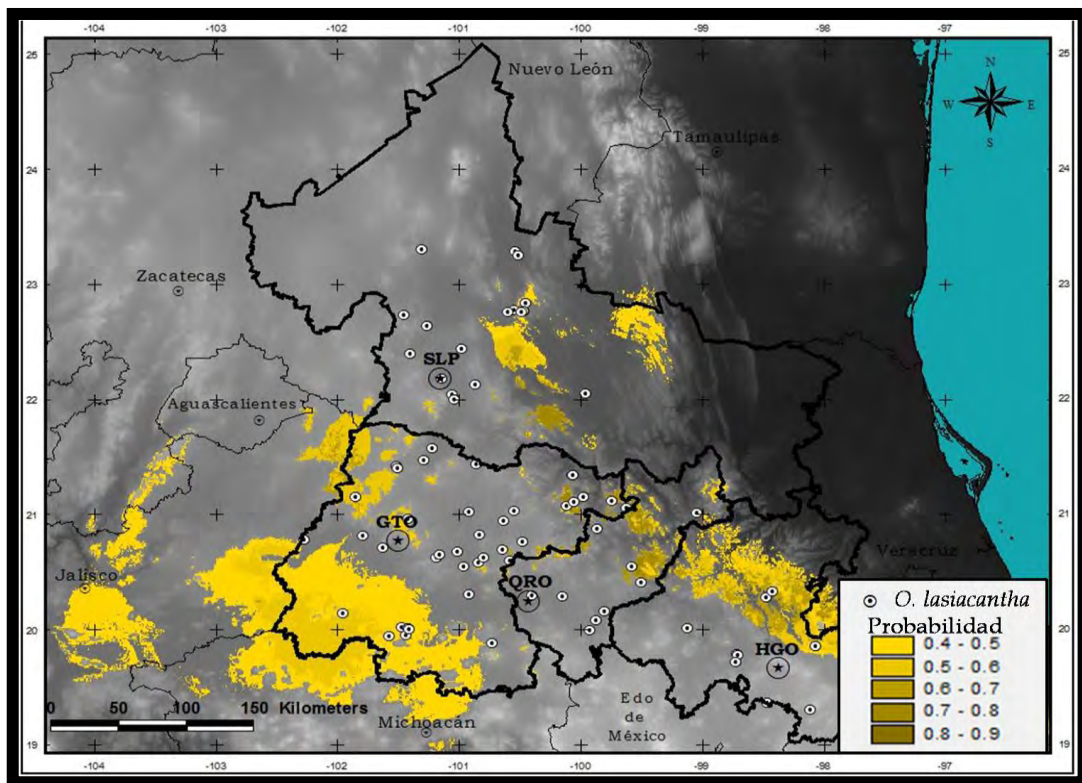
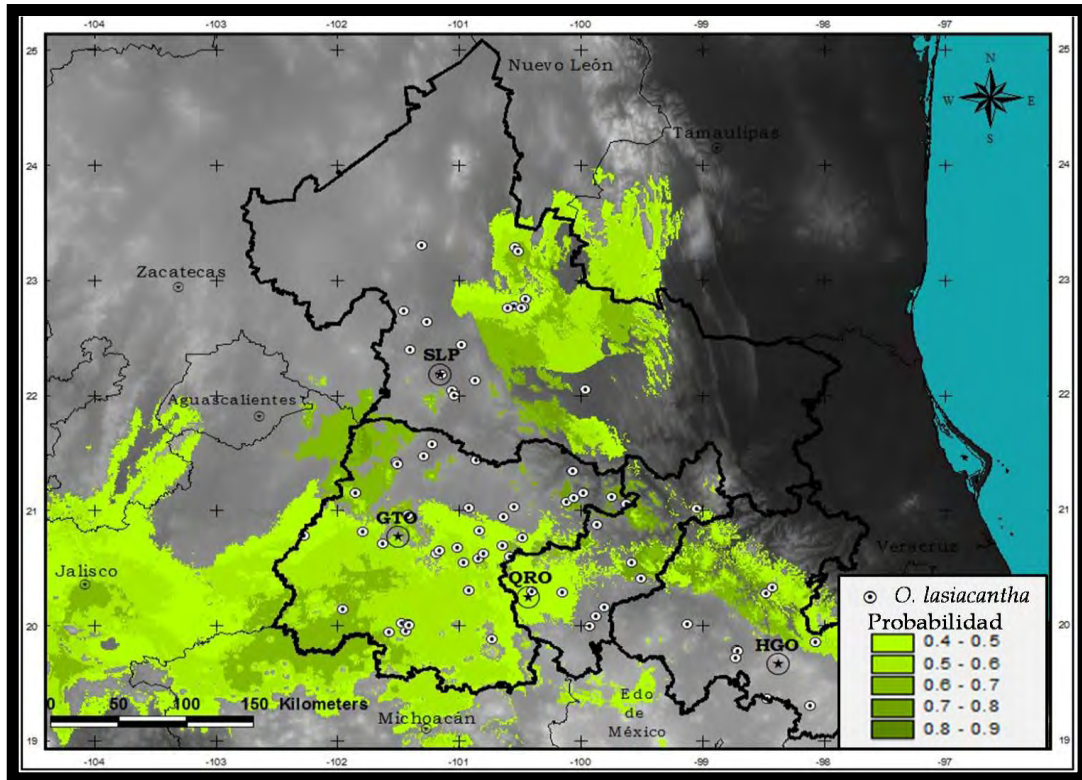


Opuntia lasiacantha PFEIFFER, *Enumeratio diagnostica cactearum hucusque cognitarum*: 160. 1837; & *Beschreibung und Synonymik der Cacteen*: 179-180. 1837.
Nopal, nopal de cerro

Distribución

Se distribuye en la Mesa Central. Ochoterena la registró de San Luis Potosí, D.T. MacDougal de Tehuacán y Rose cerca de la ciudad de México (Bravo, 1978: 325). Guzmán et al. (2003: 184), señala su distribución en los estados de Guanajuato, Hidalgo, Jalisco, México, Michoacán, Oaxaca, Puebla, Querétaro, San Luis Potosí, Tlaxcala y Zacatecas. Crecen en altitudes de 1 700 a 1 900 msnm, habita en matorral xerófilo (González et al., 2001: 60), pastizal, y encinar arbustivo (Scheinvar, 2004: 113).





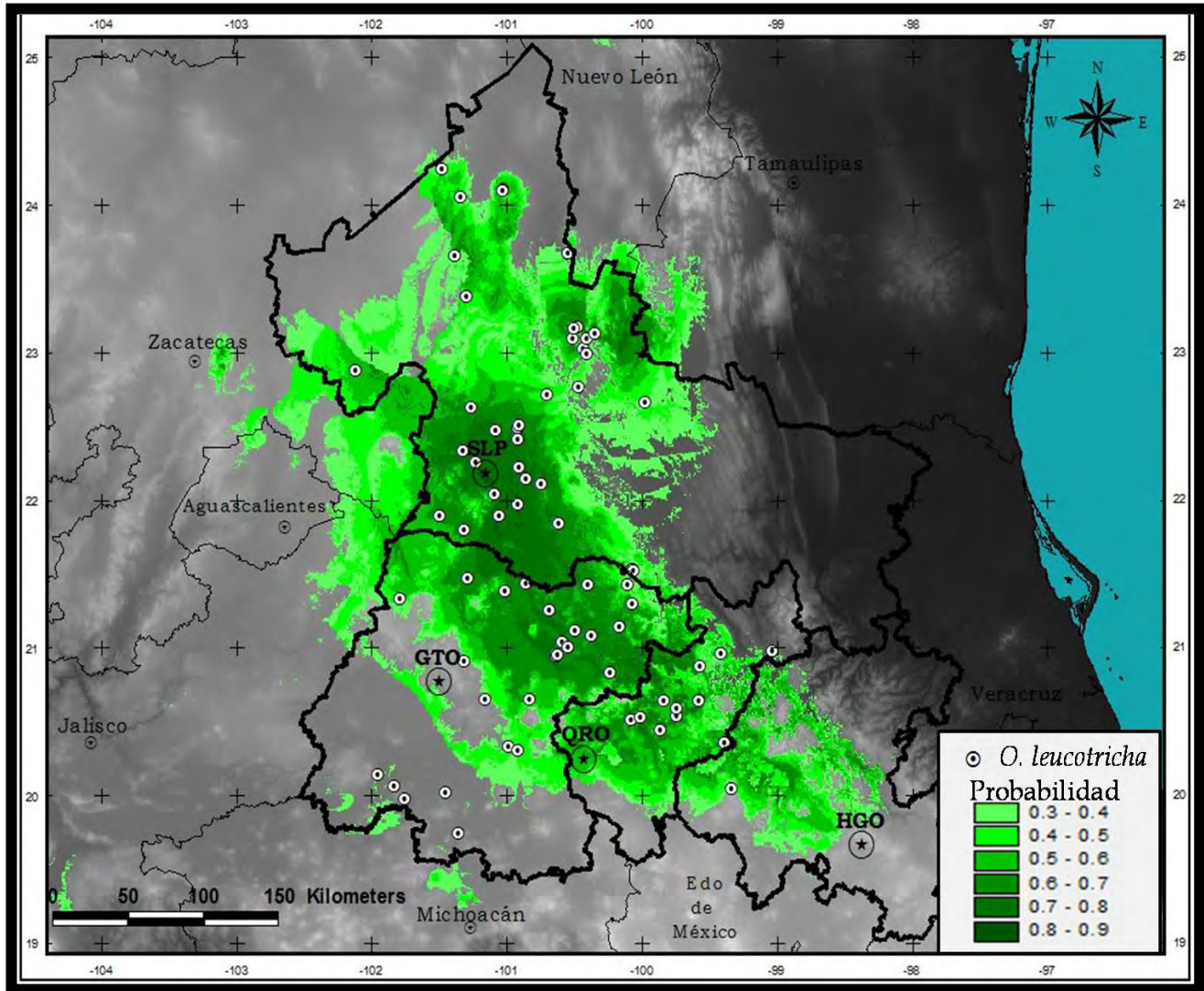
***Opuntia leucotricha* WENDLAND, *Catalogus hortus herrenhusanus*. 1835 [Pfeiffer, *Enumeratio diagnostica cactearum*: 167-168. 1837].**

Nopal duraznillo, duraznillo blanco, nopal colorado, duraznillo rojo, xoconostle colorado

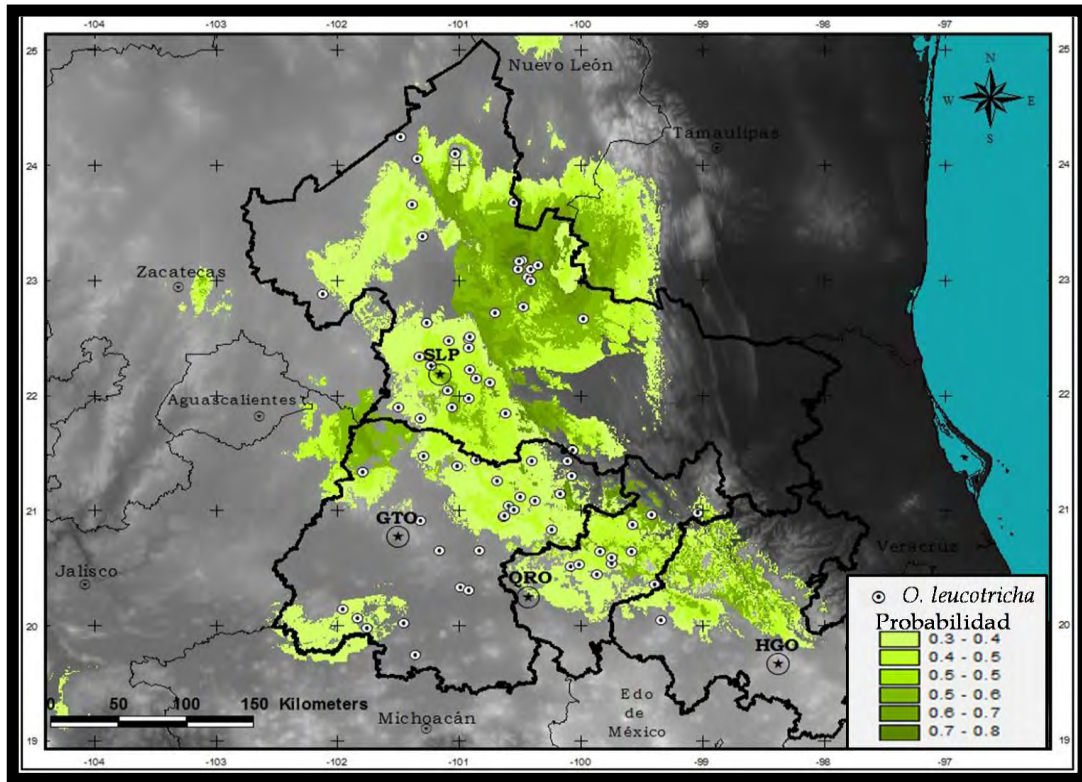
Distribución

Se encuentra ampliamente distribuida en las zonas de la altiplanicie, en los Estados de San Luis Potosí, Zacatecas y Durango, donde alcanza su máxima densidad y se extiende a los Estados de Guanajuato, Querétaro e Hidalgo. Está presente en diversos tipos de vegetación como en el matorral micrófilo de *Larrea*,-*Prosopis*-*Yucca*; en el matorral crasicauale, en donde son característicos los géneros *Opuntia*, *Myrtillocactus*, *Echinocereus*, *Echinocactus*, *Mammillaria*, asociados a *Prosopis*, *Acacia*, *Mimosa* y *Yucca*, y suele también crecer en los matorrales crasirrosulifolios espinosos integrados por *Agave*, *Hechtia* y *Yucca*. Velázquez Castro (1962), a propósito de su distribución, dice: "...empieza a presentarse en Guanajuato, al este de San Luis de la Paz, con una característica de distribución bastante irregular, constituyendo manchones con diferentes densidades". Entre Santa. María del Río y San Luis Potosí, se encuentra a la especie anterior (*Opuntia streptacantha*) sin alcanzar la densidad de ésta; se interrumpe más al norte para aparecer al suroeste de Valle Arista con altas densidades por hectárea, se interna en el Estado de Zacatecas en el área de alta densidad de *O. streptacantha* suroeste de Salinas, oeste de Villa Arriaga, Ojo Caliente) donde conjuntamente dominan sobre el resto de la vegetación. Más al norte presenta altas densidades aisladamente, entre Zacatecas y Calera, hasta llegar después de Fresnillo a formar densas nopaleras asociándose con *Yucca decipiens* al este y oeste de Cañitas, y de Fresnillo a río Grande, donde queda en un lugar secundario a la presencia de *O. streptacantha*. En su límite norte se localiza en la Sierra de Guadalupe, Tetillas y Pacheco, norte de San Juan del Mezquital, siguiendo dentro del Estado de Durango; hacia el sur pierde su distribución por la presencia de áreas de cultivo, y rumbo a la Sierra Madre Occidental; por Valparaíso, su presencia se vuelve raquítica; sin embargo, continúa por la ciudad de Durango, Guadalupe Victoria, Peñón Blanco, Cuencamé y Covadonga en el Estado de Durango (Bravo, 1978: 313). En Jalisco se le encuentra en los municipios de Huejuquilla el Alto, Lagos de Moreno y Ojuelos. Crece en altitudes de 1 800 a 2 200 msnm. Habita en el matorral xerófilo y pastizal formando nopaleras con *O. hyptiacantha*, *O. chavena* y *O. streptacantha* (González et al., 2001, 61).

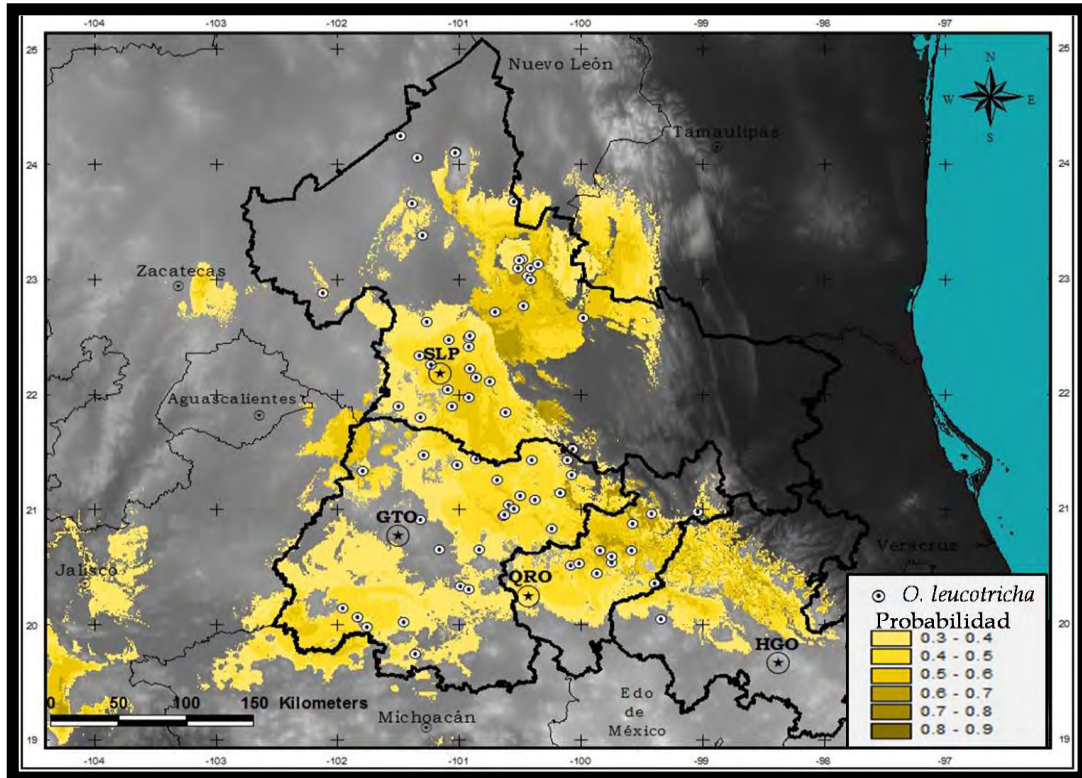




Mapa 8a. Distribución Potencial Actual de *O. leucotricha* en la RCM (27,187.03 km², AUC=0.993, Valor de Corte=0.3).



Mapa 8b. Distribución de *O. leuco tricha* al año 2050 en la RCM estimada a partir del modelo HadGEM1 (23,798.28 km², AUC=0.993, Valor de corte=0.3).



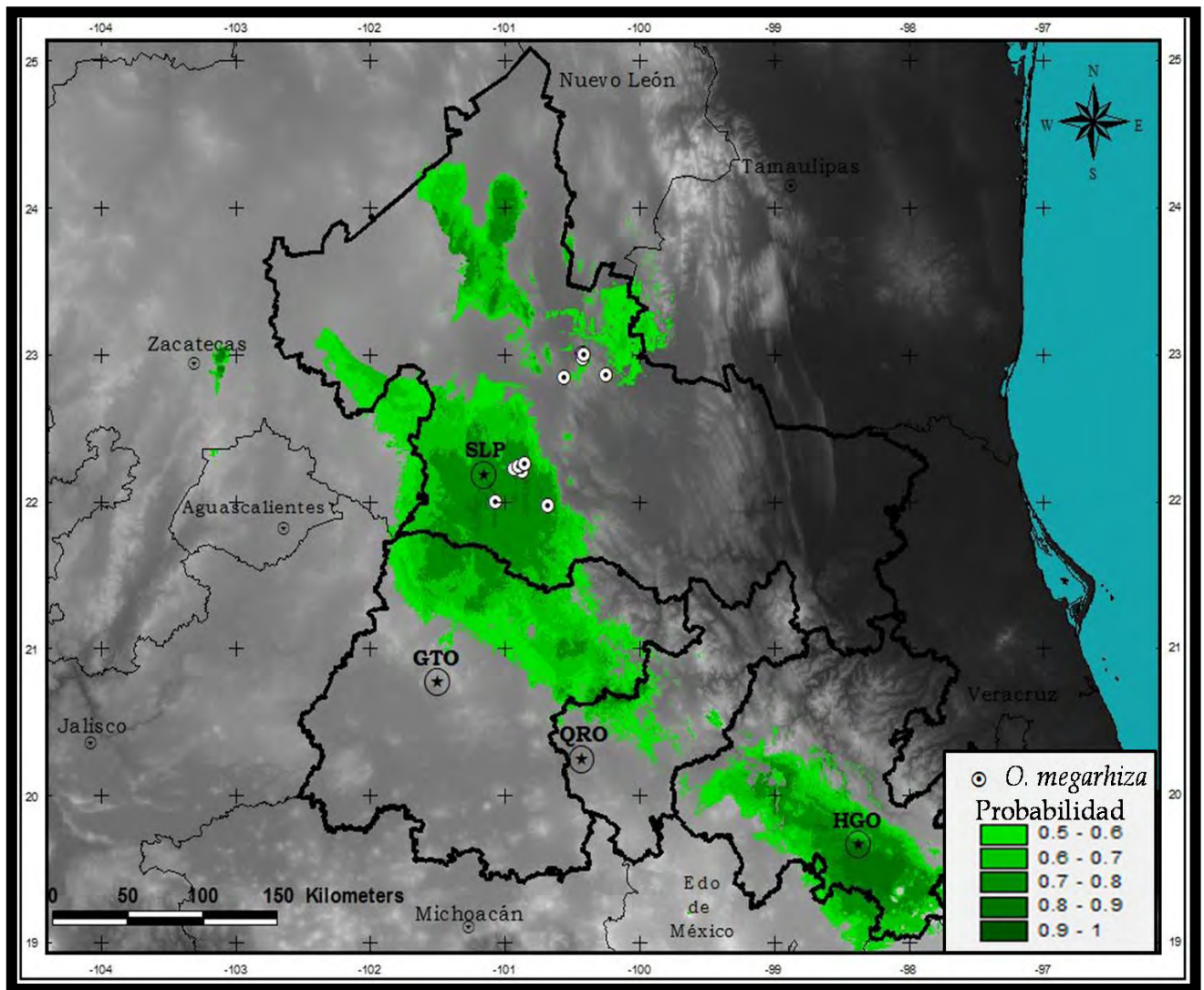
Mapa 8c. Distribución de *O. leucotricha* al año 2080 en la RCM estimada a partir del modelo HadGEM1 (25,486.50 km², AUC=0.993, Valor de corte=0.3).



Opuntia megarrhiza ROSE, Studies of Mexican and Central American plants -no. 5, Contributions from the U.S. National Herbarium 10(3):126. 1906.
Nopalillo

Distribución y Ambiente

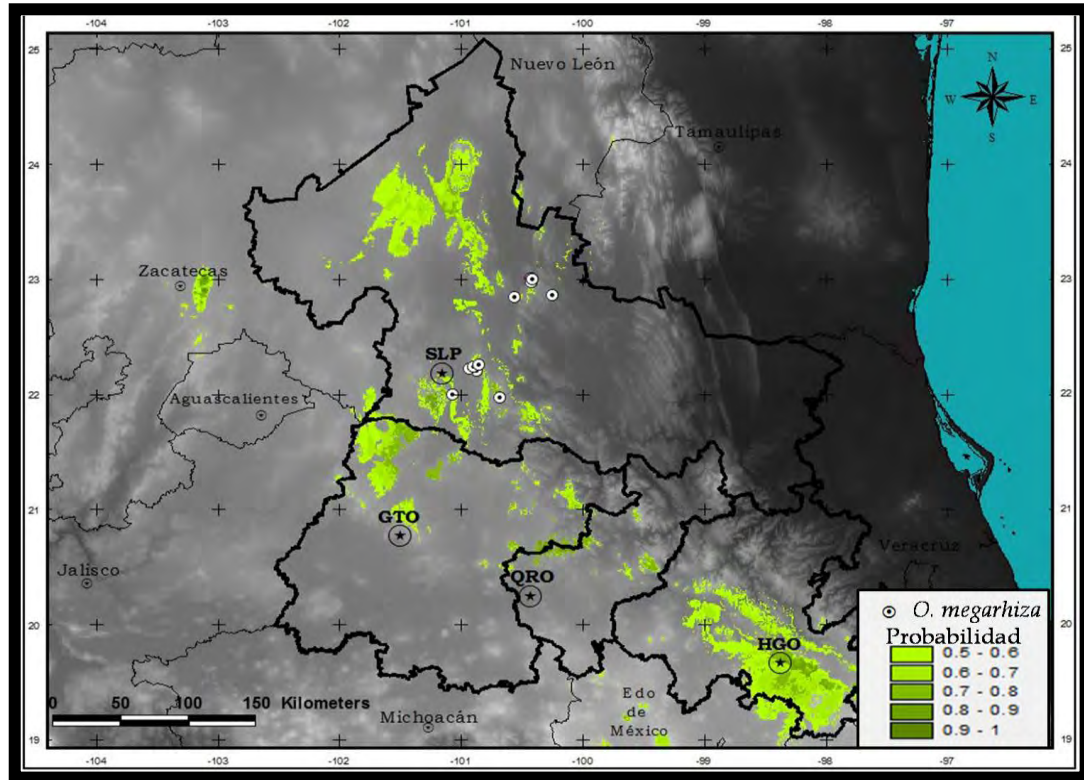
Parece limitarse a cinco localidades, en el centro de San Luis Potosí, donde se encuentra escasamente distribuida. Dichas localidades son Monte Caldera en Cerro de San Pedro; La Yerbabuena, San José de las Flores en Guadalcázar; El Zapote en San Luis Potosí y Álvarez en Villa Zaragoza. Su distribución se encuentra limitado a algunos fragmentos de las cumbres de La Trinidad y cordilleras de Álvarez, en San Luis Potosí, México. El grado de incidencia es aprox. 1895 km², fragmentado en dos subpoblaciones con un área de ocupación de aprox. 50



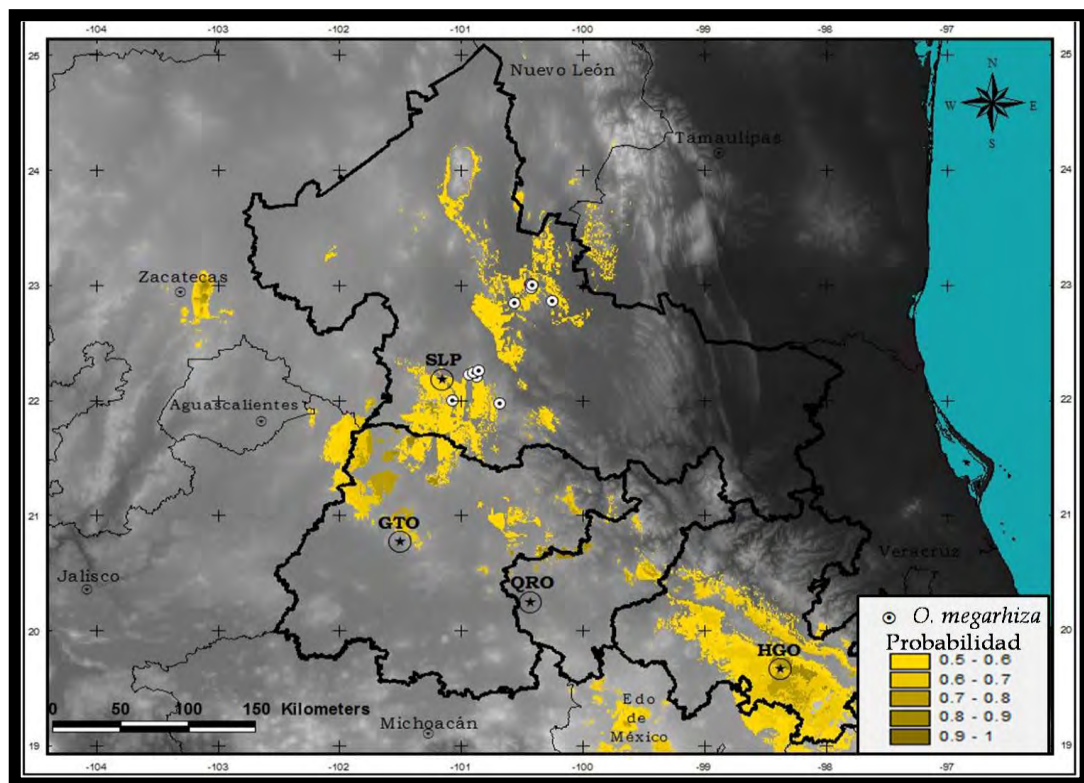
Mapa 10a. DISTRIBUCIÓN POTENCIAL ACTUAL DE *OPUNTIA MEGARRHIZA* EN LA RCM (14,895.35 km², AUC=0.997, VALOR DE CORTE=0.5).

km². Sólo cuatro lugares discretos se han registrado. El tamaño de la población es menor de 2500 individuos maduros. Habita con más frecuencia a 1890-2200 m. Esta especie se encuentran cerca o en las cumbres de montañas secundarias pertenecientes a la provincia fisiográfica de la Sierra Madre Oriental, (Sierra de Álvarez, Sierra la Trinidad, y Monte Caldera). Los suelos generalmente son profundos, arcillosos, con afloramientos de piedra caliza. Crece en chaparrales perturbados de *Quercus euardii*, *Quercus striatula* con *Agave asperrima*, y *Painteria elachistophylla*; pastizales de *Bouteloua gracilis* o *Heteropogon contortus*; o bosques de roble (Hernández et al., 2001).





Mapa 9b. Distribución de *O. megarhiza* al año 2050 en la RCM estimada a partir del modelo HadGEM1(6,896.19 km², AUC=0.997, Valor de corte=0.5).



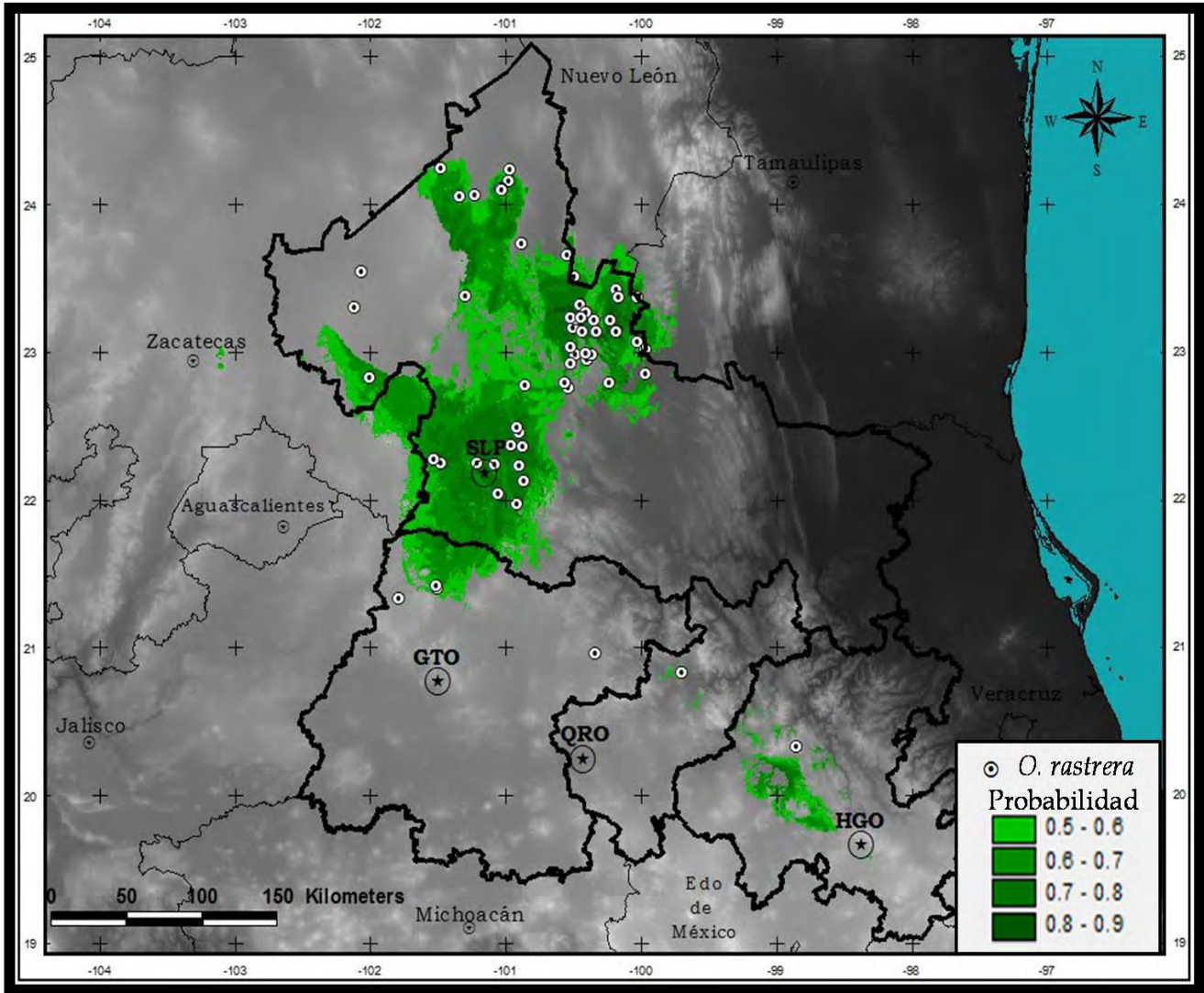
Mapa 9c. Distribución de *O. megarhiza* al año 2080 en la RCM estimada a partir del modelo HadGEM1(9,499.23 km², AUC=0.997, Valor de corte=0.5).

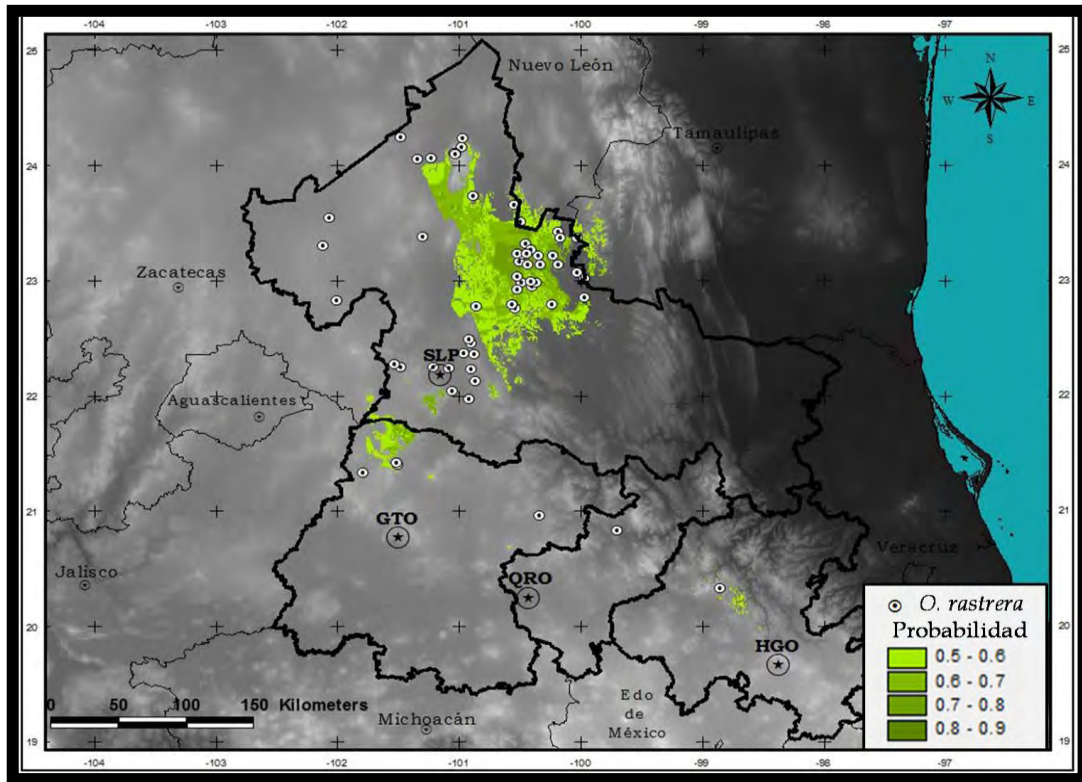


Opuntia rastrera WEBER IN BOIS, *Dictionaire d'Horticulture* 2: 896. 1898.
Cuija

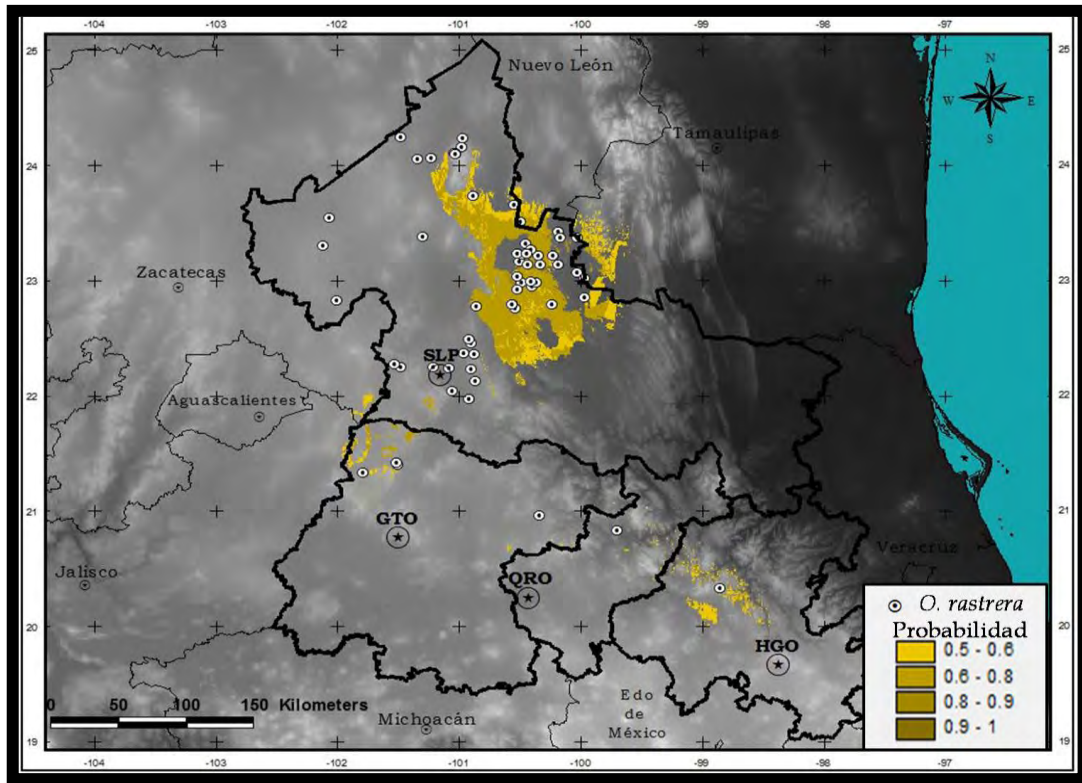
Distribución

San Luis Potosí y zonas adyacentes de los estados limítrofes, cree en las planicies (Bravo, 1978: 256); Guzmán et al. (2003: 191), la reporta para los estados der Coahuila, Durango, Nuevo León, San Luis Potosí y Zacatecas.





Mapa 10b. Distribución de *O. rastrera* al año 2050 en la RCM estimada a partir del modelo HadGEM1 (3,852.47 km², AUC=0.997, Valor de corte=0.5).



Mapa 10c. Distribución de *O. rastrera* al año 2080 en la RCM estimada a partir del modelo HadGEM1 (3,587.31 km², AUC=0.997, Valor de corte=0.5).

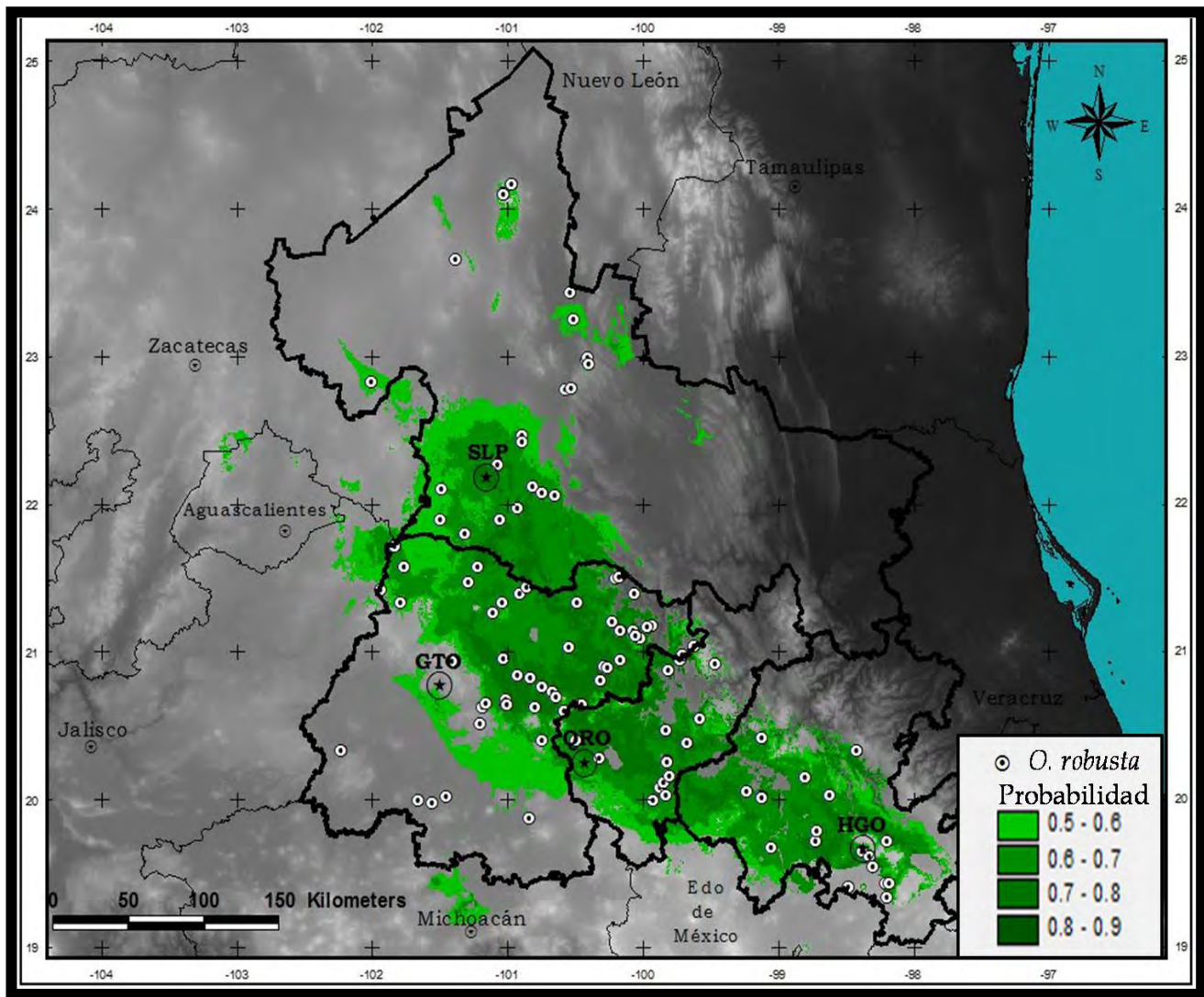


***Opuntia robusta* WENDLAND, in Pfeiffer, Enumeratio diagnostica cactearum hucusque cognitarum: 165-166. 1837; & Beschreibung und Synonymik der Cacteen: 186-187. 1837.**

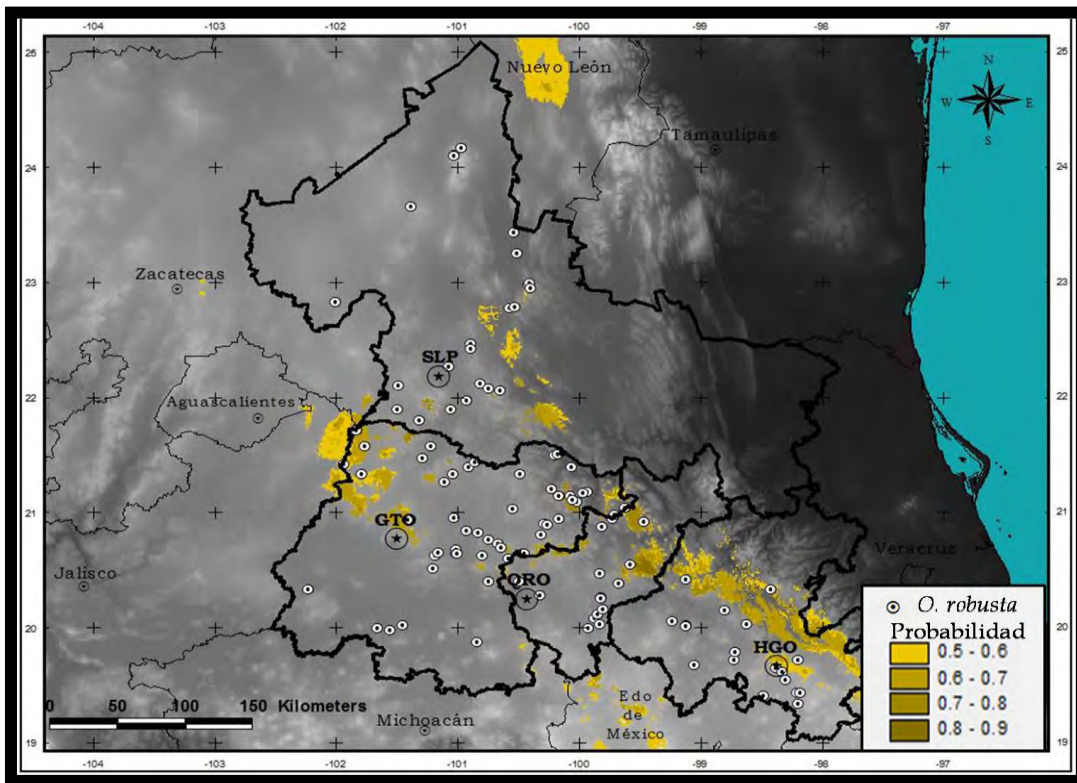
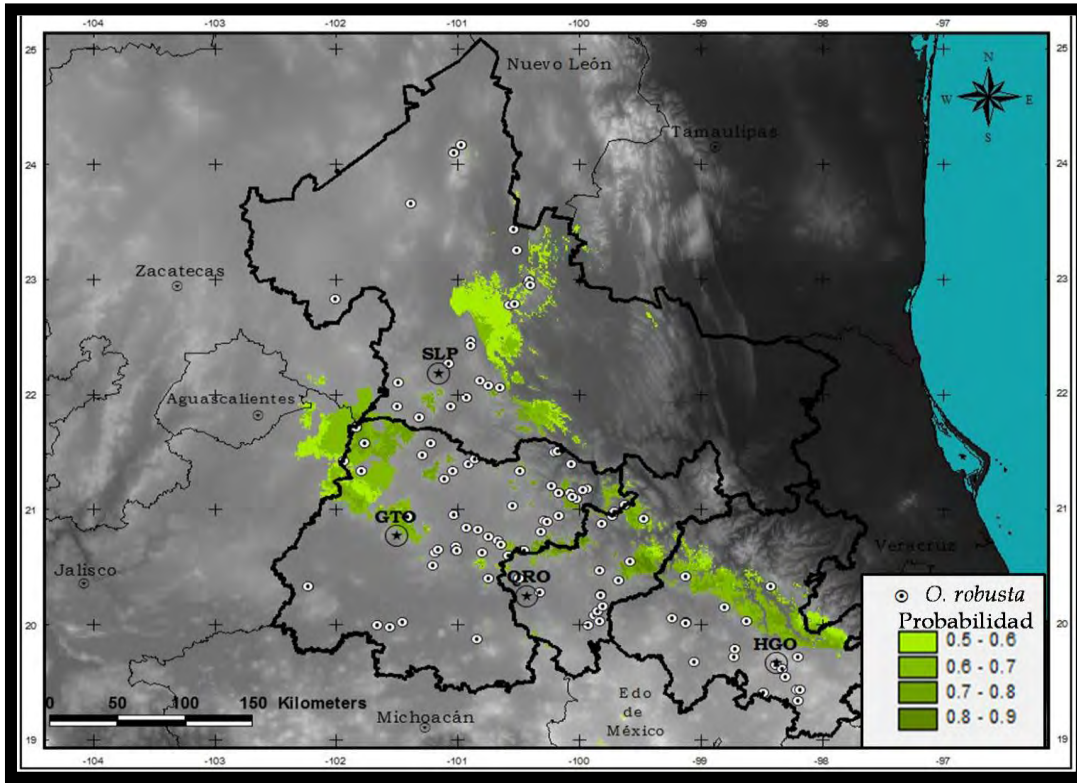
Nopal tapón, bartolona, tuna tapona, tuna camuesa

Distribución

Especie Está reportada para Zacatecas, Hidalgo, Querétaro, San Luis Potosí, Guanajuato, Jalisco y Michoacán Crece en altitudes de 1 800 a 2 200 msnm. Habita en el matorral xerófilo junto a *O. imbricata* y *O. leucotricha*, también se ha colectado en pastizal y bosque de pino-encino (González et al., 2001: 65). Guzmán et al. (2003:192), la reportan además, para los estados de Chihuahua, Durango, México, Sonora y el Distrito Federal.



Mapa 11a. Distribución Potencial Actual de *O. robusta* en la RCM (17,845.63 km², AUC=0.995, Valor de corte=0.5).

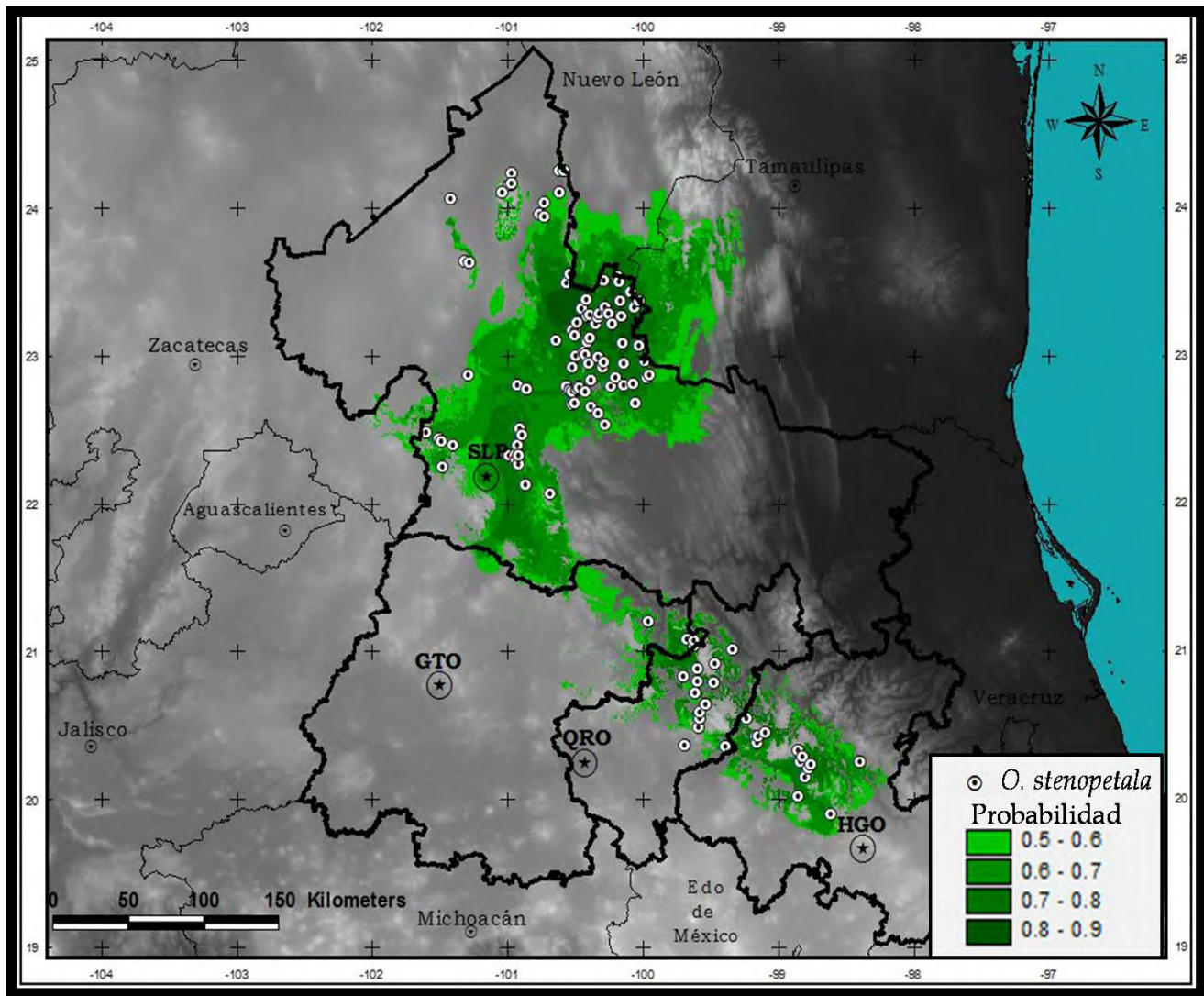


Opuntia stenopetala ENGELMANN, *Synopsis of the Cactaceae of the territory of the United States and adjacent regions* 33. 1856. Preimpreso en *Proceedings of the American Academy of Arts and Sciences* 3:289, 1857.

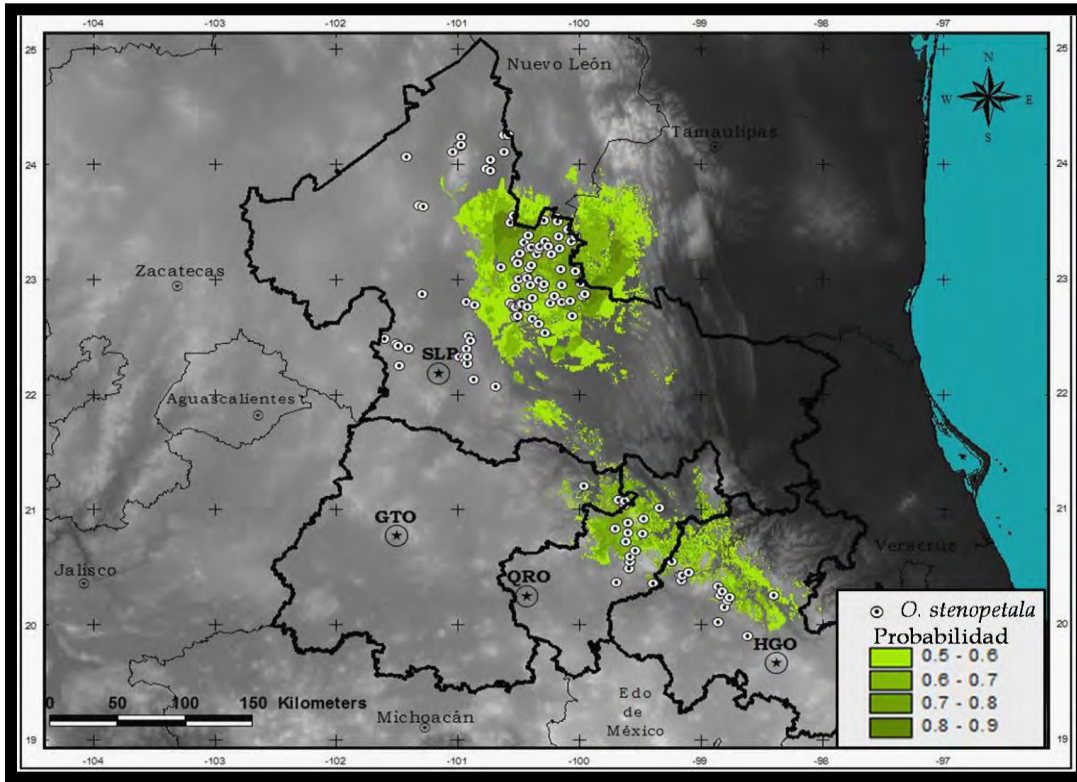
Arrastradillo, nopal rastrero, nopal serrano

Distribución

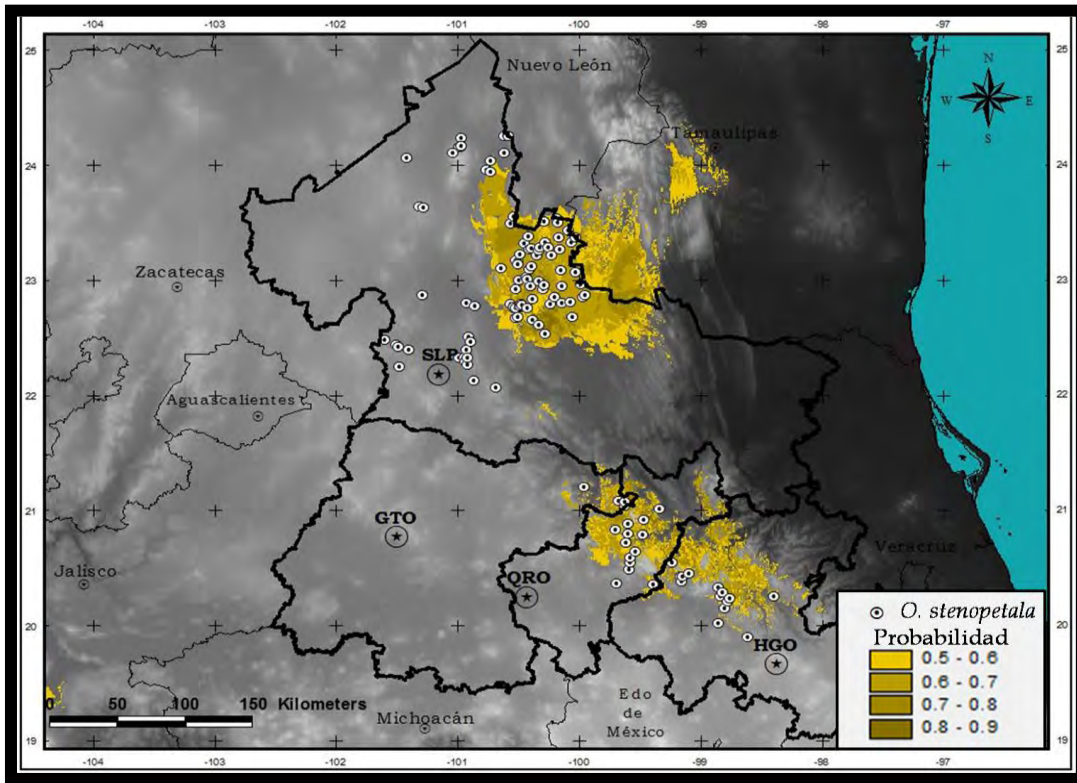
Especie distribuida en toda la mesa central (Bravo, 1978: 338); en los estados de Coahuila, Durango, Guanajuato, Hidalgo, Nuevo León, Querétaro, San Luis Potosí, Tamaulipas y Zacatecas (Guzmán et al., 2003: 193). Crece a una altitud de 1 200 a 2 400 msnm. Habita en el matorral xerófilo micrófilo, matorral rosetófilo y bosque de juníperos, pinos y encinos, en suelo calizo (Scheinvar, 2004: 89).



Mapa 12a. Distribución Potencial Actual de de *O. stenopetala* en la RCM (11,126.53 km², AUC=0.997, Valor de corte=0.).



Mapa 12b. Distribución de *O. stenopetala* al año 2050 en la RCM estimada a partir del modelo HadGEM1 (6,804.96 km², AUC=0.997, Valor de corte=0.5).



Mapa 12c. Distribución de *O. stenopetala* al año 2080 en la RCM estimada a partir del modelo HadGEM1 (6,143.00 km², AUC=0.997, Valor de corte=0.5).

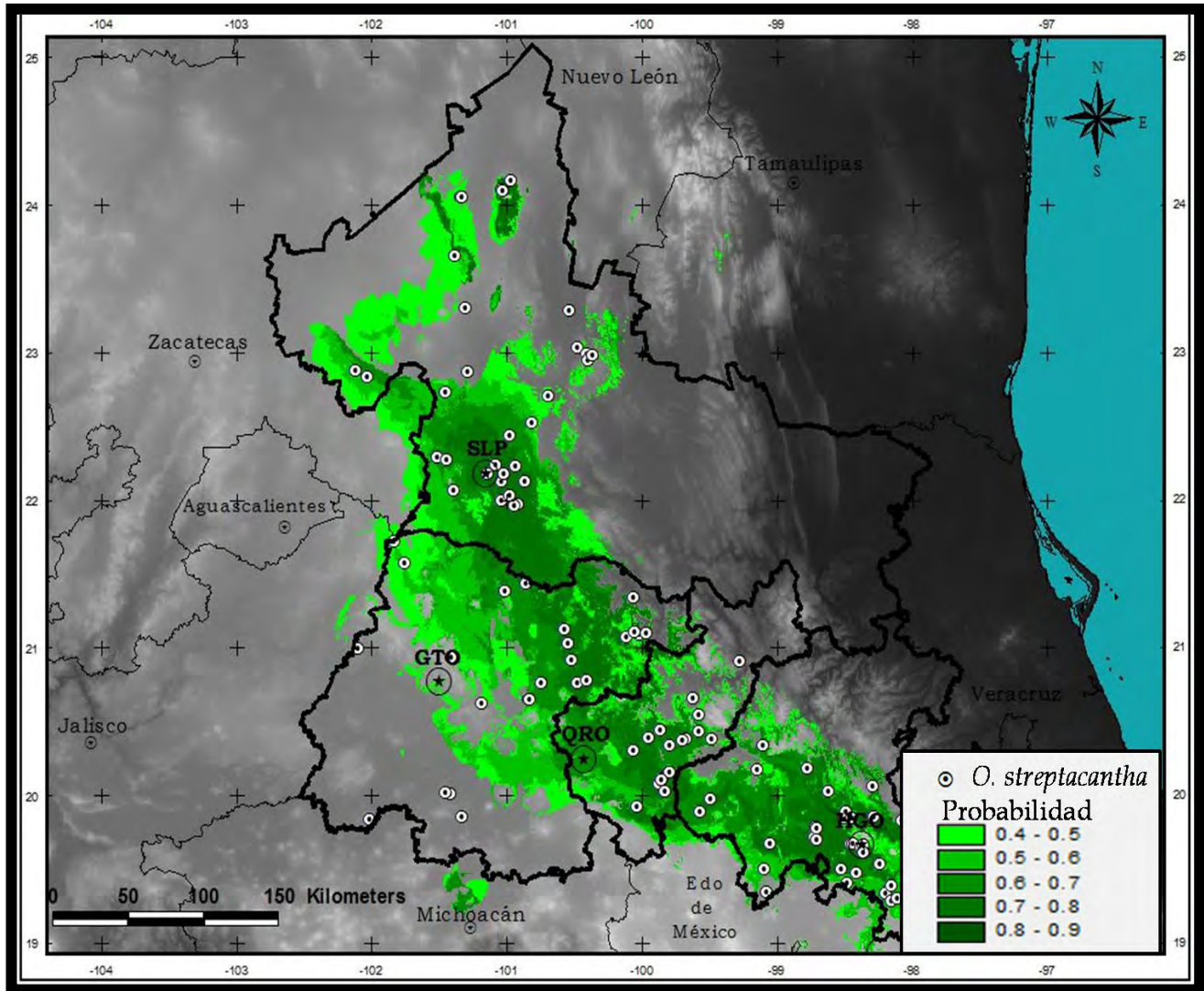
Opuntia streptacantha* LEMAIRE, *Cactearumgenera nova speciesque novae et omnium in horto Monvilliano cultarum: 62-63, 1839.

Tuna cardona, nopal cardón, nopal hartón, nopal de tuna colorada, cenizo, chaveño

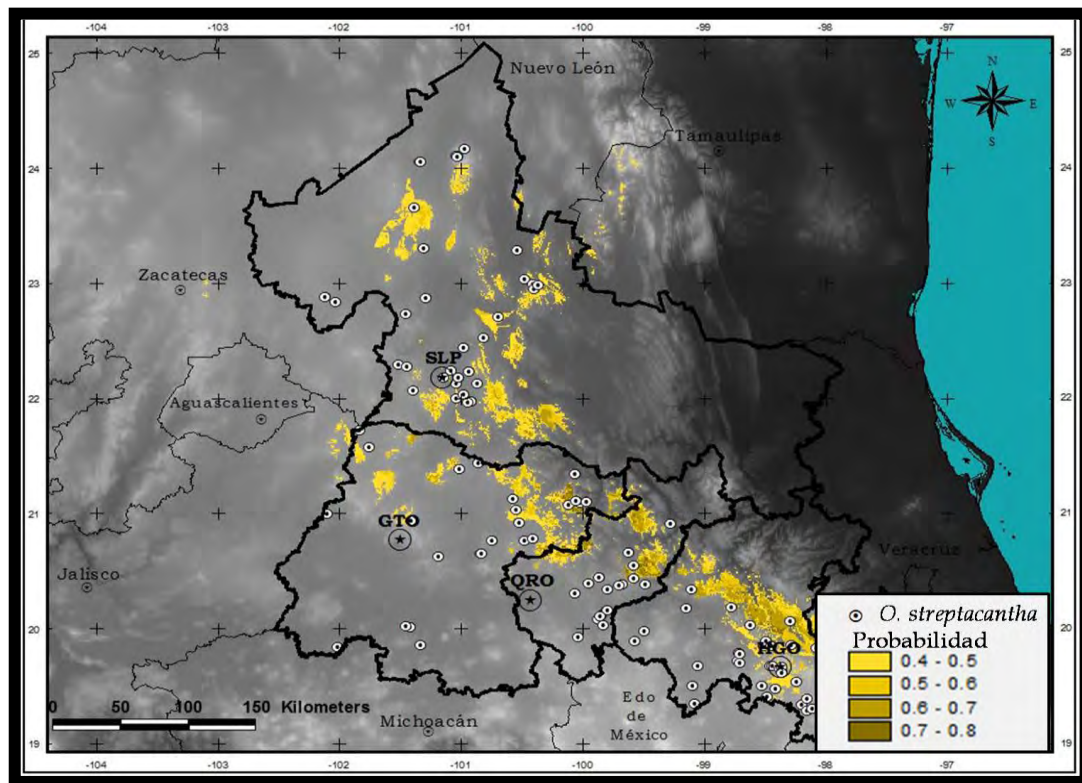
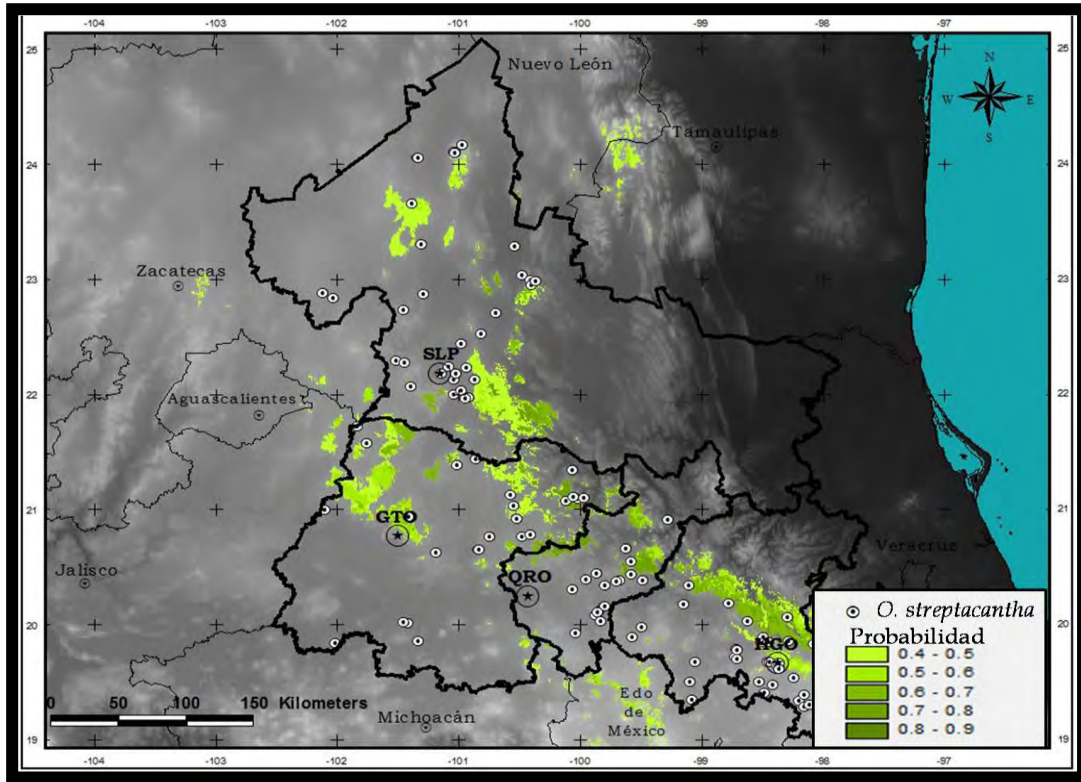
Distribución

Opuntia streptacantha es, con *O. leucotricha*, uno de los nopales arbóreos característicos de la zona árida del Altiplano. Se encuentra en los estados de Hidalgo, Querétaro, Guanajuato, San Luis Potosí, Aguascalientes y Zacatecas; por el sur llega hasta el Valle de México, cultivada o estado silvestre se le ha visto en Puebla y Oaxaca. Crece preferentemente en las laderas de los cerros, abanicos aluviales y en llanuras bien drenadas formando parte de la vegetación del matorral crasicaule, caracterizado por la abundancia de diferentes especies del género *Opuntia*, como el "duraznillo" *O. leucotricha*, "nopal de Castilla", *O. megacantha*, la "cuija" *O. cantabrigiensis*, el "nopal tapón" *O. robusta*, el "cardenche" *O. imbricata*, y diferentes especies de los géneros *Ferocactus*, *Mammillaria*, *Echinocactus*, etcétera, etcétera, cactáceas grandes o pequeñas que viven a la sombra que forma el "mezquite" *Prosopis juliflora*, la "gobernadora" *Larrea tridentata*, la "palma" *Yucca decipiens*, los diferentes "huizaches" *Acacia* sp., la "sangre de grado" *Jatropha dioica*, etcétera (Bravo, 1978: 327). Guzmán et al. (2003: 193), señalan su distribución también en los estados de Durango y Jalisco. Scheinvar (2004: 111), menciona su presencia en matorral xerófilo crasicaule y en pastizales, sobre suelos volcánicos, con una distribución desde Chihuahua y Coahuila hasta el estado de México.





Mapa 13a. Distribución Potencial Actual de *O. streptacantha* en la RCM (1,872.57 km², AUC=0.996, Valor de corte=0.4).

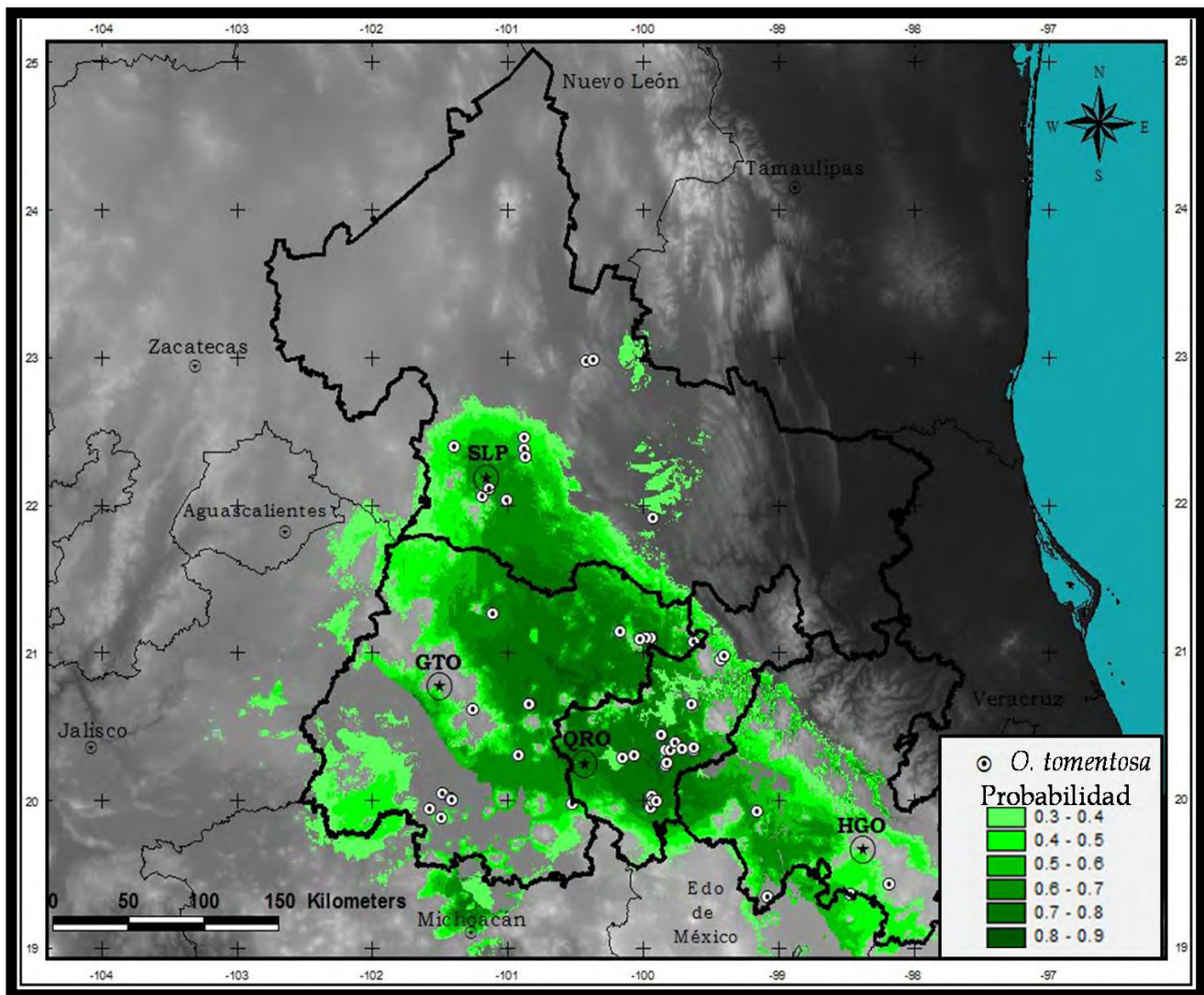


Opuntia tomentosa SALM-DYCK, *Observationes botanicae in horto Dickensi notatae. Anno 1822 3:8. 1822.*

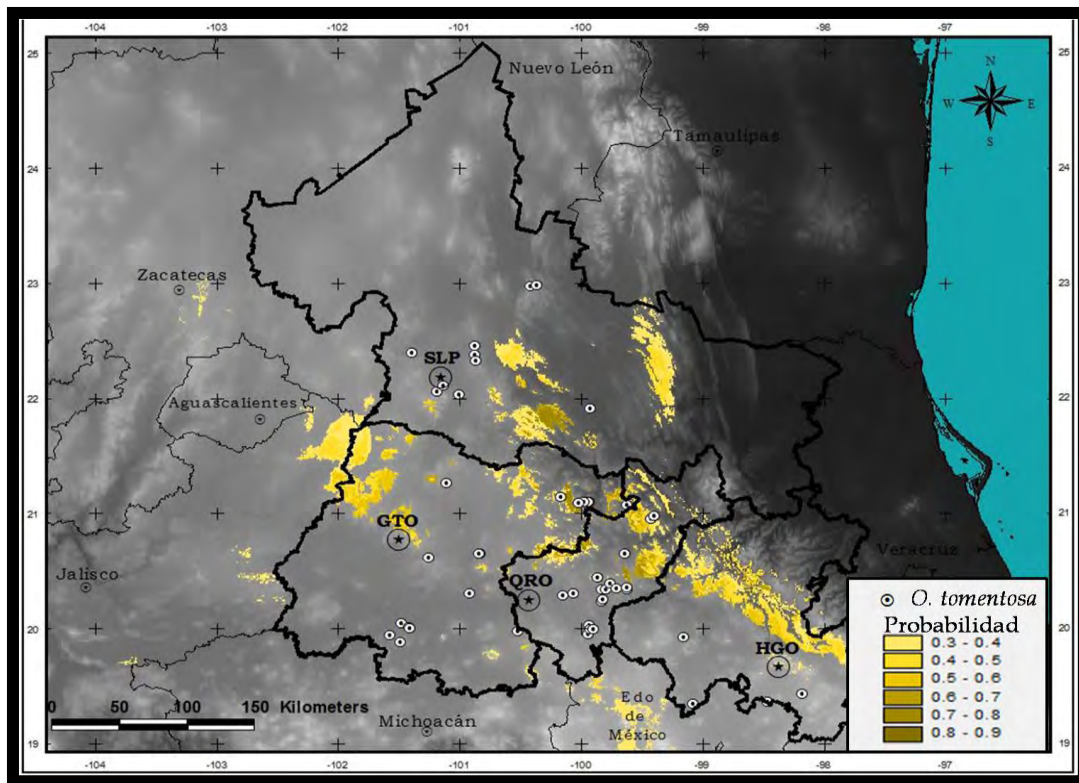
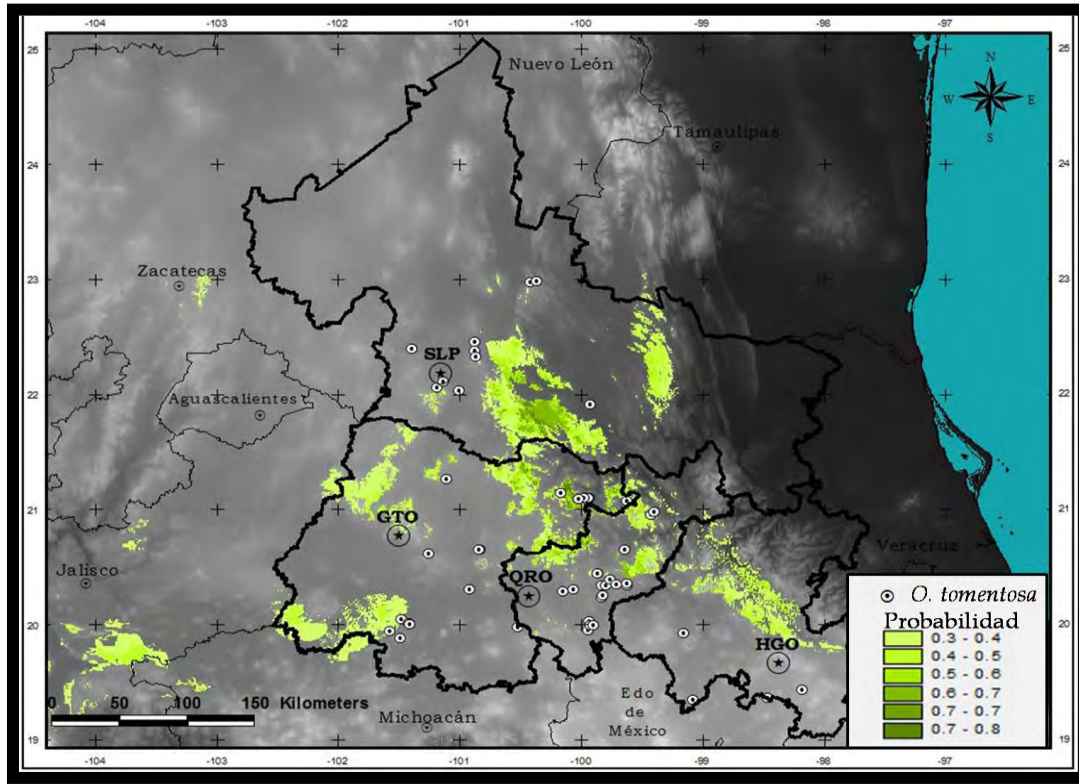
Nopal chacacuero, nopal de San Gabriel, lengua de vaca

Distribución

En México está reportada para el centro del país (Bravo, 1978: 307); en los estados de Guanajuato, Guerrero, Hidalgo, Jalisco, México, Michoacán, Morelos, Oaxaca y Distrito Federal (Guzmán et al., 2003: 195). En Jalisco se encuentra en los municipios de Arandas, Cuquíó, Colotlán, Tepatitlán, Valle de Guadalupe, Zacoalco de Torres y Zapopan. Habita en el bosque tropical caducifolio y pastizal (González et al., 2001: 67). Abundante en Querétaro (Scheinvar, 2004: 141).



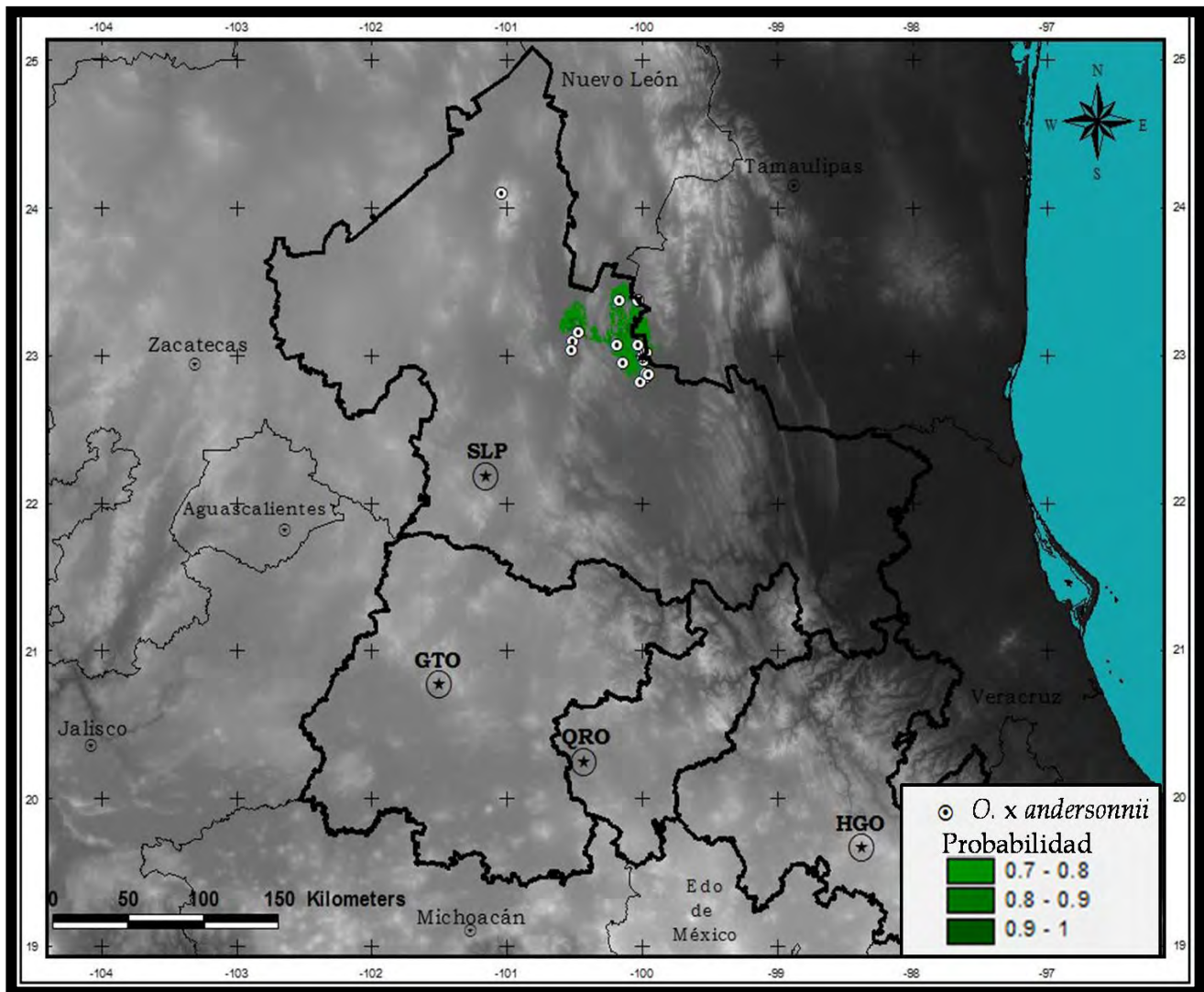
Mapa 14a. Distribución Potencial Actual de *O. tomentosa* en la RCM (22,218.65 km², AUC=0.995, Valor de corte=0.3).



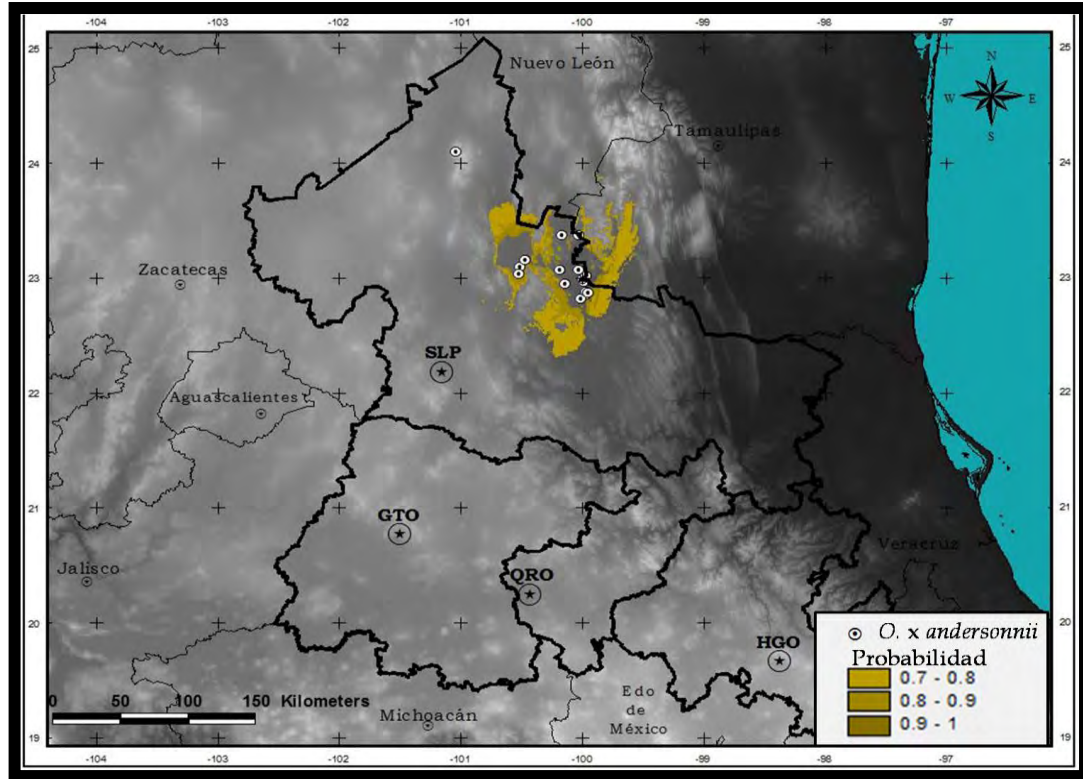
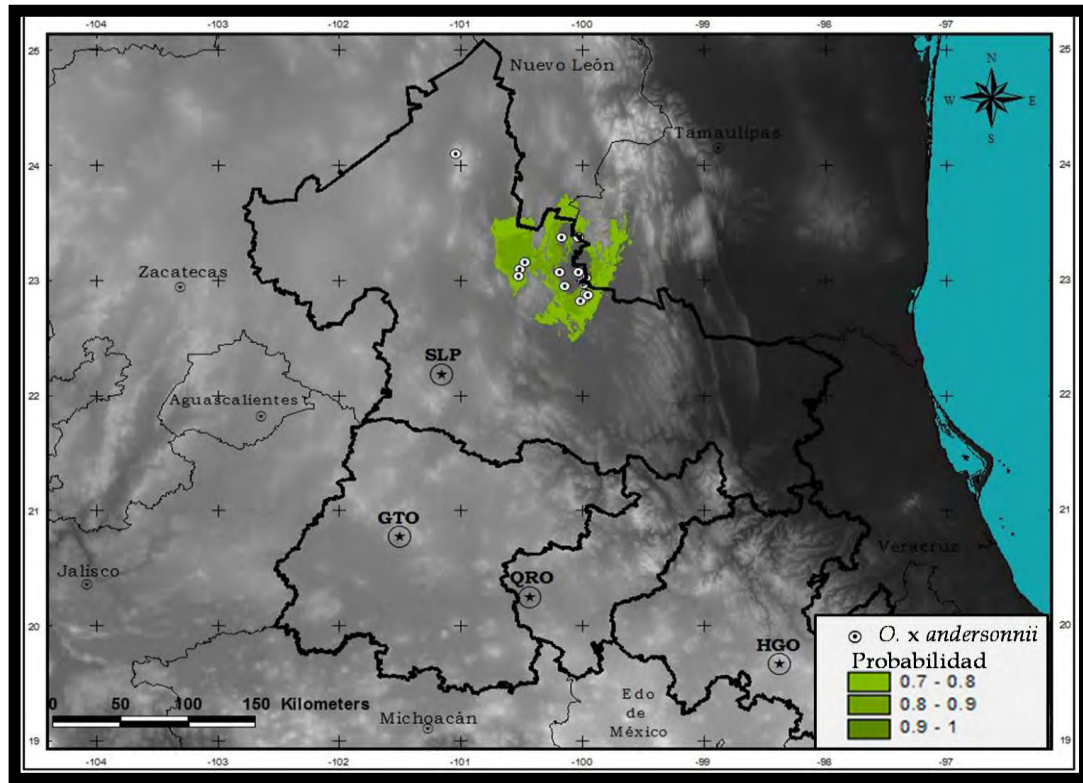
Opuntia x andersonii H. M. HERNÁNDEZ, C. GÓMEZ-HINOSTROSA ET R. T. BÁRCENAS, *hybr. Nov.* [= *O. engelmannii* Salm-Dyck ex Engelmann × *O. microdasys* (Lehmann) Pfeiffer], *Haseltonia*. 9:62-68. 2002.

Distribución

La población de *O. x andersonii* se han localizado en una compacta zona del sureste de la región del Desierto Chihuahuense, en rangos de altitudes de 1015 a 1575 msnm, en el norte de San Luis Potosí y sur de Tamaulipas. Hasta ahora se ha documentado la presencia de poblaciones del híbrido en 16 localidades dentro del municipio de Guadalcázar, San Luis Potosí y en el sur de Tamaulipas. Las poblaciones de *O. x andersonii* se encuentran en matorral xerófilo, sobre suelos profundos en llanuras aluviales dominadas por rodales muy densos de *Larrea divarica*, *Yucca filifera*, y *Prosopis juliflora*. (Gómez-Hinostrosa & Hernández 2000; Hernández *et al.* 2002).



Mapa 15a. Distribución Potencial Actual de de *Opuntia x andersonii* en la RCM (560.63 km², AUC=0.999, Valor de corte=0.7).

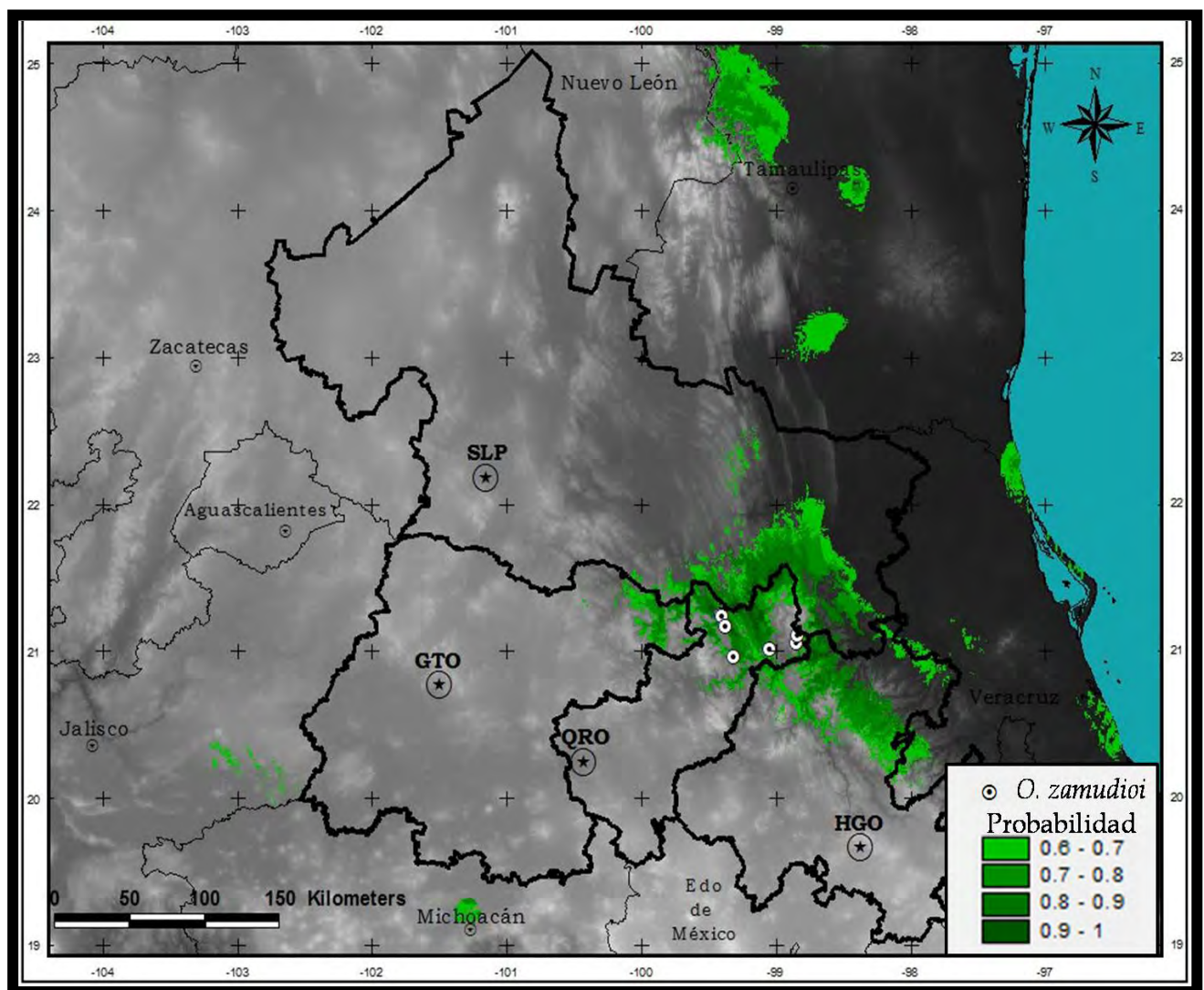


***Opuntia zamudioi* Scheinvar, Una nueva especie del Estado de Querétaro,
Cactáceas y Suculentas Mexicanas 44(4):88-93. 2000.**

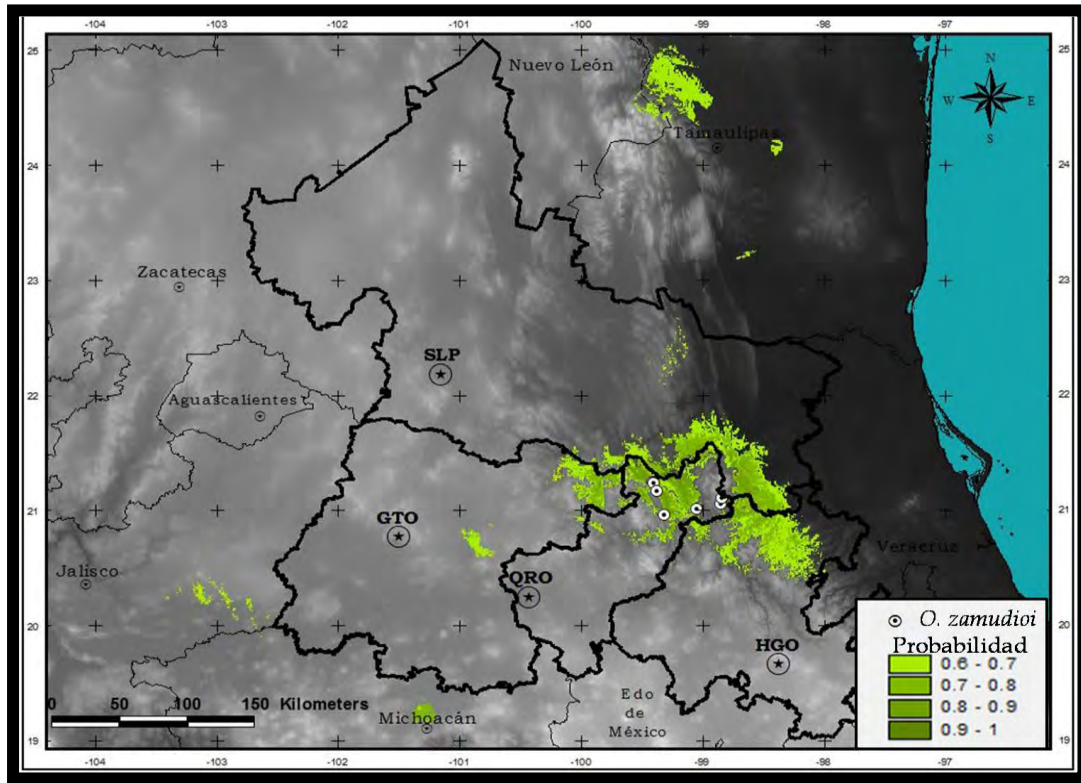
Xoconoxtle, los frutos son llamados duraznillos

Distribución y Abundancia

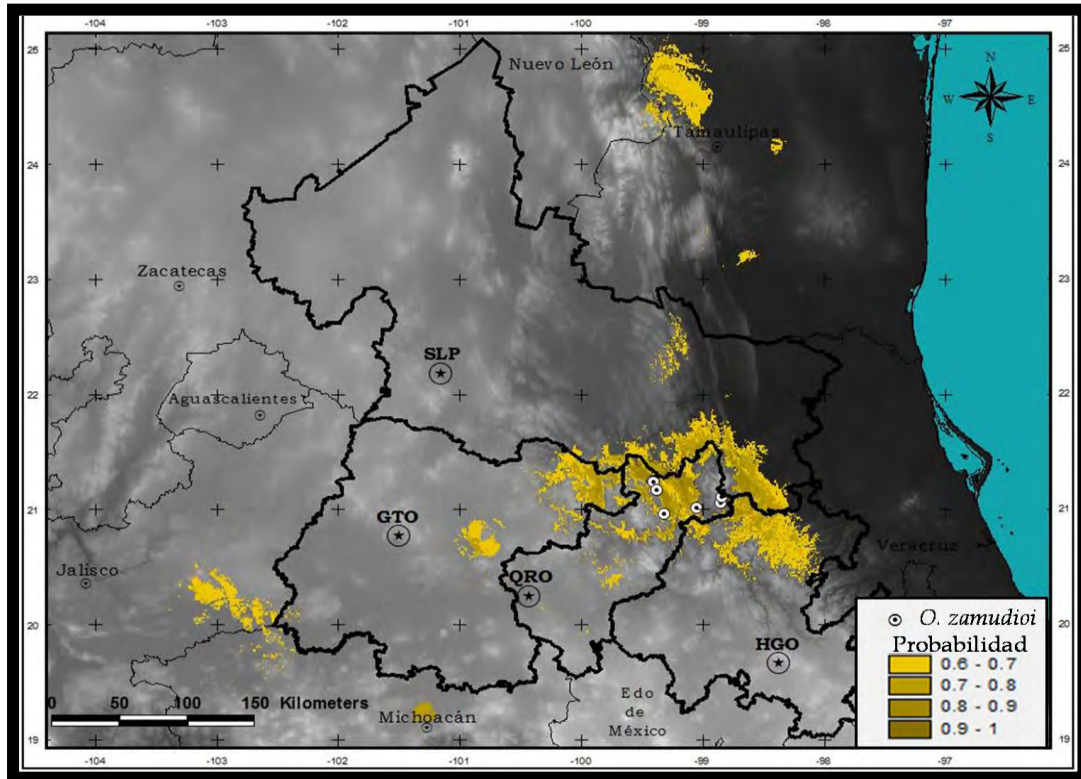
Municipio de León, Guanajuato. Se encuentran diversas poblaciones en el NE del Estado de Querétaro, municipio de Arroyo Seco, población de Ayutla, sobre los ríos Conca y Santa María, Landa de Matamoros, San Juan del Río, Jalpan en Querétaro y en Cadereyta cerca de *Strombocactus disciformis*. Habita en el bosque tropical caducifolio, matorral xerófilo micrófilo y bosque de pino-encino. Se desarrolla sobre dunas de los márgenes del río Conca, Bagres o Tampaón. La especie se distribuye desde los 650 en la localidad tipo alcanzando los 2400 msnm. Especie cuasiendémica al estado de Querétaro (Scheinvar, 1999; Scheinvar, 2004: 127).



**Mapa 16a. Distribución Potencial Actual de *O. zamudioi* en la RCM
(4,556.74 km², AUC=0.994, Valor de corte=0.6).**



Mapa 16b. Distribución de *O. zamudioi* al año 2050 en la RCM estimada a partir del modelo HadGEM1 (4,193.71 km², AUC=0.994, Valor de corte=0.6).



Mapa 16c. Distribución de *O. zamudioi* al año 2080 en la RCM estimada a partir del modelo HadGEM1 (5,509.12 km², AUC=0.994, Valor de corte=0.6).