

## Informe final\* del Proyecto HK040

### Evaluación de conservación de especies de Cactaceae en la Reserva de la Biosfera Tehuacán-Cuicatlán

**Responsable:** Dr. Oswaldo Téllez Valdés  
**Institución:** Universidad Nacional Autónoma de México  
Facultad de Estudios Superiores Iztacala  
División de Investigación y Posgrado  
Unidad de Biotecnología y Prototipos  
**Dirección:** Av. de los Barrios # 1, Los Reyes Iztacala, Tlalnepantla, Mex., 54090, México  
**Correo electrónico:** [tellez@unam.mx](mailto:tellez@unam.mx)  
**Teléfono, fax** 5623 1128; 5623 1134  
**Fecha de inicio:** Marzo 31, 2010  
**Fecha de término:** Agosto 13, 2015  
**Principales resultados:** Base de datos, Informe final, fotografías, cartografía.  
**Forma de citar\*\* el informe final y otros resultados:** Téllez Valdés, O., Dávila, P. y R. X. Álvarez. Evaluación de conservación de especies de Cactaceae en la Reserva de la Biosfera Tehuacán-Cuicatlán. Universidad Nacional Autónoma de México. Facultad de Estudios Superiores Iztacala. **Informe final SNIB-CONABIO proyecto No. HK040.** México D.F.

#### Resumen:

Entre las Cactaceae existen especies con distribución restringida que merecen especial atención. Este es el caso de cinco especies endémicas de los géneros Ferocactus (1) y Mammillaria (4), restringidas al Valle de Tehuacán-Cuicatlán, Puebla y Oaxaca, incluidas en la NOM-059-SEMARNAT-2001, CITES y UICN, bajo la categoría de Pr (sujeta a protección especial), debido a la escasa información sobre las especies. En este trabajo se determinará desde el punto de vista geográfico: 1) La extensión del área de la posible presencia de las especies, 2) El área de ocupación real de las especies (real y potencial - poblaciones/subpoblaciones), 3) Las "relaciones" geográfico-ambientales entre sus subpoblaciones (identificación de las características del hábitat (clima-topografía-suelo), 4) La calidad del hábitat con relación a las actividades humanas. Esta estimación geográfica se complementará con una ecológica, estimando: 1) El tamaño poblacional (5 localidades/poblaciones), 2) La estructura de tamaños, 3) La eficiencia reproductiva (flores, frutos, tasa de germinación), 4) la tasa de sobrevivencia de plántulas en condiciones controladas, y finalmente, 5) La diversidad y la estructura genética de las especies de Mammillaria.

- 
- \* El presente documento no necesariamente contiene los principales resultados del proyecto correspondiente o la descripción de los mismos. Los proyectos apoyados por la CONABIO así como información adicional sobre ellos, pueden consultarse en [www.conabio.gob.mx](http://www.conabio.gob.mx)
  - \*\* El usuario tiene la obligación, de conformidad con el artículo 57 de la LFDA, de citar a los autores de obras individuales, así como a los compiladores. De manera que deberán citarse todos los responsables de los proyectos, que proveyeron datos, así como a la CONABIO como depositaria, compiladora y proveedora de la información. En su caso, el usuario deberá obtener del proveedor la información complementaria sobre la autoría específica de los datos.

2014

# EVALUACIÓN DE CONSERVACIÓN DE ESPECIES DE CACTACEAE EN LA RESERVA DE LA BIÓSFERA TEHUACÁN-CUICATLÁN

INFORME FINAL DE PROYECTO HK040  
RESPONSABLE: OSWALDO TÉLLEZ VALDÉS

## RESUMEN

La NOM-059 enlista las especies que requieren atención especial debido a su estado de conservación a través del conocimiento de su distribución, de diversos aspectos ecológicos y del impacto que las actividades humanas causan sobre su hábitat. Algunos grupos han sido incluidos de forma precautoria (Cactaceae, Crassulaceae y Orchidaceae). Entre las Cactaceae existen especies con distribución restringida que deben de considerarse dentro de esta norma. Este es el caso de cinco especies endémicas de los géneros *Ferocactus* (1) y *Mammillaria* (4) restringidas al Valle de Tehuacán-Cuicatlán Puebla y Oaxaca. Estas especies han sido incluidas en la NOM-059-SEMARNAT-2010 bajo la categoría de Pr (sujeta a protección especial) debido a la escasa información existente sobre las especies o A (amenazada) si se considera en peligro de desaparecer. Así, existe la necesidad de reclasificarlas y asignarles un estatus de riesgo real cuando se cuente con información precisa que ayude a proponer medidas para su conservación. En este trabajo se determinó desde el punto de vista geográfico: **1)** la extensión del área de la posible presencia de las especies **2)** el área de ocupación real de las especies (real y potencial - poblaciones/subpoblaciones) **3)** las “relaciones” geográfico-ambientales entre sus subpoblaciones (identificación de las características del hábitat (clima-topografía-suelo) **4)** la calidad del hábitat con relación a las actividades humanas. Esta estimación geográfica se complementó con una ecológica, estimando: **1)** el tamaño poblacional (5 localidades/poblaciones) **2)** la estructura de tamaños **3)** la eficiencia reproductiva (producción de flores y frutos, tasa de germinación) y finalmente **4)** la diversidad y la estructura genética poblacional de las cuatro especies de *Mammillaria*. Las estimaciones previas fueron contrastadas contra la distribución espacial de las actividades humanas y su influencia sobre las localidades/poblaciones y el hábitat. Se consideró el efecto del cambio climático sobre la distribución de las especies en distintos escenarios y asimismo se evaluó el papel de las reserva en la conservación a largo plazo. Se estimó la diversidad y la estructura genética poblacional en cuatro especies de *Mammillaria*, debido a que se conocían los *primers* para este género de cactáceas. Desafortunadamente, no es el caso de *Ferocactus*, ya que que no se conocen los *primers* para amplificar regiones altamente variables (microsatélites), que permitan una apropiada descripción de los atributos genéticos poblacionales.

Palabras clave: Cactaceae, Cambio climático, Evaluación de conservación, Genética molecular, *Mammillaria*, *Ferocactus*, MER.

## OBJETIVOS

### OBJETIVOS GENERALES

Evaluar el estado de conservación de *Ferocactus haematacanthus*, *Mammillaria hernandezii*, *M. kraehenbuehlii*, *M. napina* y *M. huitzilopochtli* con base en los criterios establecidos en el Método de Evaluación del Riesgo de Extinción de Plantas en México (MER) de la NOM-059-SEMARNAT-2010.

### OBJETIVOS PARTICULARES

- Determinar la extensión del área de la posible presencia de las especies.
- Determinar el área de ocupación real de las especies.
- Determinar las posibles subpoblaciones existentes.
- Corroborar en campo los datos obtenidos con el SIG.
- Recabar datos con muestreos en las poblaciones o subpoblaciones.
- Estimar la extensión del área de la posible presencia de la especie (Extent of occurrence; EOO), y el área real de ocupación de la especie (Area of occupancy; AOO).
- Determinar la calidad del hábitat en relación con las actividades humanas.
- Realizar el conteo de los individuos en cinco poblaciones de las cinco especies propuestas.

- Determinar la estructura de tamaños en las poblaciones estudiadas.
- Describir la fenología y posibles polinizadores.
- Estimar la capacidad reproductiva de las especies (estimando tasa de producción de frutos semillas y germinación).
- Estimar la estructura y diversidad genética poblacional de *Mammillaria hernandezii*, *M. huitzilopochtli*, *M. kraehenbuehllii* y *M. napina* con la finalidad de establecer sus estatus genético de conservación.

## MARCO TEÓRICO

Cerca del 50% de las plantas vasculares del mundo ocupan áreas restringidas que han ido disminuyendo drásticamente en las últimas décadas debido a las diferentes actividades humanas. Por lo que una gran cantidad de especies se han considerado como amenazadas y muchas incluso podrían llegar a extinguirse a mediano plazo (Luna *et al.* 2004). Brooks *et al.* (2002 en Luna *et al.* 2004) consideran que algunas de las áreas megadiversas como Mesoamérica que comprende parte de Centroamérica y el sureste de México, particularmente los estados de Campeche, Chiapas, Guerrero, Michoacán, Oaxaca, Quintana Roo, Tabasco, Veracruz y Yucatán, podrían perder numerosas especies en los próximos años. Lo anterior demanda medidas urgentes para la conservación de la gran diversidad con la que cuenta el territorio mexicano. Una de estas medidas es la existencia de la Norma Oficial Mexicana-059, la cual engloba a las especies vegetales y animales legalmente protegidas y determina aquellas que están en peligro de extinción, amenazadas o sujetas a protección especial. Sin embargo, a pesar de que dicha norma contiene datos específicos de algunas especies, aún no existe un conocimiento profundo del estado de conservación de la gran mayoría de las especies que en ella se enlistan (Flores y Gerez 1994 en CONABIO 1998). Esto refleja la importancia que tiene la evaluación precisa del estado de conservación de ciertas especies siendo esto una condición necesaria para prevenir su extinción. Aunado a ello, la determinación del grado de riesgo del taxón con el cual se le atribuye un significado especial resulta una herramienta útil para este propósito (Vischi *et al.* 2004).

En México existe un porcentaje considerable de especies con distribución restringida. Estas especies pueden ser endémicas o bien de distribución marginal en el país. Ellas suelen ser más vulnerables a la extinción como resultado de actividades antropogénicas que destruyen o modifican el ambiente (Ceballos 2001). Entre los numerosos grupos biológicos existentes en el país, encontramos que cactáceas y crasuláceas son grupos de plantas con características biológicas y ecológicas muy particulares que las hacen vulnerables a diversos factores de perturbación naturales y humanos (Alvarez *et al.* 2004). Estas familias tienen altos porcentajes de endemismo a nivel genérico y específico. La familia Cactaceae está representada en México por 52 géneros (47%) y 850 especies (42% del total mundial) de los cuales 35% de los géneros y 84% de las especies son endémicas a México. El Valle de Tehuacán-Cuicatlán, en los estados de Puebla y Oaxaca, es una de las regiones con mayor diversidad de cactáceas en el país (Becerra 1997). Dentro de esta región queda comprendida la Reserva de la Biósfera Tehuacán-Cuicatlán (RBTC) que desafortunadamente les brinda protección parcial, ya que muchas de las especies habitan sitios cercanos a poblaciones humanas siendo afectadas también por sus actividades. Las especies de este grupo representan a menudo elementos importantes en algunas comunidades de plantas de la Reserva y presentan además patrones de distribución restringidos. Algunas especies de esta familia juegan también un importante papel social ya que son utilizadas como fuente de alimento, así como material para la construcción y combustible (Téllez y Dávila 2003).

Aunque en México el comercio de muchas especies de estas familias está restringida, la colecta ilegal es muy fuerte y esta practica las ha llevado a ser de los grupos de plantas en mayor peligro de extinción, ya que un porcentaje alto de ellas son endémicas restringidas. Las limitaciones en su distribución implica que estas plantas sean particularmente vulnerables a la destrucción de su hábitat (Becerra 1997). Se considera además que distintas especies de *Mammillaria* (por ejemplo *M. hernandezii*, *M. huitzilopochtli*, *M. kraehenbuehllii* y *M. napina*) y *Ferocactus haematacanthus* enfrentan factores de riesgo en algunas de sus poblaciones, debido a factores tanto naturales como humanos,

aunque los estudios sobre estos aspectos son escasos. Algunas especies de cactáceas son susceptibles a eventos naturales, como por ejemplo, heladas que impiden la reproducción, lo que aunado a limitaciones intrínsecas a la biología de algunas especies, pueden tener consecuencias negativas en el reclutamiento de nuevos individuos. Como se mencionó anteriormente, diversas actividades humanas, como la alteración o modificación del hábitat y el saqueo y comercio ilegal, son de las principales amenazas de origen antropogénico que disminuyen el mantenimiento de las poblaciones de cactáceas.

Aunado a lo anterior, Téllez y Dávila (2003) al examinar los efectos del cambio climático sobre los futuros patrones de distribución de algunas especies que se encuentran en la RBTC, encontraron que el intervalo de distribución de *F. haematacanthus* excede los límites del valle. Sin embargo en un escenario futuro en el cual la temperatura podría incrementarse 2 °C y la precipitación podría disminuir en un 10-15% con respecto a las actuales condiciones climáticas (aproximadamente el año 2060), su área de distribución muy probablemente se contraería un 50%, por lo cual sus límites de distribución quedarían prácticamente restringidos al valle.

Las especies seleccionadas para el presente estudio son endémicas restringidas al Valle de Tehuacán-Cuicatlán, en áreas reducidas de los estados de Puebla y Oaxaca. Cuatro de estas especies se encuentran dentro de la NOM-059-SEMARNAT-2010 bajo la categoría de Pr (sujeta a protección especial) (SEMARNAT 2010). Sin embargo esta categoría en la Norma es solo precautoria y está dada en casos en que la información existente de la especie sea escasa por lo que existe la necesidad de reclasificarla una vez que se cuente con la información necesaria, ya que en la actualidad esta clasificación deja a un lado el estatus de riesgo real en el que podría estar la especie. Por lo anteriormente planteado, se considera necesario generar información concreta y actual que permita conocer el estatus real de conservación de la mayor cantidad de especies como sea posible. Esto impone un reto importante debido a que la conservación de especies no se considera como una prioridad para distintos sectores académicos, políticos y sociales; por lo que los recursos necesarios para realizar investigaciones de largo plazo son escasos.

## ANTECEDENTES

En algunas poblaciones de las distintas especies se han observado evidencias importantes de colecta ilegal a lo largo de la última década, lo que ha disminuido su densidad poblacional. Lo anterior, aunado al impacto por los cambios en el uso de suelo, sugieren un incremento en el riesgo de conservación. A pesar de que existen estudios sobre algunas de ellas, éstos se realizaron cuando menos hace 7-8 años, en otros de los casos, los estudios abordan distintos aspectos que al ser integrados con el presente ayudarían a conformar una visión global mas adecuada sobre cada una de las especies. Finalmente existen casos de algunas de las especies que no han sido objeto de algún estudio. Independientemente de la información existente acerca de las distintas especies, es imprescindible el seguimiento y actualización constante del estatus de conservación de estas y de otras especies de cactáceas que pudieran estar en riesgo de extinción dentro del territorio nacional.

### *Ferocactus haematacanthus*

Es una especie endémica de la zona semiárida poblana en el Valle de Tehuacán-Cuicatlán. Se ha registrado en algunas localidades en el estado de Puebla como Santiago Nopala, Chapulco, Cañada Morelos, Cacaloapan y en los municipios de Quecholac y Zapotitlán. Crece sobre suelos calizos en elevaciones de 1800-2400 msnm (Arias *et al.* 1997). Florece entre marzo y junio, fructifica entre julio y noviembre.

Para esta especie se tiene un solo estudio enfocado en evaluar su estatus de conservación. Gutiérrez (2007) analizó datos sobre el estado poblacional en cuatro localidades de esta especie dentro del estado de Puebla. Reporta que las localidades cuentan con un tamaño poblacional de entre 51 a 206 individuos y un área de extensión menor a 0.25 km<sup>2</sup>. En ese estudio se aplicó el Método de Evaluación de Riesgo de Extinción de las Especies Silvestres en México (MER) en el que con base en modelación bioclimática determinó que la especie tiene una alta especificidad de hábitat en sitios en donde las condiciones ambientales son más húmedas y más frías, en las cimas de los lomeríos. Aunado a lo anterior, sugiere

que a pesar de que *F. haematacanthus* presenta un número de semillas por fruto relativamente alto, las pruebas de germinación mostraron bajos porcentajes. Estudios previos proponen ubicar a la especie en la categoría de “amenazada” (A) (Gutiérrez 2007), sin embargo, actualmente se encuentra en la categoría de “protección especial” (Pr) en la NOM-059-SEMARNAT-2010 y en el Apéndice II de la CITES (Inskipp y Gillett 2003). Por el momento esta especie no ha sido determinada por la UICN (UICN, 2012). Es necesario evaluar el estatus de conservación actual a partir de un mayor número de poblaciones de las 13 reportadas por los especialistas del grupo para definir el gradiente actual de distribución de la especie así como para obtener un mayor conocimiento sobre su ecología reproductiva. Para esta especie no se incluyó al análisis genético debido a que no existen los *primers* necesarios para realizar el análisis poblacional.

### ***Mammillaria hernandezii***

Es otra especie endémica de la zona semiárida dentro del Valle de Tehuacán-Cuicatlán, tiene una distribución restringida dentro de los municipios de Tepelmeme y Concepción Buenavista, exclusivamente en el estado de Oaxaca. Florece entre octubre y diciembre. Esta especie se encuentra en sitios con pendiente muy ligera y con la vegetación original totalmente alterada, la cual ha sido sustituida por un pastizal secundario de *Cynodon dactylon* y *Aristida adscensionis* probablemente originado por disturbio antropogénico. De acuerdo con estudios previos *M. hernandezii* tiene un crecimiento poblacional negativo (decremento poblacional) y esta tendencia solamente cambiaría en zonas que presentaran disturbio intermedio (Ureta 2006; Martorell y Peters 2008). Actualmente esta especie se encuentra en el Apéndice II de la CITES (Inskipp y Gillett 2003) y en la categoría de “sujeta a protección especial” (Pr) por la NOM-SEMARNAT-059-2010 (SEMARNAT 2010), sin embargo no ha sido determinada por la UICN (UICN, 2012). Su ficha disponible en la página de CONABIO (NOM-ECOL-059-2001), la cual fue elaborada por M. C. Mandujano en 2003, refiere una serie de datos muy interesantes e importantes; muchos de ellos tomados de referencias de estudios previos. Brinda una descripción general de la biología y de la distribución de *M. hernandezii* en Oaxaca, y menciona que ésta podría cubrir escasamente 40 ha. Una de las anotaciones más relevantes es que todas las poblaciones conocidas se encuentran dentro de la reserva lo cual desafortunadamente no es verdadero. En realidad todas las localidades están fuera de los límites de la reserva lo cual implica que la especie es proclive a sufrir variaciones en los impactos sobre sus poblaciones de acuerdo con factores locales de explotación, pastoreo, etc. que de ninguna manera son controlables por la dirección de la reserva.

La aportación de la presente propuesta con relación a los estudios previos radica en una actualización de la información de *M. hernandezii* después de haber pasado entre 5-8 años del último estudio publicado. Esto nos permitirá brindar un panorama actual y más completo, ya que a lo conocido hasta el momento se sumarán los resultados del presente estudio. Aquí, incluso se pretende abordar aspectos previamente no considerados (perfiles bioclimáticos, especificidad de hábitat, modelos de nicho ecológico, genética de poblaciones, efecto del cambio climático, etc.).

### ***Mammillaria huitzilopochtli***

Es endémica del Valle de Tehuacán-Cuicatlán. Su distribución esta restringida a zonas cercanas a Santiago Quiotepec y a San Juan Bautista Cuicatlán, en la región conocida como la Cañada Oaxaqueña. Se encuentra en elevaciones de 600-1000 msnm. Florece entre octubre y diciembre, fructifica entre diciembre y marzo (Arias *et al.* 1997).

Para esta especie se han realizado algunos estudios enfocados en el conocimiento de aspectos ecológicos básicos en las poblaciones. Flores-Martínez y Manzanero-Medina (2005) sugieren que la especie debería ser recategorizada en la próxima revisión de la NOM-059-SEMARNAT como “especie en peligro de extinción”. Proponen que la continuación de los estudios ecológicos y demográficos permitirá justificar de mejor manera la recategorización de esta especie. Actualmente esta especie se encuentra en la categoría de “protección especial” (Pr) (SEMARNAT 2010) y en el Apéndice II de la CITES (Inskipp y Gillett 2003) sin embargo no ha sido determinada por la UICN (UICN, 2012).

Para *M. huitzilopochtli* se han evaluado los patrones de germinación con semillas almacenadas, así como la capacidad de la especie para formar bancos de semillas y la sobrevivencia de las plántulas.

Flores-Martínez *et al.* (2008) encontraron que los requerimientos para la germinación de las semillas son mínimos ya que germinan rápidamente (dentro de los primeros 7 días) con humedad constante y sin necesidad de tratamientos de escarificación. Las semillas recientes alcanzan cerca del 90% de germinación aunque se determinó que el porcentaje final disminuye al aumentar la edad de las semillas. Se estimó que las semillas de *M. huitzilopochtli* son no-latentes y que su viabilidad en el suelo puede ser menor a 5 años. Debido a lo anterior los autores de dicho estudio sugieren que *M. huitzilopochtli* podría formar un banco de semillas transitorio. No obstante en este último aspecto no se evaluó la capacidad de la especie para formar bancos de semillas bajo condiciones naturales. A pesar de que las semillas de esta especie germinan de manera rápida y alcanzan altos porcentajes de germinación final se ha observado que las plántulas sobreviven solo pocos meses en condiciones naturales. Estudios previos reportan una mortalidad del 85% de las plántulas después de 15 días y del 100% después de 45 días, solo algunas de las plántulas sembradas debajo de arbustos sobreviven por un periodo de 3 meses (Flores-Martínez *et al.* 2008). Posteriormente, Flores-Martínez y colaboradores (2010) reportaron una tasa de crecimiento poblacional negativo (decremento poblacional) en dos poblaciones cercanas a Cuicatlán (Oaxaca), proponiendo además que dicho crecimiento solo podría incrementar al aumentar el reclutamiento en las poblaciones.

Al igual que para otras especies de cactáceas, es posible que para *Mammillaria huitzilopochtli* la etapa de establecimiento sea un periodo crítico en el ciclo de vida (Godínez-Álvarez *et al.* 2003) lo cual podría ser un factor que amenaza la permanencia de sus poblaciones. A pesar de la información existente, es necesario conocer otros aspectos básicos sobre la reproducción y el reclutamiento de nuevos individuos en condiciones naturales, además de que la genética poblacional podría esclarecer aspectos referentes al flujo genético dentro y entre poblaciones. Asimismo es fundamental conocer el número y tamaño actual de las poblaciones así como estimar la distribución total de la especie.

Se pretende tener un mayor conocimiento de las características ecológicas de otras poblaciones de *M. huitzilopochtli* cercanas a la localidad de Quiotepec de las que se tienen referencia por parte de los expertos del grupo y de la población local con la que en los últimos años se contó con un convenio de participación. Se incluyen los resultados obtenidos sobre los perfiles bioclimáticos de la especie, la especificidad de hábitat, los modelos de nicho ecológico, y el efecto probable del cambio climático sobre su distribución. Lo anterior sin contar con el estudio de genética molecular de las cinco poblaciones referidas.

### ***Mammillaria kraehenbuehlii***

Especie endémica del Valle de Tehuacán-Cuicatlán. Se distribuye en el estado de Oaxaca en zonas aledañas a Coixtlahuaca y Tepelmeme. Se encuentra en elevaciones de 1700-2500 msnm y florece entre abril y mayo (Arias *et al.* 1997). Para esta especie se tienen registros florísticos y estudios taxonómicos, es escasa la información relacionada con su ecología y propagación, la cual es necesaria para su conservación y manejo (Arias *et al.* 1997; Flores-Martínez *et al.* 2002). Actualmente se encuentra en la categoría de “protección especial” (Pr) de la NOM-059-SEMARNAT-2010 y no ha sido determinada por la UICN (UICN, 2012).

Flores-Martínez *et al.* (2002) reportan que para una población ubicada entre los municipios de Ixcatlán y Coixtlahuaca en la región Mixteca; los individuos de *M. kraehenbuehlii* se distribuyen espacialmente de manera agregada en microhabitats con pedregosidad media. Reconocen que posiblemente no exista una interacción evidente con otras especies de plantas y aparentemente no presenta problemas edáficos para establecerse en la zona. En experimentos de germinación obtienen valores mayores al 90% con distintos tratamientos de escarificación ácida aunque los valores del tratamiento testigo fueron similares sugiriendo que en condiciones naturales esta especie no presentaría problemas en la germinación de sus semillas. La densidad reportada en este estudio fue de 1.41 individuos en 10 metros cuadrados.

No obstante que se conocen algunos antecedentes sobre las características de las poblaciones de *M. kraehenbuehlii* es necesario determinar el área de ocupación para por lo menos otras tres poblaciones y de la misma forma estimar el área de distribución actual para toda la especie.

***Mammillaria napina***

Especie endémica del Valle de Tehuacán-Cuicatlán se distribuye en el estado de Puebla donde se conocen solo algunas poblaciones cercanas a Cañada Morelos, Tecamachalco, Azumbilla y Zapotitlán. Se localiza en altitudes de alrededor de 2000 msnm y florece entre abril y junio (Arias *et al.* 1997).

Esta especie crece sobre sitios planos que son preferidos sobre las pendientes y no depende de la presencia de plantas nodrizas para su establecimiento y desarrollo. Algunos autores han reportado que su crecimiento podría ser beneficiado por niveles de disturbio intermedio, aunque reconocen que la ganadería es una seria amenaza a la permanencia de sus poblaciones (Martorell y Peters 2008).

*M. napina* puede retener los frutos y semillas insertos en su tallo por más de un año, característica conocida como serotinia, y la cual es una estrategia observada en un reducido número de cactáceas y se atribuye a la variación ambiental: esta especie retiene el 5% de las semillas producidas a lo largo de su vida reproductiva y en consecuencia su capacidad germinativa incrementa ligeramente con la edad de las semillas (Rodríguez-Ortega 2008). Se ha encontrado que las semillas pueden permanecer viables después de 8 años aunque el porcentaje de germinación no rebasa el 25% (Rodríguez-Ortega 2008).

La especie puede presentar problemas intrínsecos a su biología relacionados con su capacidad reproductiva y de dispersión, lo que aunado a su vulnerabilidad al disturbio antropogénico y a la sobrecolecta pudiera poner en riesgo la permanencia de sus poblaciones. Actualmente se encuentra ubicada en la categoría de “amenazada” (A) en la NOM-059-SEMARNAT-2010 y en el Apéndice II de la CITES (Inskipp y Gillett 2003) sin embargo no ha sido determinada por la UICN (UICN, 2012).

## MATERIAL Y MÉTODOS

### ÁREA DE ESTUDIO

El área de estudio fue el Valle de Tehuacán-Cuicatlán (VTC) y zonas aledañas. Trabajos previos e incluso las fichas disponibles en la página web de CONABIO (<http://www.biodiversidad.gob.mx/especies/especies.html>) refieren que algunas de las poblaciones estudiadas se encuentran dentro de los límites de la reserva, lo cual no es correcto para todas las poblaciones, posiblemente causado por una referencias erróneas de ubicación de las localidades. Por lo anterior se consideran los límites del VTC como una mejor referencia.

### ASPECTOS GEOGRÁFICOS

Se recabó información importante sobre de mayoría de registros posibles para cada una de las especies seleccionadas de las bases de datos disponibles (CONABIO, MEXU, FES-I). Se visitaron entre 3 y 7 poblaciones de cada una de las especies estudiadas para realizar el conteo y georreferenciación, en los casos donde fue posible, de los individuos de cada una de las poblaciones. El trabajo de campo se llevó a cabo con el fin de verificar la información generada con el SIG.

Con los datos anteriores se calculó:

- La extensión del área de la posible presencia de la especie (Extent of occurrence, EOO). Es el área mínima dentro del límite continuo, la cual engloba todas las localidades conocidas del taxón. Ésta se calcula como el límite continuo más corto que engloba todos los puntos de distribución del taxón.
- El área real de ocupación de la especie (Area of occupancy, AOO). AOO es el área dentro de la extensión de la presencia (EOO) en donde la especie se ha registrado y a la cual se le asigna un área *a priori* basada en celdas de igual superficie. Esta área *a priori* se determinó como 1/10 del eje ortogonal más largo de la EOO. Así la AOO está determinada por el número total de celdas que ocupan una determinada área dentro de la EOO. Estos cálculos resolverán de manera completa el criterio A del MER el cual se refiere a la amplitud de la distribución del taxón en México.

- Las subpoblaciones

Son grupos dentro de la población que son geográficamente distintos. Para determinar las subpoblaciones se utilizaron los siguientes métodos:

a) Método de Adyacencia de las Celdas. Para este método se utilizaron las mismas celdas producidas para el cálculo de la AOO. Cada una de las celdas ocupadas por una colección de puntos se clasifica como una población distinta; excepto cuando las celdas son adyacentes entre sí (se tocan en cualquier punto), estas se consideran como una sola población.

b) Técnica de propinquidad promedio de Rapoport a partir de la cual se conectan todos los puntos de las localidades de las colecciones por su distancia más corta. Así se determina la distancia limbo promedio y las subpoblaciones son definidas como aquellos puntos que están separados por el doble de la longitud del limbo.

- El Impacto de las actividades humanas sobre el taxón.

Se utilizaron las cartas topográficas u otras coberturas temáticas en formato digital disponibles, las cuales fueron obtenidas a través del INEGI (<http://www.inegi.org.mx/geo/contenidos/topografia/>). A partir de ellas se evaluó de forma indirecta y general el posible impacto humano causado sobre las áreas cercanas a las poblaciones de cada una de las especies. Es decir se definió cuales localidades están siendo afectadas por la urbanización. Con la información obtenida por medio de este método, se estimó si la calidad del hábitat pudiera estar declinando; lo anterior fue verificado posteriormente mediante observaciones en campo, en aquellas poblaciones seleccionadas para realizar los muestreos.

- Modelos Bioclimáticos de distribución potencial.

La generación de modelos bioclimáticos nos permitió definir la porción del hábitat relacionada con el nicho concretado que la especie ocupa y que desde nuestro punto de vista está relacionado con una cierta especificidad que estas especies parecen tener hacia su hábitat y la cual es una de las características que las hace raras. Se generó el perfil bioclimático para cada una de las localidades y para el conjunto de todas ellas, lo que resultó el perfil de cada una de las cuatro especies. Este perfil permitió cuantificar el dominio climático (es decir el nicho climático o espacio en el cual se considera que una especie vegetal sobrevive bajo condiciones naturales) de la especie (Villaseñor y Téllez 2004). Se utilizaron 19 parámetros bioclimáticos y datos promedio mensuales de temperaturas máxima y mínima, y precipitación. Con este perfil se generó posteriormente el modelo de distribución potencial, el cual permite circunscribir la distribución geográfica de cada especie con base en la información del clima dentro del contexto geográfico. Esta información se utilizó, en conjunto con la obtenida por los demás enfoques, para determinar el estatus de conservación de las especies.

## **CARACTERÍSTICAS DE SUELO**

Se realizó un perfil de al menos tres de las propiedades que están más estrechamente ligadas con la distribución de las especies en cada localidad/población, éstas son, la textura, el pH y el contenido de materia orgánica. Los muestreos fueron relativamente superficiales, a 10 cm por debajo del nivel del suelo, lo cual no permite determinar el tipo de suelo, aunque sí su textura. Se colectó un determinado número de muestras dependiendo del área cubierta por cada una de las especies bajo estudio. Los análisis de las muestras de suelo fueron realizados en el Laboratorio de Edafología de la UBIPRO (FES Iztacala UNAM).

## ASPECTOS ECOLÓGICOS

Es importante señalar que estudios recientes realizados con distintas especies amenazadas han sugerido que, con el fin de tener un mayor conocimiento sobre el estado de conservación de las especies, es necesario obtener información sobre las etapas más críticas del ciclo de vida y cómo influyen en la tasa de incremento poblacional (Palmer 1987; Schemske *et al.* 1994). Para esto, algunas de las características más importantes que deben evaluarse incluyen variables vegetativas (i. e. el número o tamaño de las plantas) y variables reproductivas (i. e. el número de plantas que florecen y el número de flores o frutos por planta), como parte de los componentes mínimos para el conocimiento de la historia de vida en poblaciones de plantas (Palmer 1987). El estudio de las semillas, plántulas y plantas jóvenes representan ser mejores indicadores de los cambios demográficos que los datos basados sólo en los censos de los individuos reproductivos (Pavlik 1997). Asociado a lo anterior, en cactáceas se ha propuesto que la germinación y el establecimiento son las fases más críticas del ciclo de vida (Steenbergh y Lowe 1969). La sobrevivencia en estas etapas depende tanto de interacciones con otras especies de plantas y animales como de las características específicas del microhábitat (Godínez-Álvarez *et al.* 2003, Rojas-Aréchiga y Vásquez-Yanes 2000). Debido a lo anterior en el estudio de plantas raras y amenazadas sería necesario estudiar este tipo de características en distintas poblaciones para así obtener un mejor indicador del estado actual de conservación de la especie.

El presente estudio se adecuó a los objetivos principales de la convocatoria establecida por la CONABIO, en la que, entre otros lineamientos, establece la prioridad en la estimación de la situación actual de las especies listadas en la NOM-059-SEMARNAT-2010; en el presente estudio se revisaron aspectos geográficos, demográficos y genéticos que brindan una descripción general del estado actual de las poblaciones. Los métodos propuestos fueron basados en el tiempo establecido para realizar la investigación así como por la biología de las especies. Las cactáceas se caracterizan por presentar crecimiento lento, ciclos de vida largos y establecimiento de plántulas insuficiente; aunado a que en algunas de las especies que se estudiaron se ha reportado retención de semillas (serotinia) y/o dispersión limitada de éstas. El tiempo establecido para realizar la investigación, los objetivos principales, así como las características y distribución de las especies limitan la realización de estudios de largo plazo, p. ej. en estudios enfocados en determinar la tasa de crecimiento poblacional (i. e.  $\lambda$ ). Los métodos utilizados en el presente estudio para establecer el estado de conservación de especies de cactáceas han sido aplicados en estudios anteriores (Godínez 2002; Álvarez *et al.* 2004).

- Tipo de vegetación / Especies asociadas o acompañantes

Se describieron fisonómica y florísticamente las asociaciones vegetales a las cuales está ligada cada una de las especies bajo estudio en cada localidad, esto tiene relación con los criterios considerados por el MER para establecer sus categorías de riesgo. Se consideró como especie asociada o acompañante a las especies dominantes creciendo en el mismo hábitat que la especie bajo estudio. Lo anterior, para realizar un perfil descriptivo de su hábitat y de las probables interacciones ecológicas que podría presentar con otras especies, como pueden ser la competencia, depredación o facilitación. A su vez, permitirá de forma cualitativa determinar la calidad del mismo en una comparación de la tasa de presencia de especies primarias contra la de secundarias. En cada una de las localidades de las diferentes especies se realizó un listado florístico de las especies asociadas o acompañantes, dentro del área real de ocupación de cada especie. Los resultados de esta sección se utilizaron para determinar el criterio B del MER.

- Estructura de tamaños y densidad

Para conocer la situación actual en las poblaciones de las especies estudiadas se determinó la estructura de tamaños y la densidad. Se estudiaron estas características en 3-5 poblaciones de cada especie, el tipo de muestreo utilizado fue dependiente de la distribución de las plantas así como las condiciones y accesibilidad del terreno. Para *Mammillaria hernandezii* y *M. huiquilopochtli* se utilizaron cuadrantes de 1 m<sup>2</sup> tratando de incluir a la totalidad de individuos. Para *Mammillaria kraehenbuehlii* y *M. napina* se

utilizaron transectos de 500 m<sup>2</sup> (50 X 10 m) mientras que para *Ferocactus haematacanthus* se georreferenció cada individuo con GPS. Tanto para todas las poblaciones de *F. haematacanthus* así como para algunas poblaciones de *Mammillaria*, el número de individuos permitió estimar la densidad total, a través del conteo directo de los individuos. En el caso de que los individuos dentro de las poblaciones fueran inaccesibles (p. ej. en *M. huitzilopochtli* que crece en paredes de roca), el conteo de los individuos se realizó utilizando binoculares, y se estimó la densidad total. En todas las especies se georreferenció el perímetro que incluye a toda la población para calcular el área de extensión mediante SIG. En cada cuadro o transecto se contó el número total de plantas y se midió el diámetro de cada una de las ramas en caso de que estuvieran presentes. Se utilizó un vernier electrónico y flexómetro para medir el diámetro de las especies globosas y toneliformes, respectivamente. El tamaño total de cada individuo se estimó mediante la suma de todas las ramas, particularmente para *M. kraehenbuehlii* ya que es una especie con crecimiento cespitoso. Se establecieron las estructuras de tamaños para cada población de las diferentes especies, basándose en el rango total de los datos y en el número de individuos muestreados, con la finalidad de representar a todos los individuos en las poblaciones.

- Capacidad reproductiva

**Polinización.** Todas las especies estudiadas presentaron síndromes de polinización entomófila por lo cual es probable que los polinizadores efectivos pertenezcan al grupo Himenóptera (abejas o avispas); aunque se han registrado otros grupos que son menos “adecuados” para realizar tal función por su estructura corporal, como pequeños coleópteros, hormigas o abejas, mucho más grandes que quizá fungen como robadores de recursos. Las flores del género *Mammillaria* tienen un intervalo de tamaño de 3-5 cm de diámetro, sus flores son de color blanco-rosáceas a rojas o purpúreas. Producen gran cantidad de polen amarillo y néctar. Durante la época de floración se realizaron observaciones para conocer los principales organismos que visitan las flores de las especies. Se realizó la captura de las distintas especies visitantes a las flores mediante una red entomológica y con tubos aspiradores. Los insectos colectados fueron identificados por el Dr. Ricardo Ayala quien es especialista en Himenóptera y se encuentra en la Estación de Biología Chamela, de la UNAM.

**Fenología.** Se determinó la fenología de las especies (época de floración y fructificación) a través de información obtenida de la literatura y a través de observaciones de campo, en las cuales se contaron las flores y frutos de una muestra representativa, o de todos los individuos en las poblaciones (30-50 individuos). Se realizaron visitas regulares a las poblaciones (de entre 1 y 2 meses).

**Producción de frutos y semillas, germinación.** Se colectaron frutos maduros de al menos 15 plantas distintas, se estimó el número de semillas por fruto. Los frutos y semillas fueron almacenados en seco en bolsas de papel. Posteriormente se realizaron pruebas de laboratorio para determinar el porcentaje de germinación. Posteriormente se evaluó la germinación de las semillas con experimentos en laboratorio. Las semillas se desinfectaron con hipoclorito de sodio al 10% durante 3 minutos y se lavaron con agua corriente y agua destilada. La unidad experimental consistió en una caja de Petri con papel filtro y 25 semillas cada una. Para cada población de la que se colectaron semillas, se realizaron entre 5 y 10 repeticiones de acuerdo con el número de semillas colectadas. Las cajas se colocaron bajo condiciones controladas de temperatura, luz y humedad. La temperatura osciló entre 23-25 °C, con un fotoperiodo de 12 horas luz 12 horas oscuridad, con luz natural. Se adicionó agua destilada para mantener la humedad constante. Las cajas se revisaron cada día para contar el número de semillas germinadas. Se consideró una semilla germinada al observar la emergencia de la radícula.

Los frutos y semillas colectados se ingresaron al Banco de Germoplasma de la FES Iztacala. La información contenida en esta sección contribuyó a resolver el criterio C del MER el cual hace referencia a la vulnerabilidad biológica intrínseca del taxón.

## DIVERSIDAD GENÉTICA Y ESTRUCTURA POBLACIONAL

Esta parte del estudio se enfocó en las especies *Mammillaria hernandezii*, *M. huitzilopochtli*, *M. kraehenbuehlii* y *M. napina*. Las muestras usadas para el análisis genético poblacional para estas cuatro especies provienen de poblaciones naturales que fueron localizadas por este estudio. Para cada una de las cuatro especies estudiadas se colectaron en campo muestras de aproximadamente 0.5 cm<sup>2</sup> de tejido vegetativo del tallo de 14 a 20 individuos por población. En el caso de *M. huitzilopochtli*, *M. napina* y *M. kraehenbuehlii* se colectaron un total de 100 muestras de tejido de cinco poblaciones. Para el caso de *Mammillaria hernandezii* sólo se colectaron 24 muestras provenientes de dos poblaciones. Además, para esta especie, por el tamaño tan pequeño de su tallo (< 1 cm de longitud), se decidió colectar la flor en sustitución de tejido vegetativo de tallo. A partir del tejido vegetativo del tallo o de las flores, se aisló el ADN genómico total (ADNg) usando el mismo protocolo del DNA *easy plant kit* de Qiagen. Para confirmar que se tuviera ADNg, cada muestra se cargó en geles de agarosa al 0.8%, teñidos con bromuro de etidio, los cuales fueron visualizados con luz UV. Para estas cuatro especies se describieron la diversidad y la estructura genética a partir de cinco loci de microsatélites, amplificadas con la técnica de PCR, usando los oligonucleótidos previamente diseñados por Solórzano *et al.* (2009). Aunque para cada especie y cada locus se optimizó el ciclo de PCR, el ciclo base de amplificación fue de desnaturalización inicial de 94 °C por 3 min, y 35 ciclos que consistieron desnaturalización (94 °C por 10 seg), alineamiento (50-62 °C por 10 seg) y extensión (72 °C por 10 seg) y una extensión final a 72 °C por 5 min. Los reactivos usados para el PCR fueron de invitrogen, los oligonucleótidos sin fluorocromo se sintetizaron en el IBT, UNAM, en tanto que los marcados con fluorocromos NED o FAM se solicitaron a Applied Biosystem. Se comprobó la amplificación de cada locus de cada muestra en geles de agarosa al 1.2% teñidos con bromuro de etidio y visualizados con UV. La electroforesis de la reacción de PCR con oligonucleótido marcado se realizó en el secuenciador ABI 3100 del IB, UNAM. Los electroferogramas de microsatélites se analizaron con el program PeakScanner (Applied Biosystem) para obtener el tamaño de los alelos en pares de bases (pb) de cada muestra para cada locus de cada población y especie. Los análisis estadísticos se realizaron con el programa Arlequín (Excoffier *et al.* 2005). Los estimadores genéticos que se usaron para describir la diversidad y la estructura genética por población y para toda la especie fueron:

- 1) Heterocigosidad observada ( $H_o$  = número de individuos heterocigotos/ total de individuos analizados, Nei 1977).
- 2) Heterocigosidad esperada ( $H_E = 1 - \sum p_i^2$  donde  $p_i$  = frecuencia alélica, Nei 1977).
- 3) Diversidad alélica ( $N_a$  = número de alelos encontrados / total de loci analizados, Frankham *et al.* 2002).
- 4) Coeficiente de endogamia por cada población ( $F_{IS} = (H_e - H_o)/H_e$ , Wrigh 1951).
- 5) Coeficiente de endogamia para cada especie ( $F_{IT} = F_{IS} + [(F_{ST}) (1 - F_{IS})]$ , Wright 1951]
- 6) Diferenciación genética. Este parámetro se estimó entre cada par de poblaciones, así como el promedio para toda la especie (índice de diferenciación global), con el coeficient  $R_{ST}$  ajustado para marcadores de microsatélites (Michalakis & Excoffier 1996).
- 7) El flujo génico se estimó entre cada par de poblaciones, así como para toda la especie, ( $Nm = 1 - F_{ST} / 2 F_{ST}$ , Wright 1951).
- 8) Para aquellas especies en las que se analizaron más de dos poblaciones se realizó un Análisis Molecular de Varianza (AMOVA) con la finalidad de cuantificar el porcentaje de varianza proveniente de los datos jerarquizados dentro de las poblaciones, entre poblaciones y entre grupos de poblaciones.

## PRODUCTOS ENTREGADOS

La información generada durante el trabajo de campo y laboratorio; así como aquella que fue factible incorporar de la literatura, se integró en un archivo de hoja de cálculo del programa **EXCEL versión 2007**. La mayor parte de los datos que se registraron durante el proyecto son de tipo distinto a los geográficos-taxonómicos, motivo por el cual no se utilizó el programa BIOTICA. El uso de EXCEL permitió el manejo y organización de la información e incluso su análisis de forma más adecuada, los archivos de cada especie estudiada incluyen:

- Registros conocidos para las cinco especies.
- Información sobre las especies asociadas.
- Datos sobre su hábitat, suelo.
- Datos de los individuos que fueron censados, así como la estructura de tamaños en cada población.
- Datos sobre los números de flores frutos y semillas.
- Datos sobre la germinación de sus semillas.
- Estatus genético de las cuatro especies de *Mammillaria* aquí incluidas.
- El perfil bioclimático y el modelo de distribución potencial.
- Fotografías diversas de las especies de polinizadores.
- Tipos de vegetación.

Asimismo, se incorporó la siguiente información de acuerdo con los criterios del Método de Evaluación del Riesgo de Extinción de la Especies Silvestres en México (MER) de la NOM-059-SEMARNAT-2010 en forma de ficha semidetallada para su inclusión en la NOM-059. Para realizar la evaluación del estado actual de conservación se consideró el Anexo Normativo II de dicha Norma: Método de Evaluación del riesgo de extinción de plantas en México; bajo los siguientes criterios:

Criterio A: Características de la distribución geográfica.

Criterio B: Características del hábitat.

Criterio C: Vulnerabilidad biológica intrínseca.

Criterio D: Impacto de la actividad humana.

Se presentan las preguntas y el resultado obtenido para cada criterio y para cada una de las especies en el Anexo 1.

## RESULTADOS

Se presenta un resumen de los resultados obtenidos, los cuales se entregan de manera detallada en los archivos del programa Excel (versión 2007). En este informe de resultados se muestra información sobre el estado de conservación de cinco especies de cactáceas. Se presenta la distribución actual y potencial de sus poblaciones, datos generales sobre las características del hábitat y de las especies asociadas o acompañantes, así como de distintos aspectos ecológicos, genéticos y climáticos que afectan de manera directa el mantenimiento y distribución de sus poblaciones.

*Ferocactus haematacanthus***INFORMACIÓN TAXONÓMICA**

Reino: Plantae

División: Magnoliophyta

Clase: Magnoliopsida

Orden: Caryophyllales

Familia: Cactaceae

Nombre científico: *Ferocactus haematacanthus* (Salm-Dyck) Bravo, 1930.**DESCRIPCIÓN DE LA ESPECIE**

Son plantas simples, con tallos desde 30 a 120 cm de alto de 38 a 50 cm de ancho, de globosos a cilíndricos, de color verde oscuro; costillas 13-27, 2.8-5 cm de altura, rectas, ocasionalmente sinuadas con margen agudo; areolas 1.7-2.4 cm de largo, de 5 a 8 cm de ancho, de forma elipsoide, separadas entre sí por alrededor de 4 cm en plantas jóvenes, confluentes en plantas adultas. Tienen de 6 a 7 espinas radiales de 1 a 4.5 cm de largo, con la base roja y el ápice amarillo, aciculares y ligeramente flexibles. Tienen 4 espinas centrales de 4.7 a 8 cm de largo, tubuladas, semejantes y ligeramente aplanadas, son anuladas rectas y rígidas, de color rojo con el ápice amarillo. Flores de 5.9-7 cm de largo, ampliamente infundibuliformes, con pedicarpelo de 0.8-1.3 cm de largo y está cubierto por brácteas. El tubo receptacular es de 1.2-1.4 cm de largo, con cerca de 7.8 cm de ancho, oblanceolados, con el ápice ligeramente mucromado color rojo carmín. Esta planta tiene frutos de 2.2-3.5 cm de largo y de 1.8-3.4 cm de ancho, con formas de elipsoides a globosas, son de color púrpura, cubiertos de brácteas, la pulpa es jugosa, de color rojo-púrpura, son frutos indehiscentes. Las semillas son de 1.4-1.9 mm de largo, piriformes, negras (Arias *et al.* 1997).

**ASPECTOS GEOGRÁFICOS***Distribución*

Registros Conocidos

Estado de Puebla, México. Especie endémica del Valle de Tehuacán-Cuicatlán. Municipios: Chapulco, Cañada Morelos y Zapotitlán.

*Localidades estudiadas*

Cerro Chacateca, dentro del municipio de Zapotitlán Salinas. Chapulco, Cañada Morelos I, Cañada Morelos II, y Cañada Morelos III; dentro del municipio de Chapulco. Todas las poblaciones dentro del estado de Puebla. Los detalles sobre la ubicación de cada una de las localidades se encuentran dentro de los archivos de Excel.

*Impacto de las actividades humanas sobre el taxón*

Se han registrado distintas actividades humanas que podrían afectar la conservación de la especie, algunas de ellas son:

Chacateca: Festividad religiosa del 'día de la cruz' en la cual los pobladores de Zapotitlán Salinas realizan una peregrinación anual a la punta del cerro Chacateca. Se han encontrado además evidencias de pastoreo caprino y de tala de la palma *Brahea dulcis* de uso artesanal. Chapulco: Quema de la vegetación, agricultura de temporal. Cañada Morelos I, II y III: Las poblaciones se encuentran cerca (300-500 m) de la carretera federal 150; se observan zonas de cultivo abandonadas agricultura extensiva

y desmante. Se encontraron evidencias de tala de palma (*B. dulcis*). Las poblaciones de Chacateca y Chapulco se encuentran en la cima de cerros, en los cuales la accesibilidad no es tan fácil como en las otras poblaciones, esto puede disminuir los riesgos por colecta o daño causado por el ganado caprino, incluso el desmante es menor en estas poblaciones. Sin embargo, en el futuro estas poblaciones podrían estar amenazadas en el futuro, una evidencia de ello es el escaso número de plántulas observadas y la relativamente baja densidad de individuos en general.

***Área de ocupación real y potencial, mapas y perfil bioclimático.***

Se presenta a continuación el área de ocupación real y potencial para *F. haematacanthus*, así como su perfil bioclimático representado en 19 variables (Cuadro 1). Los aspectos anteriores fueron estimados a partir de los registro de 14 poblaciones o subpoblaciones de la especie.

Número de colecciones analizadas = 165.

EOO: 1386.25 km<sup>2</sup> - AMENAZADA (EN)

EOO: Diametro máximo: 77.2587 km<sup>2</sup>

AOO: Tamaño de la celda: 0.5 km<sup>2</sup>

Número de celdas: 24

AOO Área: 6 km<sup>2</sup> - CRITICAMENTE AMENAZADA (CR)

AOO: Número de subpoblaciones o poblaciones (Adyacencia de las celdas): 15

AOO: Índice de proximidad = 1.39494

Análisis de Rapoport: Área 27.4733 km<sup>2</sup>

Análisis de Rapoport: Número de subpoblaciones o poblaciones: 14

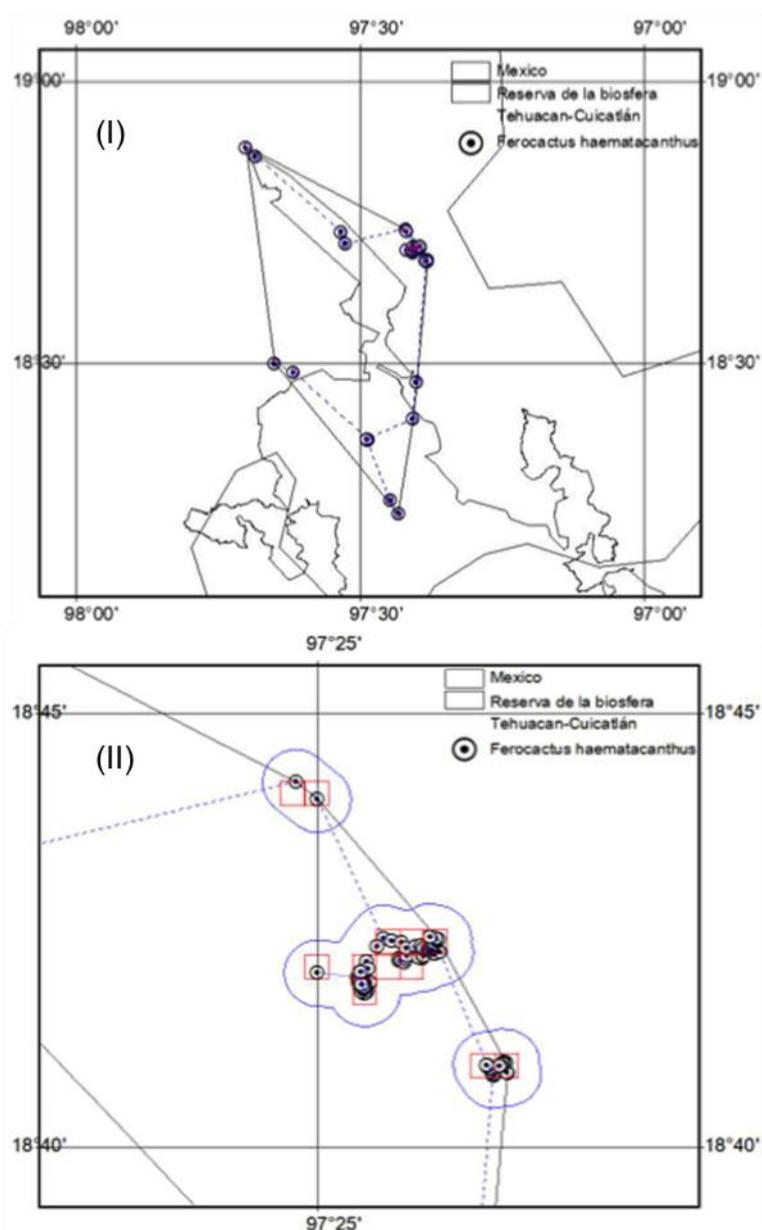


Figura 1. Modelo general geográfico de evaluación de la extensión del área de ocupación (EOO) (I) y de área de ocupación "real" (AOO) (II) de *F. haematacanthus*. Acercamiento mostrando detalles de las subpoblaciones más nororientales.

Cuadro 1. Perfil bioclimático de *Feroactus haematacanthus*.

Parámetro (unidades)	Valores (máx., mín., promedio $\pm$ error estándar)
Temperatura promedio anual °C	13.63-19.33 (14.37 $\pm$ 0.63)
Oscilación diurna de la temperatura °C	12.94-17.58 (14.30 $\pm$ 0.49)
Isotermalidad °C	0.64-0.71 (0.67 $\pm$ 0.01)
Estacionalidad de la temperatura (coeficiente de variación, %)	0.51-0.72 (0.56 $\pm$ 0.03)
Temperatura máxima promedio del periodo más cálido °C	24.63-31.29 (25.29 $\pm$ 0.73)
Temperatura mínima promedio del periodo más frío °C	2.35-7.97 (4.05 $\pm$ 0.61)

Oscilación anual de la temperatura °C	19.77-25.17 (21.24±0.57)
Temperatura promedio del cuatrimestre más lluvioso °C	14.53-20.88 (15.29±0.71)
Temperatura promedio del cuatrimestre más seco °C	11.59-16.44 (12.30±0.62)
Temperatura promedio del cuatrimestre más cálido °C	15.36-21.62 (16.24±0.66)
Temperatura promedio del cuatrimestre más frío °C	11.47-16.41 (12.15±0.57)
Precipitación anual mm	443.84-675.63 (561.53±30.58)
Precipitación del periodo más lluvioso mm	25.55-35.94 (28.51±2.37)
Precipitación del periodo más seco mm	0.31-1.92 (1.33±0.28)
Estacionalidad de la precipitación (coeficiente de variación, %)	81.07-94.13 (83.16±2.61)
Precipitación del cuatrimestre más lluvioso mm	225.94-346.66 (278.54±18.53)
Precipitación del cuatrimestre más seco mm	13.98-32.16 (28.92±2.33)
Precipitación del cuatrimestre más cálido mm	130.92-245.38 (147.77±13.40)
Precipitación del cuatrimestre más frío mm	14.36-34.6 (30.06±2.32)

## CARACTERÍSTICAS DEL SUELO

Se colectaron y analizaron muestras de suelo de cuatro localidades de *Ferocactus haematacanthus*, no fue posible coleccionar suelo de la localidad Chacateca, debido a que se nos impidió la entrada a investigadores y alumnos a esa localidad durante el 2011. El suelo en las poblaciones estudiadas de esta especie mostró similitudes en relación con los porcentajes de arenas, limo y arcillas. Las cuatro poblaciones presentaron altos porcentajes de arenas (60-76%), valores intermedios de limo (18-28%) y valores bajos de arcilla (6-12%). Cañada Morelos I tuvo suelo con textura arena francosa, mientras que Cañada Morelos II y Cañada Morelos III una textura franco arcillo-arenosa; y Chapulco textura franco-arenosa. Los detalles de los valores resultantes del análisis de 8 variables físicas y 9 variables químicas del suelo se entregan como material suplementario en archivos de Excel adjuntos.



Figura 2. Ganadería de temporal (izquierda) y vías de comunicación cercanas (derecha) en las poblaciones de *Ferocactus haematacanthus*.

## ASPECTOS ECOLÓGICOS

### *Tipo de vegetación y especies asociadas*

Agrupación de plantas arbóreas de zonas bajas (<1800 m de altitud). En las 5 poblaciones estudiadas predomina el Izotal de *Yucca periculosa*, donde las especies más abundantes son: *Agave potatorum*, *Leucophyllum pringlei*, *Jefea pringlei*, *Ephedra compacta*, *Mammillaria carnea*, *M. sphacelata*, *M. napina*, *Opuntia lasiacantha*. La información detallada sobre las especies asociadas o acompañantes en cada una de las localidades estudiadas se presenta en los archivos de Excel.

### *Densidad y estructura de tamaños*

Chacateca: Se registró una abundancia total de 28 individuos, con tamaños de entre 3 y 50 cm de diámetro y un tamaño promedio de  $26.18 \pm 2.17$  ( $\pm 1$  error estándar) cm de diámetro. Cerca del 60% de los individuos pertenecen a categorías de tamaño menores a 30 cm, las cuales podrían representar a los individuos juveniles y plántulas. La población abarca un área reducida de  $0.095 \text{ km}^2$ .

Chapulco: La densidad total de la población es de 31 individuos y la mayor parte de ellos (73%) presentan tamaños menores a 35 cm de diámetro. El área que delimita esta población es de  $0.64 \text{ km}^2$ .

Cañada Morelos I: Esta población tiene una densidad total de 27 individuos con tamaños de 27 a 47 cm de diámetro con un promedio de  $38.9 \pm 0.92$  cm de diámetro. La mayoría de los individuos de esta población (70%) tienen 35-45 cm de diámetro. Solo se registró un individuo con un tamaño menor a los 30 cm de diámetro. La población se encuentra incluida en un área de  $0.047 \text{ km}^2$ .

Cañada Morelos II: En esta población el número total de plantas es de 69, los cuales tienen un rango de tamaños de 18 y 49 cm de diámetro con un promedio de  $30.97 \pm 0.76$ . La mayoría de los individuos en esta población (75%) presentan tamaños de 18-35 cm de diámetro.

Cañada Morelos III: La población tiene un total de 49 individuos, que presentan tamaños de entre 15 y 55 cm de diámetro con un promedio de  $28.95 \pm 0.81$ . La mayoría de los individuos (95%) son menores a 35 cm de diámetro, sin embargo no se registraron plántulas.

A pesar de que es posible que exista reclutamiento en las poblaciones de *Ferocactus haematacanthus* estudiadas, este es infrecuente y la abundancia total es sumamente pobre, por lo que el mantenimiento y regeneración de la población podría ser limitada.

### *Fenología y visitantes florales*

Esta especie produce botones y flores entre marzo y abril, mientras que en mayo y junio se observa una gran cantidad de frutos maduros en las poblaciones estudiadas. De manera general se observa una gran cantidad de estructuras reproductivas en individuos mayores a 25 cm de diámetro. En la localidad de Cañada Morelos I se han registrado distintos insectos de los órdenes Coleoptera, Diptera e Hymenoptera visitando las flores de *F. haematacanthus*, los cuales podrían funcionar como polinizadores. En relación con las características morfológicas de las flores de esta especie, es probable que no presente problemas de polinización, dado que a pesar de que no se realizaron observaciones exhaustivas, se observó una gran cantidad de insectos visitando las flores durante la antesis. Los detalles de los visitantes florales se entregan dentro de los archivos de Excel. Esta especie presenta las características fenológicas y de estructura floral similares a otras especies de *Ferocactus*, para los cuales se han reportado síndromes de polinización melitófila (Mandujano *et al.* 2010), en los cuales las flores son frecuentemente polinizadas por himenópteros, así como por otras especies de insectos. El síndrome de polinización de esta especie puede ser considerado como generalista, no obstante, es necesario incrementar el conocimiento sobre este tema para distintas especies de cactáceas con forma de crecimiento similar.

### Capacidad reproductiva

Los datos obtenidos sugieren que *F. haematacanthus* no tiene limitaciones aparentes para la regeneración de sus poblaciones, no obstante es necesario realizar las evaluaciones pertinentes en todas las poblaciones conocidas, así como el seguimiento de plántulas e individuos juveniles bajo condiciones naturales. La producción de estructuras reproductivas en individuos adultos (>25 cm de diámetro) es alta. El número de semillas por fruto, así como la germinación, presentan variaciones en las distintas poblaciones: en la población de Chacateca se observó que el 38% de los individuos tuvieron estructuras reproductivas durante el muestreo. Las evidencias de reproducción se registraron en individuos mayores a 21 cm de diámetro. Los frutos de la población de Chacateca tienen en promedio  $203 \pm 18.4$  (promedio  $\pm$  e. e.,  $n=24$ ) semillas por fruto, éstas alcanzan cerca del 25% de germinación en condiciones controladas. En la localidad de Chapulco se observaron estructuras reproductivas en el 77% de los individuos, los cuales tuvieron tamaños mayores a 22 cm de diámetro. Los frutos colectados en Chapulco tienen un promedio de  $231.1 \pm 21$  ( $n=24$ ) semillas por fruto, pero bajos porcentajes de germinación (4%). Cañada Morelos I tuvo estructuras reproductivas en el 74% de sus individuos, presentando estructuras reproductivas sólo las plantas mayores a 32 cm de diámetro. Los frutos colectados tuvieron en promedio  $188.5 \pm 15.2$  ( $n=33$ ) semillas por fruto, pero 7.5% de germinación final. Cañada Morelos II mostró estructuras reproductivas en el 69% de las plantas, las cuales tuvieron tamaños mayores a 20 cm de diámetro. Sus frutos tuvieron un promedio de  $210,18 \pm 98,45$  ( $n=10$ ) semillas y registró solo el 11% de semillas germinadas. Mientras que en Cañada Morelos III el 71% de los individuos presentaron flores o frutos, en plantas mayores a 21 cm de diámetro. Con un promedio de  $373.1 \pm 25$  ( $n=24$ ) semillas por fruto y un porcentaje final de 20.5% de semillas germinadas.

De manera general, las semillas recientemente colectadas de *F. haematacanthus* presentan valores relativamente bajos de germinación, es probable que las semillas presenten latencia fisiológica – como en otras especies de la familia – como una estrategia para alcanzar las mejores condiciones para la germinación y crecimiento de la plántulas, sin embargo es necesario realizar experimentos detallados con la finalidad de comprobar estas ideas.



Figura 3. Individuos de *Ferocactus haematacanthus* con estructuras reproductivas.

## DIVERSIDAD Y ESTRUCTURA GENÉTICA

Para *Ferocactus haematacanthus* no se propuso en este estudio la evaluación poblacional de diversidad y de estructura genéticas debido a que actualmente no se cuenta con los oligonucleótidos de microsatélites para este género.

Cuadro 2. Valores finales estimados después de la aplicación del Método de evaluación riesgo de extinción de plantas en México (MER) para *Ferocactus haematacanthus*. La evaluación detallada de cada criterio se muestra en el Anexo I.

Criterio del MER	Información generada	Valor obtenido dentro del criterio del MER
A Características de la distribución geográfica	Mapa de distribución geográfica Mapa de distribución real y potencial	0.64
B Características del hábitat	Diagnóstico del estado actual de la calidad de su hábitat en relación con las actividades humanas	0.44
C Vulnerabilidad biológica intrínseca	Diagnóstico del estado actual de las poblaciones. Información fenológica	0.35
D Impacto de la actividad humana	Diagnóstico de los factores de riesgo y de la importancia relativa que presentan para la especie	0.4
		<b>1.83</b>

**Categoría propuesta de acuerdo con la evaluación del MER: En Peligro de Extinción (P). Vía directa: cuando demográficamente, el número total de individuos sea igual o menor que 500.**

*Mammillaria hernandezii***INFORMACIÓN TAXONÓMICA**

Reino: Plantae

División: Magnoliophyta

Clase: Magnoliopsida

Orden: Caryophyllales

Familia: Cactaceae

Nombre científico: *Mammillaria hernandezii* Glass & R.A. Foster, 1983.**DESCRIPCIÓN DE LA ESPECIE**

Son plantas de tallos simples, de 0.5 a 1.5 cm de alto y 2.5-3.5 cm de ancho, cortamente napiformes, subglobosos; con jugo acuoso. Tiene tubérculos de 4-5.5 mm de largo, con la base de 5-6 mm de ancho, son cónicos, de color verde oscuro, con axilas desnudas. Presentan areolas de 1-2 mm de largo, con forma oval, de 17-28 espinas radiales, de 1-2 mm de largo, tubuladas y pectinadas, radiadas no entrecruzadas, éstas son blancas y con espinas centrales ausentes. Sus flores son de color rojo-púrpura, de 1.4-2 cm de largo, infundibuliformes. Los frutos son de 3 mm de largo y 3 mm de ancho, de forma redonda, de color verde claro, parcialmente embebidos en las axilas de los tubérculos. Las semillas son de 1.2 mm de largo, con cerca de 0.7 mm de ancho, con forma de reniforme a piriforme, son negras con testa foveolada (Arias *et al.* 1997).

**ASPECTOS GEOGRÁFICOS***Distribución*

Estado de Oaxaca, México. Municipios de Concepción Buenavista, San Francisco Telixtlahuaca y Tepelmeme Villa de Morelos.

*Localidades estudiadas*

Cerro El Gavilán, Loma de la Biznaga, y Loma de la Estrella. Estas 3 localidades se encuentran dentro de los límites del municipio de Concepción Buenavista. Se registraron solamente 9 individuos en el sitio conocido como Calle de piedra, dentro del mismo municipio, no obstante, debido al bajo número de individuos, este lugar no se consideró como una población.

Se obtuvieron registros históricos de al menos dos poblaciones más dentro de los límites del municipio de Tepelmeme. Sin embargo, desde principios del 2009 hasta el final del estudio (2012), no se logró conseguir el permiso para acceder a esas poblaciones. Lo anterior, a causa de problemas socio-políticos que mantienen los pobladores, representados por el Comisariado de Bienes Comunales de esa entidad, con instituciones como SEMARNAT (en palabras de integrantes de este Comisariado). La comunidad, representada por este Comisariado, decidió no permitir la entrada de investigadores y/o alumnos de ninguna institución dentro de los límites de Tepelmeme para realizar cualquier tipo de estudio. Por esta razón, aunado a que la distribución de la especie es altamente restringida, no se logró el objetivo de estudiar cinco localidades de *M. hernandezii* como fue planteado al inicio del proyecto. Los detalles sobre la ubicación de cada una de las localidades estudiadas se encuentran dentro de los archivos de Excel.

***Calidad de hábitat, Impacto de las actividades humanas y amenazas***

El hábitat en donde se encuentra la especie está constituido de manera general por un suelo rocoso y somero con escasa vegetación. En la región existen extensas áreas en las cuales la cobertura vegetal ha sido eliminada casi en su totalidad quedando incluso la roca madre expuesta. El microhábitat puede ser específico, ya que se observó a los individuos de esta especie creciendo en islotes de suelo acumulado, rodeados por la roca madre, frecuentemente asociados con musgo y costra microbiótica. El hábitat en general se encuentra perturbado y es particularmente sensible a las lluvias torrenciales. No obstante, se ha mencionado que esta especie se asocia positivamente con sitios con disturbio intermedio (Ureta y Martorell 2009).

Aunado a que el hábitat podría ser hostil o limitante en las poblaciones estudiadas, se ha observado un incremento en la presencia de pequeñas excavaciones en el suelo, así como una reducción en el número de individuos observados entre 2007 y 2012. Estas evidencias sugieren que la colecta ilegal de plantas de esta especie puede ser elevada y podría presentar una seria amenaza a las poblaciones de seguir la tendencia actual. Es importante señalar que esta especie es muy codiciada por los coleccionistas de la familia Cactaceae, tanto nacionales como extranjeros. Asimismo, los estudios de campo realizados por al menos cinco investigadores de distintas instituciones, incluidos los autores del presente estudio, pudieran representar en algún momento una amenaza a las poblaciones de *M. hernandezii*. Lo anterior debido al escaso número de individuos existentes en las poblaciones conocidas así como el pequeño tamaño de las plantas, las cuales pueden ser dañadas por las actividades propias de la investigación; por ejemplo, las plantas pudieran ser susceptibles al pisoteo o a la sobrecolecta de frutos y semillas.

La presión ejercida por los colectores ilegales, así como por otras actividades humanas, deben de reducirse al máximo posible para la conservación de las poblaciones de esta especie. Existen poblaciones de *M. huitzilopochtli* dentro de los límites de la localidad de Tepelmeme en Oaxaca, en la cual, dentro del periodo 2009-2012, no han permitido la entrada a investigadores o alumnos de ninguna institución. Es posible que debido a estas restricciones las poblaciones de esta cactácea dentro del territorio de Tepelmeme estuvieran protegidas contra distintas actividades, pero sería importante corroborar esta idea en estudios de largo plazo, en conjunto con el Comisariado de Bienes Ejidales de esta localidad. Esta idea surge de lo observado en otras localidades dentro del Valle de Tehuacán, en las cuales la protección brindada por los habitantes locales ha permitido el mantenimiento exitoso de poblaciones de especies amenazadas.



Figura 4. Total pérdida del suelo en el hábitat de *Mammillaria hernandezii*, los individuos se ubican principalmente en aquellos parches dominados por *Cynodon dactylon*.

**Área de ocupación real y potencial, mapas y perfil bioclimático**

Se presenta a continuación el área de ocupación real y potencial para *M. hernandezii*, así como su perfil bioclimático representado en 19 variables (Cuadro 3). Los aspectos anteriores fueron estimados a partir de los registros de 11 poblaciones o subpoblaciones de la especie.

Número de localidades empleadas = 84.

EOO: 15.8638 km<sup>2</sup> - CRITICAMENTE AMENAZADA (CR)

EOO: Diametro máximo: 6.95326 km

AOO: tamaño de la celda : 0.4 km<sup>2</sup>

Número de celdas:16

AOO Área: 2.56 km<sup>2</sup> - CRITICAMENTE AMENAZADA (CR)

AOO: Número de subpoblaciones (Adyacencia de las celdas): 10

AOO: Índice de proximidad = 4.3529

Analisis de Rapoport: Area 1.19341 km<sup>2</sup>

Analisis de Rapoport: Número de subpoblaciones: 11

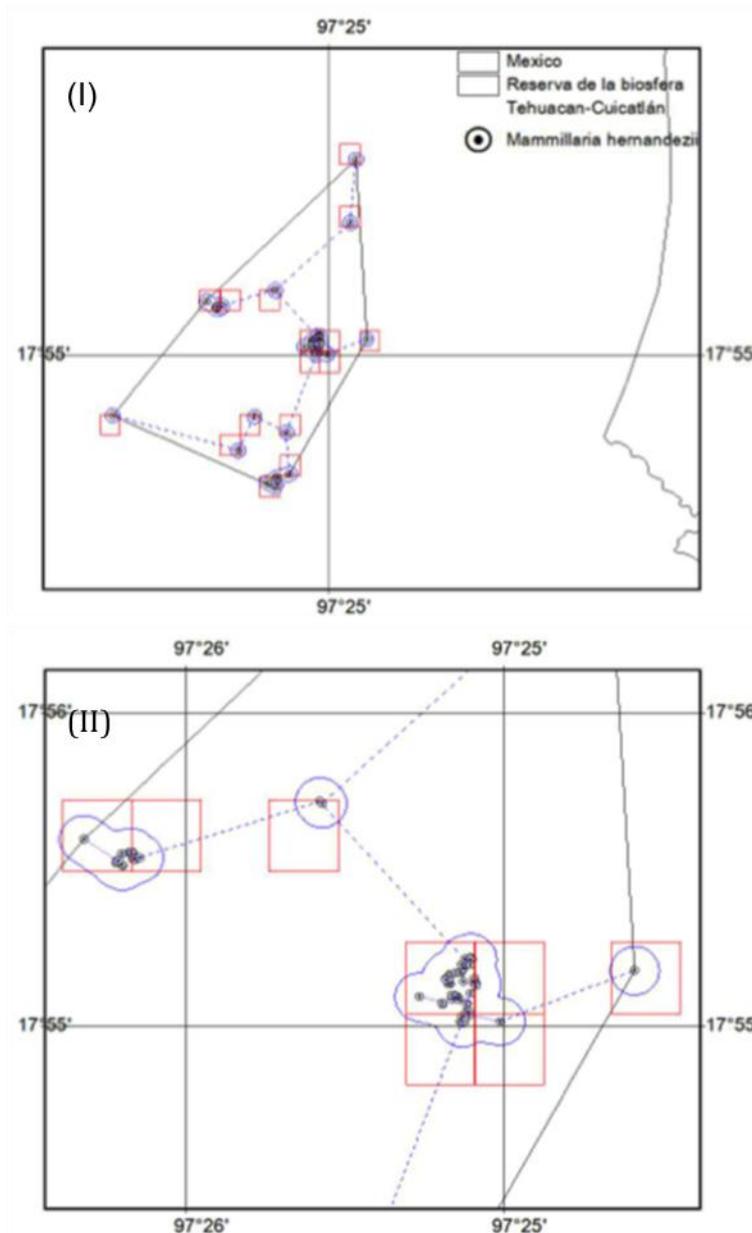


Figura 5. Modelo general geográfico de evaluación de extensión del área de ocupación (EOO) (I) y de área de ocupación "real" (AOO) (II). Acercamiento mostrando detalles de las subpoblaciones más centrales. Es importante notar que todas las localidades conocidas de *M. hernandezii* se encuentran fuera de los límites de la reserva.

Cuadro 3. Perfil bioclimático de *Mammillaria hernandezii*.

Parámetro (unidades)	Valores (mín., máx., promedio $\pm$ e. e.)
Temperatura promedio anual °C	15.9-17.5 (16 $\pm$ 0.13)
Oscilación diurna de la temperatura °C	14.1-14.8 (14.3 $\pm$ 0.07)
Isotermalidad °C	0.66-0.69 (0.68 $\pm$ 0)
Estacionalidad de la temperatura (coeficiente de variación, %)	0.50-0.55 (0.52 $\pm$ 0.01)
Temperatura máxima promedio del periodo más cálido °C	26.5-28.8 (26.7 $\pm$ 0.20)
Temperatura mínima promedio del periodo más frío °C	5.6-6.4 (5.7 $\pm$ 0.08)
Oscilación anual de la temperatura °C	20.8-22.4 (21 $\pm$ 0.16)
Temperatura promedio del cuatrimestre más lluvioso °C	16.8-18.1 (16.9 $\pm$ 0.14)
Temperatura promedio del cuatrimestre más seco °C	14.1-15.7 (14.2 $\pm$ 0.14)
Temperatura promedio del cuatrimestre más cálido °C	17.8-19.5 (18 $\pm$ 0.15)
Temperatura promedio del cuatrimestre más frío °C	13.9-15.3 (14 $\pm$ 0.12)
Precipitación anual mm	585-624 (615 $\pm$ 3.76)
Precipitación del periodo más lluvioso mm	34-37 (36 $\pm$ 0.49)
Precipitación del periodo más seco mm	0
Estacionalidad de la precipitación (coeficiente de variación, %)	93-98 (93 $\pm$ 0.50)
Precipitación del cuatrimestre más lluvioso mm	312-325 (317 $\pm$ 2.23)
Precipitación del cuatrimestre más seco mm	0
Precipitación del cuatrimestre más cálido mm	185-194 (189 $\pm$ 1.60)
Precipitación del cuatrimestre más frío mm	14-19 (19 $\pm$ 0.49)

## ANÁLISIS DEL SUELO

Se colectaron y analizaron muestras de suelo de las tres localidades estudiadas. El suelo de las tres poblaciones tiene textura franco arenosa, en el Cerro Gavilán está constituido por 68.4% de arena 24% de limo y 7.6% de arcilla; en Loma Biznaga tiene 64.4% de arena 24% de limo y 11.6% de arcilla; mientras que en Loma de la Estrella tiene 66% de arena 20% limo y 14% de arcilla. Se presentan en los archivos de Excel los resultados del análisis de 8 variables físicas y 9 variables químicas del suelo.

## ASPECTOS ECOLÓGICOS

### *Tipo de vegetación y especies asociadas/acompañantes*

La vegetación fue de manera general muy escasa en los sitios en donde se concentran las plantas, y se caracteriza por presentar pastizal de *Cynodon dactylon* y *Aristida adscensionis*. Una de las características

más relevantes en este sentido, y que afecta la abundancia de *M. hernandezii* en las localidades estudiadas, es que, cuando la dominancia de estos pastos es cercana al 100%, cubriendo el área como una carpeta compacta, no se registraron individuos de la especie bajo estudio.

### ***Densidad estructura de tamaños***

El Gavilán: Se registró una densidad promedio de  $6.9 \pm 0.99$  individuos por  $m^2$ , con un tamaño promedio de  $10.9 \pm 0.37$  ( $n=74$ ) mm de diámetro. Cerca del 77% de los individuos pertenecen a categorías de tamaño mayores a 9 mm, que representan a individuos juveniles y adultos. Por el contrario, menos del 8% de los individuos se encuentran en las categorías de tamaños menores a 5 mm, las cuales podrían considerarse como plántulas.

Loma de Biznaga: La densidad promedio de la población es de  $7.4 \pm 1.3$  individuos por  $m^2$  con un tamaño promedio de  $13.77 \pm 0.44$  ( $n=74$ ) mm de diámetro. Solo el 8% de los individuos pertenecen a categorías de tamaño menores a 10 mm las cuales representan a los individuos juveniles y plántulas.

Loma de la estrella: Esta población tiene una densidad promedio de  $2.47 \pm 0.31$  individuos por  $m^2$  con un tamaño promedio de  $14.9 \pm 0.59$  ( $n= 40$ ) mm de diámetro. La mayoría de los individuos de esta población (80%) pertenecen a categorías de entre 12 y 18 mm de diámetro y solo el 7.5% representan a individuos con tamaños menores a 10 mm.

La estructura de tamaños de las tres poblaciones, así como la densidad promedio, sugieren que el reclutamiento y regeneración pueden ser limitados en esta especie. El escaso número de poblaciones conocidas y su distribución incrementa la vulnerabilidad en esta especie.

### ***Fenología visitantes florales***

Esta especie florece entre octubre y diciembre, los registros históricos mencionan que la producción de frutos se presenta entre diciembre y enero. No obstante que se han realizado salidas periódicas desde el 2007 a esta población, solamente se han observado algunas plantas con flor, pero no se han registrado frutos en ninguna de las poblaciones. Las características de la estructura floral de la especie sugieren un síndrome de polinización melitófila, al igual que distintas especies de *Mammillaria*, es probable que al igual que otras cactáceas de formas globosas y tamaño pequeño, éstas sean visitadas por pequeños himenópteros, coleópteros y otros insectos (Mandujano *et al.* 2010).



Figura 6. Individuo de *Mammillaria hernandezii* con su probable polinizador.

### **Capacidad reproductiva**

La escasa producción de frutos y semillas en esta especie, incluso durante varios años, aunado a que *M. hernandezii* retiene los frutos en sus tallos por tiempo indefinido (serotinia), ha dificultado evaluar de manera precisa su capacidad reproductiva. Es probable que las características intrínsecas de su biología reproductiva, aunado a la perturbación del hábitat por actividades humanas, limiten la regeneración natural y el mantenimiento de sus poblaciones.

Reportes previos sugieren un decremento poblacional a lo largo de un estudio de tres años en las poblaciones ubicadas en Concepción Buenavista (Oaxaca), e indican que un incremento en la población sólo puede existir en sitios con perturbación intermedia (Ureta y Martorell, 2009).

### **DIVERSIDAD Y ESTRUCTURA GENÉTICA**

A partir del análisis de los dos sitios estudiados para la especie *M. hernandezii*, se estimó la heterocigosidad esperada y observada, en 0.65 y 0.58, respectivamente; y una diversidad alélica de 5.2. Los valores del coeficiente de endogamia indican que no hay endogamia significativa en la población Cerro El Gavilán, pero sí en la de Loma de Biznaga. A nivel de especie también se registran niveles moderados de endogamia ( $F_{IT} = 0.21$ ). Por otro lado, los resultados de diferenciación poblacional entre el par de poblaciones, y en este caso para la especie también, indican que no hay diferenciación genética significativa ( $R_{ST} = 0.08$ ), lo que se podría deber a los niveles de flujo altos ( $Nm = 5$ ) que se estimaron. El análisis de AMOVA para esta especie no se pudo realizar debido a que el número de poblaciones sólo fue de dos, lo que no permite agrupar los datos. La comparación de los resultados genéticos obtenidos en este trabajo está limitada porque las cactáceas globosas pequeñas han sido muy poco estudiadas. Comparados los resultados genéticos de *M. hernandezii* con los de *M. crucigera* (Solórzano *et al.* 2009) resultan contrastantes; ya que en esta especie se estimaron valores más bajos de heterocigosidad (0.31), pero una diversidad alélica casi dos veces mayor (8.9) que en *M. hernandezii*. Sin embargo, en *Astrophytum asterias*, también una cactácea globosa pequeña, se estimaron niveles relativamente altos de heterocigosidad (0.64) y valores bajos de diversidad alélica (6) (Terry *et al.*, 2012). Esta relación de alta

heterocigosis-baja diversidad alélica, han sido discutidos previamente por Allendorf (1986), quien sugiere que se debe a que en las poblaciones ocurrió un cuello de botella de corta duración. En el caso particular de *M. hernandezii*, se puede apoyar esa idea, aunque no se puede afirmar que ese cuello de botella ocurrió en un pasado reciente por causas antropogénicas, o hace miles de años quizá por cambios paleoclimáticos. Es posible que las dos poblaciones de *M. hernandezii* aquí analizadas representen remanentes de una población más grande que fue fragmentada en pequeñas poblaciones relativamente aisladas. Considerando nuestros resultados se recomienda que para la conservación a largo plazo de esta especie se evite disminuir aún más el tamaño poblacional y el de la cobertura de sus hábitats. Así como evitar el aislamiento geográfico entre las poblaciones remanentes.

Cuadro 4. Parámetros poblacionales de diversidad genética para *M. hernandezii*.  $H_E$  = heterocigidad esperada,  $H_O$  = heterocigidad observada,  $N_A$  = número promedio de alelos,  $F_{IS}$  = coeficiente de endogamia dentro de la población, el asterisco indica  $P < 0.05$ .

	$H_E$	$H_O$	$N_A$	$F_{IS}$
El Gavilán	0.61	0.57	4.5	0.06
Loma de Biznaga	0.70	0.46	5.2	0.14

Cuadro 5. Valores finales estimados después de la aplicación del Método de evaluación riesgo de extinción de plantas en México (MER) para *Mammillaria hernandezii*.

Criterio del MER	Información generada	Valor obtenido dentro del criterio del MER
A Características de la distribución geográfica	Mapa de distribución geográfica Mapa de distribución real y potencial	0.73
B Características del hábitat	Diagnóstico del estado actual de la calidad de su hábitat en relación con las actividades humanas	0.44
C Vulnerabilidad biológica intrínseca	Diagnóstico del estado actual de las poblaciones. Información fenológica	0.4
D Impacto de la actividad humana	Diagnóstico de los factores de riesgo y de la importancia relativa que presentan para la especie	0.7
		<b>2.27</b>

**Categoría propuesta de acuerdo con la evaluación anterior: En peligro de extinción (P)**

## *Mammillaria huitzilopochtli*

### INFORMACIÓN TAXONÓMICA

Reino: Plantae

División: Magnoliophyta

Clase: Magnoliopsida

Orden: Caryophyllales

Familia: Cactaceae

Nombre científico: *Mammillaria huitzilopochtli* D.R. Hunt, 1979.

### DESCRIPCIÓN DE LA ESPECIE

Son plantas simples, rara vez cespitosas, con ramificación dicotómica o basítona. Tiene tallos de 8 a 13 cm de alto y de 4 a 6 cm de ancho, y tienen forma globosa a cortamente claviformes, con jugo semilechoso, no espeso, blanco-amarillento. Sus tubérculos son de 5-7 mm de largo y de cerca de 5 mm de ancho, de forma cónica-cilíndrica, de color verde oscuro, tienen axilas con lana sólo en la zona fértil, areolas de 1-2 mm de largo, elípticas. Tiene de 14 a 30 espinas radiales, de 2-3.5 mm de largo de forma acicular rectas de color amarillento, llega a tener 2 espinas centrales o ninguna. Sus flores son de 1.2 a 1.7 cm de largo, infundibuliformes, de color rojo carmín con base de color verde claro. Los frutos son de 1.5 a 2.5 cm de largo, y cerca de 5 mm de ancho, claviformes de color rojo. Sus semillas son de 0.7-0.8 mm de largo, reniformes (Arias *et al.* 1997).



Figura 7. Individuo de *Mammillaria huitzilopochtli* con fruto.

### ASPECTOS GEOGRÁFICOS

#### *Distribución*

Estado de Oaxaca, municipios de San Juan Bautista Cuicatlán y Santa María Tecomavaca.

### ***Localidades estudiadas***

Se estudiaron las poblaciones de Barranca del Huaje, Cuicatlán, El Cacahuatal, Ruinas, y Santiago. Además de que se presenta información relevante para el conocimiento de la especie de dos poblaciones no consideradas al inicio del estudio, las cuales fueron localizadas en la fase final de éste: Barranca del Cozahuico y El Mezquite. Para estas dos últimas poblaciones no se realizó un estudio de la genética poblacional. La ubicación de algunas de las poblaciones no han sido reportadas en estudios previos y esto se logró gracias al apoyo del Comité Ecoturístico y de Vigilancia de la comunidad de Tecomavaca (Oaxaca).

### ***Calidad de hábitat, Impacto de las actividades humanas y amenazas***

Dentro del periodo en el cual se realizaron monitoreos a las poblaciones de esta especie (2008-2012), la mayoría de ellas han sido protegidas localmente, y de manera sistemática por el personal de los respectivos Comisariados de Bienes Comunales y por los Comités Ecoturísticos y de Vigilancia de Santiago Quiotepec y de Santa María Tecomavaca. Se ha observado que por lo menos desde el 2008 este tipo de protección ha sido exitosa, ya que ha mantenido la densidad poblacional y la conservación del hábitat de esta especie; y al mismo tiempo ha representado un atractivo de interés turístico, ecológico y científico. Este tipo de protección también ha beneficiado a las comunidades en las que se encuentra *M. huitzilopochtli* junto con otras especies amenazadas. La población Cacahuatal, a pesar de que se encuentra dentro de la zona de Conservación del Comisariado de Quiotepec se encuentra lejos de su área de influencia por lo que el acceso a las plantas puede ser menos limitado que en las poblaciones cercanas al poblado de Quiotepec. No obstante, las plantas que crecen en esta población se encuentran en áreas de difícil acceso, lo que podría evitar en cierta medida la colecta de plantas. De manera general, las poblaciones de *M. huitzilopochtli* que se ubican dentro de los límites de Quiotepec (Oax.) se encuentran en riscos o acantilados de rocas, que pueden tener mas de 100 metros de altura, lo que evita el acceso a las plantas. El microhábitat en el que crecen son las grietas de las rocas, fenómeno que Peters *et al.* (2008) han descrito como roca-nodriza y que puede ser común para distintas especies de *Mammillaria* y otras cactáceas con similar forma de crecimiento.

Por otro lado, la población Cuicatlán se encuentra expuesta a las actividades humanas, ya que se encuentra a poca distancia de la Cabecera Municipal y a la carretera hacia Santa María Papalo. El hábitat en esta población puede considerarse como hostil, ya que cerca de este poblado el cambio en el uso de suelo es frecuente, ya que hay desmonte para incrementar las zonas de cultivo y pastoreo, así como el incremento desordenado de los límites del pueblo. Además, la misma cercanía al pueblo y a la carretera podría facilitar la colecta de plantas. Por lo tanto, esta última población de *M. huitzilopochtli* puede estar expuesta a la extinción local debido a la escasa densidad de sus individuos.



Figura 8. Hábitat de *Mammillaria huitzilopochtli*, sobre acantilados de roca con suelo muy somero.

### *Área de ocupación real y potencial, mapas y perfil bioclimático*

Se presenta a continuación el área de ocupación real y potencial para *M. huitzilopochtli*, así como su perfil bioclimático representado en 19 variables (Cuadro 6). Los aspectos anteriores fueron estimados a partir de los registros de 10 poblaciones o subpoblaciones de la especie.

Número de localidades = 48

EOO: 98.9275 km<sup>2</sup> - AMENAZADA (EN)

EOO: Diámetro máximo: 23.1105 km

AOO: tamaño de la celda: 0.7 km<sup>2</sup>

Número de celdas : 22

AOO Área: 10.78 km<sup>2</sup> - AMENAZADA (CR)

AOO: Número de subpoblaciones (Adyacencia de las celdas): 12

AOO: Índice de proximidad = 4.61844

Análisis de Rapoport: Área 23.254 km<sup>2</sup>

Análisis de Rapoport: Número de subpoblaciones: 10

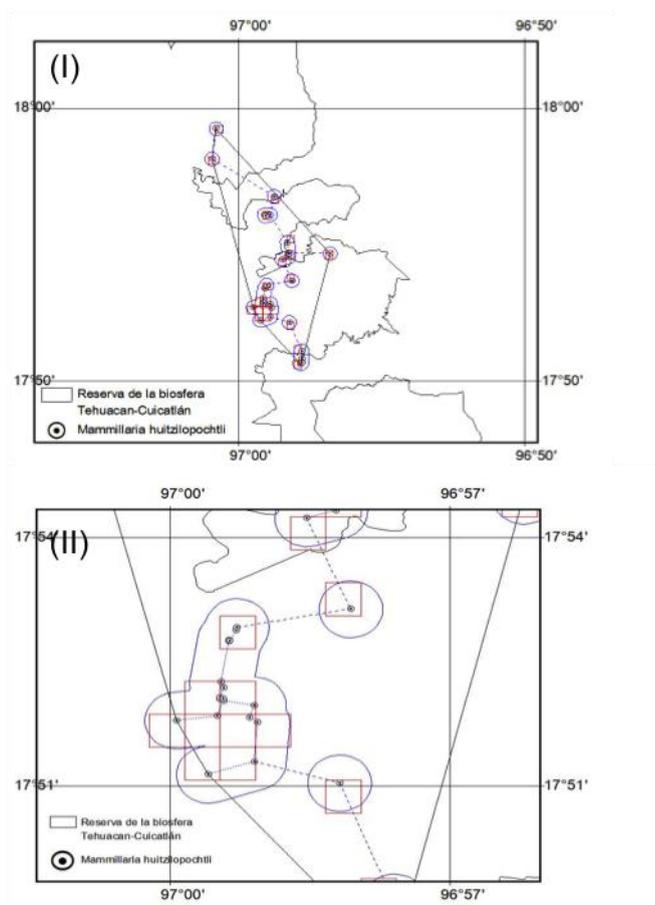


Figura 9. Modelo general geográfico de evaluación de extensión del área de ocupación (EOO) (I) y de área de ocupación "real" (AAO) (II) de *M. huitzilopochtli*. Acercamiento mostrando detalles de las subpoblaciones más nororientales.

Cuadro 6. Perfil bioclimático de *Mammillaria huitzilopochtli*.

Parámetro (Unidades)	Valores (mín., máx., promedio $\pm$ e. e.)
Temperatura promedio anual °C	24.3-25.1 (24.9 $\pm$ 0.20)
Oscilación diurna de la temperatura °C	13.4-15.5 (14 $\pm$ 0.42)
Isotermalidad °C	0.60-0.63 (0.61 $\pm$ 0.01)
Estacionalidad de la temperatura (coeficiente de variación, %)	0.79-0.84 (0.82 $\pm$ 0.01)
Temperatura máxima promedio del periodo más cálido °C	35.9-36.8 (36.4 $\pm$ 0.30)
Temperatura mínima promedio del periodo más frío °C	12.1-13.8 (13.3 $\pm$ 0.38)
Oscilación anual de la temperatura °C	22.2-24.6 (23.1 $\pm$ 0.55)
Temperatura promedio del cuatrimestre más lluvioso °C	25.4-26.3 (26.1 $\pm$ 0.24)
Temperatura promedio del cuatrimestre más seco °C	22.1-22.5 (22.2 $\pm$ 0.15)
Temperatura promedio del cuatrimestre más cálido °C	27.1-28.2 (27.9 $\pm$ 0.25)
Temperatura promedio del cuatrimestre más frío °C	21-21.7 (21.5 $\pm$ 0.18)
Precipitación anual mm	539-1049 (752 $\pm$ 164.51)
Precipitación del periodo más lluvioso mm	28-54 (38 $\pm$ 8.52)

Precipitación del periodo más seco mm	0
Estacionalidad de la precipitación (coeficiente de variación, %)	90-97 (94±2.23)
Precipitación del cuatrimestre más lluvioso mm	308-586 (426±89.37)
Precipitación del cuatrimestre más seco mm	0-46 (18±19.56)
Precipitación del cuatrimestre más cálido mm	164-289 (219±41.3)
Precipitación del cuatrimestre más frío mm	21-55 (34±11.1)

## ANÁLISIS DEL SUELO

Se colectó y analizó el suelo de las cinco localidades bajo estudio, además del suelo de una localidad más no contemplada en el inicio (Barranca del Cozahuico). La textura de suelo es franco arenosa en tres de las localidades, y presenta ligeras variaciones en las características físicas y químicas analizadas. Las localidades de Barranca de Cozahuico, Barranca del Huaje y Cuicatlán tienen mayores porcentaje de arenas (62-76%), valores intermedios de limo, (18-28%) y bajos porcentajes de arcilla (5.6-10%). La localidad de las Ruinas tiene suelo con textura arena francosa, con 82% de arenas, 13% de limo y 5% de arcilla. La localidad Santiago tiene una textura de suelo franco arcillo arenosa, con 54% de arenas, 24% de limo y 22% de arcilla. Por último, la localidad de El Cacahuatal tiene suelo con textura franco arcillosa, con 36% de arenas, 36% de limo, y 28% de arcillas.

Los detalles acerca de estas y de otras 11 características físicas y químicas del suelo son mostrados en el archivo de Excel correspondiente a *M. huitzilopochtli*.

## ASPECTOS ECOLÓGICOS

### *Tipo de vegetación y especies asociadas/acompañantes*

Agrupaciones de plantas arbóreas de zonas bajas (<1800 m de altitud). Agrupaciones de cactáceas arborescentes (bosques de cactáceas columnares). El hábitat en las localidades donde crece esta especie predomina una vegetación de selva baja caducifolia, con tetecheras de *Neobuxbaumia tetetzo* y cardonales de *Pachycereus weberi* (*sensu* Valiente-Banuet *et al.* 2009) aunque las plantas crecen principalmente sobre acantilados de roca desprovistos de cobertura vegetal. Esta especie aparentemente no presenta una dependencia con plantas leñosas, sin embargo se han observado un alto número de plántulas juveniles y plantas adultas creciendo en grietas de rocas y sobre acantilados rocosos, lo cual también ha sido reportado en estudios anteriores, tanto para esta, como para otras especies de *Mammillaria* (Martorell y Patiño, 2006; Peters *et al.* 2008; Flores-Martínez *et al.* 2010). En la población de Barranca del Cozahuico las plantas crecen frecuentemente asociadas con *Agave titanota* y *Selaginella* sp. El listado completo de las especies asociadas o acompañantes se presenta en los archivos de Excel.

### *Densidad y estructura de tamaños*

Barranca de Huaje: Se registró una abundancia total de 362 individuos, los cuales tienen tamaños de entre 4 y 59 mm de diámetro, con un tamaño promedio de  $21.75 \pm 0.93$  (n= 170) mm de diámetro. Únicamente el 10% de los individuos pertenecen a categorías de tamaño menores a 10 mm, las cuales representan a las plántulas, mientras que el 39% de las plantas tienen tamaños de 10-20 mm. Santiago: esta población tiene un total de 39 individuos, presentan tamaños de 6-38 mm de diámetro, con un promedio de  $23.18 \pm 0.19$  mm de diámetro. El 74% de los individuos presentan tamaños de entre 10 y 30 mm de diámetro. El Cacahuatal: la densidad promedio de esta localidad es de  $11.6 \pm 2.97$  individuos por 500 m<sup>2</sup>. Presentan tamaños de 11-58.9 mm de diámetro, con promedio de  $39.51 \pm 2.22$  (n=33) mm de diámetro. No se registraron individuos con diámetros menores a 10 mm, mientras que el 84% de las plantas tienen tamaños mayores a 30 mm de diámetro. El tamaño de esta población puede ser

relativamente dentro del área perteneciente a Quiotepec, no obstante la mayor parte de las plantas se encuentra en paredes de roca, lo cual dificulta el acceso a ellas. Ruinas: esta población tiene una abundancia total de 48 individuos, los cuales presentan un rango de tamaños de 2 a 58 mm de diámetro, con un promedio de  $25.3 \pm 2.4$ . El 25% de las plantas tienen tamaños menores a 10 mm de diámetro, mientras que el 56% tiene tamaños de 10-40 mm de diámetro. Cuicatlán: esta población tiene una densidad promedio de  $8.8 \pm 1.49$  individuos por  $m^2$  con un tamaño promedio de  $23.05 \pm 1.26$  (n= 88) mm de diámetro. La mayoría de los individuos de esta población (85%) pertenecen a categorías de tamaño mayores a 10 mm de diámetro y solo el 9% representa a individuos con tamaños menores a 10 mm. El Mezquite: registró una abundancia total de 88 individuos con tamaños de entre 10 a 86 mm de diámetro y un tamaño promedio de  $45.36 \pm 3.01$  (n= 41) mm de diámetro. No existen individuos con tamaño menor a 10 mm. Barranca de Cozahuico: la densidad promedio de la población es de  $86.4 \pm 14.54$  individuos en  $120 m^2$  con un tamaño promedio de  $35.7 \pm 0.62$  (n= 432) mm de diámetro. La mayoría de los individuos de esta población (75%) pertenecen a categorías de tamaño intermedias de entre 20 y 50 mm de diámetro. Solo se registró el 3% con un tamaño menor a los 10 mm de diámetro las cuales representan a las plántulas. En esta población se midió un total de 432 individuos para la estimación de la estructura de tamaños, sin embargo, la densidad total puede ser hasta 5 veces mayor.

En todas las poblaciones se observaron pocos individuos pequeños (<10 mm) lo que sugiere que el reclutamiento es infrecuente. Sin embargo, el alto número de individuos registrados a lo largo de su área de distribución, haría a la especie relativamente menos susceptible a una extinción local.

### ***Fenología y visitantes florales***

Se observó que la floración y fructificación de esta planta se presenta durante el invierno (noviembre-enero) aunque es muy irregular y las temperaturas inusualmente bajas en el hábitat pueden interrumpir la producción de frutos y semillas. Por las razones anteriores no fue posible registrar de manera adecuada los patrones fenológicos ni los visitantes florales en las poblaciones de esta especie. Por las características morfológicas de sus flores, es altamente probable que la polinización sea realizada por pequeños himenópteros y coleópteros, como ha sido observado en otras especies de cactáceas globosas (Mandujano *et al.*, 2010). Este tema sigue presentando huecos en la literatura científica y resalta la necesidad de incrementar estudios particulares acerca de los síndromes de polinización en cactáceas globosas.

### ***Capacidad reproductiva***

Barranca del Huaje: el número promedio de semillas por fruto de esta población es de  $67.8 \pm 9.09$  mientras que el porcentaje de germinación es de 97%. Cuicatlán: se encontró un promedio de 42.5 semillas por fruto para esta localidad con un 98 % de germinación. Del resto de las poblaciones no fue posible coleccionar frutos ni semillas para la evaluación de su capacidad reproductiva, lo anterior debido a la imprevisibilidad en la fenología de la planta y a que aparentemente la floración y fructificación pueden ser afectadas por heladas anticipadas, ya que ambas se presentan durante el invierno. Sin embargo, los datos obtenidos en este trabajo sugieren que la planta puede producir una gran cantidad de semillas y que el porcentaje de germinación es alto, lo cual concuerda con lo reportado en estudios previos (Flores-Martínez *et al.* 2008).

## **DIVERSIDAD Y ESTRUCTURA GENÉTICA**

A partir del análisis de las cinco poblaciones estudiadas de *M. huitzilopochtli*, se estimó para la especie una heterocigosidad esperada y observada, en 0.81 y 0.53, respectivamente; y una diversidad alélica promedio de 10. En las cinco poblaciones se encontraron niveles altos de endogamia (Cuadro 7), al igual que a nivel de especie ( $F_{IT} = 0.42$ ). Los resultados de diferenciación poblacional para la especie indican que es moderada ( $R_{ST} = 0.14$ ) y se puede deber a que los niveles de flujo génico ( $Nm = 9.7$ ) fueron altos para la especie. La diferenciación estimada entre pares de poblaciones mostró que Cuicatlán es diferente

a Ruinas, Santiago y El Cacahuatal, y a su vez éste último con Ruinas y Santiago. El flujo génico entre pares de poblaciones fue  $> 1$ . El análisis de AMOVA estimó que la principal fuente de variación genética fue dentro de los individuos (58%), seguida por la variación entre los individuos dentro de las poblaciones (30%) y finalmente entre las poblaciones (12%). Los resultados de este estudio muestran que en las cinco poblaciones se tiene una alta homocigosidad. Ésta puede ser explicada por atributos intrínsecos de la especie como un sistema reproductivo que incluya autofecundación parcial o total, por efectos de deriva génica incrementados por tamaños poblacionales pequeños y/o aislamiento geográfico, o directamente por endogamia asociada a tamaños poblacionales pequeños. De estas tres posibles causas, el sistema reproductivo se descarta, debido a que la autofecundación no ocurre en esta especie (Flores-Martínez *et al.* 2008). Por ello se puede suponer que esta relativa alta homocigosidad podría estar asociada a tamaños poblacionales pequeños y quizá al aislamiento geográfico actual que muestran las poblaciones. Por ello, se recomienda, como una medida de conservación para esta especie, garantizar que no se reduzcan los tamaños poblacionales, lo cual podría estar ocurriendo dado que recientemente se estimó una tendencia al decremento poblacional (Flores-Martínez *et al.* 2010). Así mismo evitar el aislamiento geográfico entre las poblaciones actuales.

Cuadro 7. Parámetros poblacionales de diversidad genética para *M. huitzilopochtli*.  $H_E$  = heterocigosidad esperada,  $H_O$  = heterocigosidad observada,  $N_A$  = diversidad alélica,  $F_{IS}$  = coeficiente de endogamia dentro de la población, el asterisco indica  $P < 0.05$ .

	$H_E$	$H_O$	$N_A$	$F_{IS}$
El Cacahuatal	0.74	0.50	9	0.27*
Cuicatlán	0.89	0.65	12	0.33*
Barranca del Huaje	0.74	0.43	9	0.42*
Ruinas	0.81	0.47	9	0.28*
Santiago	0.85	0.61	11	0.43*

Cuadro 8. Método de evaluación riesgo de extinción de plantas en México (MER) para *Mammillaria huitzilopochtli*.

Criterio del MER	Información generada	Valor obtenido dentro del criterio del MER
A Características de la distribución geográfica	Mapa de distribución geográfica Mapa de distribución real y potencial	0.64
B Características del hábitat	Diagnóstico del estado actual de la calidad de su hábitat en relación con las actividades humanas	0.55
C Vulnerabilidad biológica intrínseca	Diagnóstico del estado actual de las poblaciones. Información fenológica	0.30
D Impacto de la actividad humana	Diagnóstico de los factores de riesgo y de la importancia relativa que presentan para la especie	0.50
		<b>1.99</b>

**Categoría propuesta de acuerdo con la evaluación anterior: Amenazada (A)**

*Mammillaria kraehenbuehlii*

**INFORMACIÓN TAXONÓMICA**

Reino: Plantae

División: Magnoliophyta

Clase: Magnoliopsida

Orden: Caryophyllales

Familia: Cactaceae

Nombre científico: *Mammillaria kraehenbuehlii* (Krainz) Krainz, 1971.

**DESCRIPCIÓN DE LA ESPECIE**

Son plantas cespitosas que presentan tallos de 3 a 12 cm de alto y de 2.5-3.5 cm de ancho, son cortamente cilíndricos, erectos, con jugo acuoso. Sus tubérculos tienen 0.5-1.0 cm de largo y 0.5-0.6 cm de ancho, tienen axilas desnudas. La especie tiene 12-24 espinas radiales, de 0.3-1.0 cm de largo, ascendentes, ligeramente setosas, de color blanco y de ápice pardo-rojizo. Sus flores tienen 1.8-2.0 cm de largo, de forma campanulada-infundibuliforme, son de color rojo carmín y de ápice verde. Los frutos son de 1.2-2.0 cm de largo de 0.4-0.5 cm de ancho, de color rojo, sus semillas tienen 1.0-1.5 mm de largo y cerca de 1 mm de ancho, reniformes, de color negro (Arias *et al.* 1997).

**ASPECTOS GEOGRÁFICOS**

*Distribución*

Estado de Oaxaca. Municipios de Santo Tomás Tamazulapan y San Miguel Tequixtepec.

*Localidades Estudiadas*

San Martín Palosolo, Tamazulapan, Tequixtepec I, Tequixtepec II, y Tequixtepec III. Además se presentan algunos datos acerca de una sexta población encontrada al final del estudio: Tequixtepec IV.

*Calidad de hábitat, Impacto de las actividades humanas y amenazas*

Se registraron distintas actividades humanas que podrían afectar la conservación de la especie, algunas de ellas son la ganadería caprina y la cercanía de caminos de terracería y brechas a las poblaciones. El desmonte aparentemente no afecta el hábitat de la especie, debido a la carencia de interacciones con otras plantas. Inclusive presenta claros patrones de asociación con rocas y grietas en las rocas, cuando menos en la población de Tamazulapan. Aparentemente esta especie no es usada por las comunidades humanas en donde crece, y la colecta ilegal es baja, en el caso de que exista.



Figura 10. Cercanía de caminos a las poblaciones en Palo Solo y Tequixtepec (arriba) de *Mammillaria kraehenbuehlii*. En el caso de Tamazulapan, la población se encuentra a escasos 500-800 m de los límites del poblado, allí se ha perdido el suelo y la especie crece en grietas de rocas que aparentemente funcionan como sitios nodriza (abajo).

### Área de ocupación real y potencial, mapas y perfil bioclimático

Se presenta a continuación el área de ocupación real y potencial para *M. kraehenbuehlii*, así como su perfil bioclimático representado en 19 variables (Cuadro 9). Los aspectos anteriores fueron estimados a partir de los registro de 16 poblaciones o subpoblaciones de la especie.

Número de localidades = 124  
 EOO: 1823.45 km<sup>2</sup> - AMENAZADA (EN)  
 EOO: Diámetro máximo: 80.5162 km  
 AOO: tamaño de la celda: 0.6 km<sup>2</sup>  
 Número de celdas: 23  
 AOO Área: 8.28 km<sup>2</sup> - CRITICAMENTE AMENAZADA (CR)  
 AOO: Número de subpoblaciones (Adyacencia de las celdas): 16  
 AOO: Índice de proximidad = 2.01834  
 Análisis de Rapoport: Area 22.0112 km sq  
 Análisis de Rapoport: Número de subpoblaciones: 16

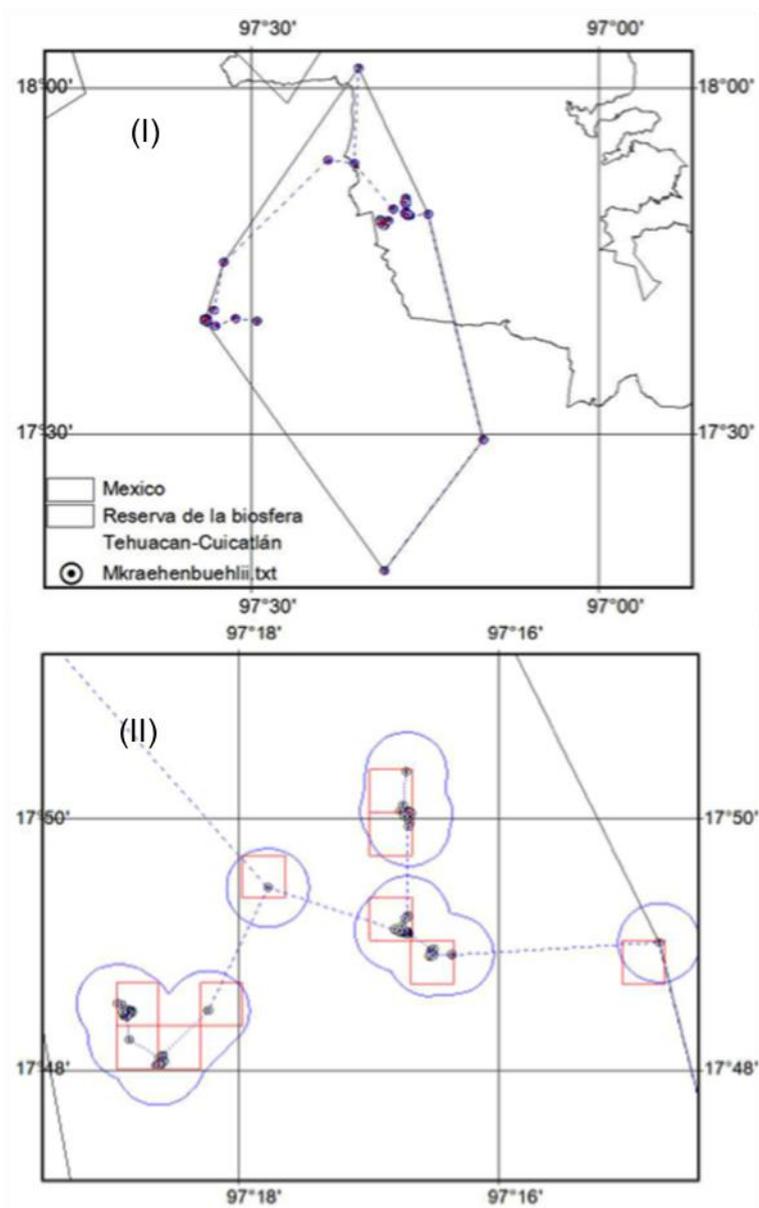


Figura 11. Modelo general geográfico de evaluación de extensión del área de ocupación (EOO) (I) y de área de ocupación "real" (AOO) (II). Acercamiento mostrando detalles de las subpoblaciones más orientales.

Cuadro 9. Perfil bioclimático de *Mammillaria kraehenbuehlii*.

Parámetro (unidades)	Valores (mín., máx., promedio $\pm$ e. e.)
Temperatura promedio anual °C	15.2-16.7 (16.2 $\pm$ 0.27)
Oscilación diurna de la temperatura °C	13.6-16.1 (14.7 $\pm$ 1.02)
Isotermalidad °C	0.65-0.70 (0.67 $\pm$ 0.02)
Estacionalidad de la temperatura (coeficiente de variación, %)	0.50-0.61 (0.57 $\pm$ 0.03)
Temperatura máxima promedio del periodo más cálido °C	25.7-27.9 (27.1 $\pm$ 0.47)
Temperatura mínima promedio del periodo más frío °C	4.6-5.8 (5.2 $\pm$ 0.34)
Oscilación anual de la temperatura °C	20.3-22.9 (21.9 $\pm$ 0.78)

Temperatura promedio del cuatrimestre más lluvioso °C	15.7-17.7 (16.9±0.42)
Temperatura promedio del cuatrimestre más seco °C	13.7-14.7 (14.3±0.19)
Temperatura promedio del cuatrimestre más cálido °C	17.2-18.6 (18.2±0.18)
Temperatura promedio del cuatrimestre más frío °C	13.2-14.5 (13.9±0.31)
Precipitación anual mm	577-701 (641±41.27)
Precipitación del periodo más lluvioso mm	32-39 (35±2.55)
Precipitación del periodo más seco mm	0
Estacionalidad de la precipitación (coeficiente de variación, %)	89-95 (92±0.61)
Precipitación del cuatrimestre más lluvioso mm	308-367 (329±19.27)
Precipitación del cuatrimestre más seco mm	0
Precipitación del cuatrimestre más cálido mm	164-264 (198±34.12)
Precipitación del cuatrimestre más frío mm	18-27 (21±0.99)

## ANÁLISIS DEL SUELO

Se colectaron y analizaron muestras de suelo en cuatro de las poblaciones: Tamazulapan, Tequixtepec I, Tequixtepec II, y Tequixtepec III. Todas presentaron una textura franco arenosa porcentajes similares de arena, limo y arcilla. El porcentaje de arenas fue alto (58-70%), mientras que los valores de limo fueron intermedios (20-30%) y la cantidad de arcillas fue baja (5-12%) en las cuatro poblaciones. Los detalles acerca de estas y de otras 11 características físicas y químicas del suelo son mostrados en el archivo de Excel correspondiente a esta especie. De manera general, tanto la textura como las características físico-químicas del suelo en el hábitat de *M. kraehenbuehlii* presentaron ligeras variaciones. No obstante, se observaron diferencias en otras características del terreno como son la pendiente, la cantidad de grietas en las rocas y/o (donde puede acumularse suelo, humedad y materia orgánica) o la cobertura vegetal; características que en conjunto pueden definir las condiciones microclimáticas donde crece la planta.

## ASPECTOS ECOLÓGICOS

### *Tipo de vegetación y especies asociadas/acompañantes*

Tamazulapan. Esta población se localiza a menos de 1 km del poblado de Tamazulapan, en la cima de uno de los lomeríos aún conserva algunos individuos de *Mammillaria kraehenbuehlii*, entre los componentes principales del matorral se encuentran distintas especies como: *Agave kerchovei*, *Agave potatorum*, *A. salmiana*, *Rhus schiedeana*, *Brahea dulcis*, *Ageratina pazcuorum*, *Gymnosperma glutinosum*, *Tillandsia recurvata*, *T. usneoides*, *Mammillaria haageana*, *Ephedra compacta*, *Euphorbia heterophylla*, *Dasyllirion serratifolium*, *Loeselia coerulea*, y *Vauquelinia australis*. En esta población, las plantas de *M. kraehenbuehlii* crecen en mayor medida dentro de grietas de rocas, el suelo es somero y con escasa vegetación.

San Martín Palosolo. En esta población, las plantas de la especie estudiada crecen tanto en laderas de lajas o roca, dentro de grietas, o debajo de otras especies de plantas. Las especies acompañantes en este caso fueron: *Dasyllirion serratifolium*, *Brahea dulcis*, *Gymnosperma glutinosum*, *Mammillaria dixanthocentron*, *M. haageana*, *Marginatocereus marginatus*, *Opuntia pilifera*, *Echeveria sp.*, *Mimosa sp.*, *Lantana camara*.

Las poblaciones de Tequixtepec se encuentran en la asociación vegetal denominada Matorral de *Dasyllirion serratifolium*, aquí se observaron individuos de *M. kraehenbuehlii* creciendo bajo otras plantas que pudieran funcionar como plantas nodriza, principalmente musgos y *Ephedra compacta*. Las

especies acompañantes en las distintas poblaciones de Tequixtepec (Oaxaca) fueron:

Tequixtepec I: *Acacia schaffneri*, *Agave potatorum*, *A. salmiana*, *Ageratina espinosarum*, *Berberis quinquefolia*, *Coryphanta radians*, *Dalea zimapanica*, *Dasyllirion serratifolium*, *Echeveria sp.*, *Ephedra compacta*, *Gymnosperma glutinosum*, *Mammillaria haageana*, *Rhus schiedeana*, *Salvia anastomosans*, *S. thymoides*, *Vauquelinia australis* y *Yucca periculosa*.

Tequixtepec II: *Acacia schaffneri*, *Adolphia infesta*, *Agave potatorum*, *A. salmiana*, *Ageratina espinosarum*, *Berberis quinquefolia*, *Coryphanta radians*, *Dalea zimapanica*, *Dasyllirion serratifolium*, *Echeveria sp.*, *Ephedra compacta*, *Gymnosperma glutinosum*, *Mammillaria haageana*, *Rhus schiedeana*, *Salvia anastomosans*, *S. thymoides*, *Vauquelinia australis*, *Yucca periculosa*.

Tequixtepec III: *Acacia schaffneri*, *Adolphia infesta*, *Agave potatorum*, *A. salmiana*, *Ageratina espinosarum*, *Ageratum tehuacanum*, *Berberis quinquefolia*, *Coryphanta radians*, *Dalea zimapanica*, *Dasyllirion serratifolium*, *Echeveria sp.*, *Ephedra compacta*, *Gymnosperma glutinosum*, *Mammillaria haageana*, *Rhus schiedeana*, *Salvia anastomosans*, *S. thymoides*, *Vauquelinia australis* y *Yucca periculosa*.

Tequixtepec IV: *Acacia schaffneri*, *Agave potatorum*, *A. salmiana*, *Ageratina espinosarum*, *Berberis quinquefolia*, *Coryphanta radians*, *Dalea zimapanica*, *Dasyllirion serratifolium*, *Echeveria sp.*, *Ephedra compacta*, *Gymnosperma glutinosum*, *Mammillaria haageana*, *Rhus schiedeana*, *Salvia anastomosans*, *S. thymoides*, *Vauquelinia australis* y *Yucca periculosa*.

### **Densidad y estructura de tamaños**

La población de Tamazulapan tiene una densidad promedio de  $22.5 \pm 1.5$  individuos en  $500 \text{ m}^2$  con un tamaño promedio  $256 \pm 32.3$  mm de diámetro total (calculado como la suma de todas las ramas, dado que la planta tiene crecimiento cespitoso o clonal), y casi el 40% de los individuos pertenecen a tamaños de entre 50 y 200 mm. San Martín Palosolo tiene una densidad poblacional de  $30.5 \pm 8.5$  individuos en  $500 \text{ m}^2$ , las plantas tienen un tamaño promedio de  $342 \pm 45$  mm de diámetro. La distribución de frecuencias de los individuos de esta población es homogénea entre las distintas categorías de tamaño, el rango de tamaño oscilan entre los 50 y 500 mm. En Tequixtepec la abundancia total para esta población es de 32 individuos, con un tamaño promedio de  $603 \pm 88.5$  mm de diámetro. Cerca del 30% de los individuos de esta población se encuentra en tamaños intermedios de 100-300 mm de diámetro; mientras que en la población Tequixtepec II la abundancia total registrada fue de 85 individuos con un tamaño promedio de  $638 \pm 66.8$  mm de diámetro. Menos del 1% de la población se encuentra dentro de la categoría de menor tamaño (<50 mm) sugiriendo una tasa de reclutamiento baja. En Tequixtepec III la población tiene una abundancia total de 79 individuos, con un tamaño promedio de  $330.9 \pm 40$  mm de diámetro total. Cerca del 56% de la población se encuentra dentro de categorías de tamaños intermedios de 50 a 300 mm. Por último, la población de Tequixtepec IV tuvo una abundancia total de 47 individuos con un tamaño promedio de  $650 \pm 73.3$  mm de diámetro. Las categorías de tamaños con más individuos son las de 200-300 mm y la de mayor a los 500 mm.

De manera general, todas las categorías de tamaño estuvieron bien representadas en cada una de las poblaciones, lo que sugiere que el reclutamiento podría ser frecuente y mantener el crecimiento poblacional. Los histogramas que representan las categorías de tamaños o edades en distintas especies de cactáceas regularmente presentan formas no homogéneas, lo que sugiere reclutamiento por pulsos (Godínez-Álvarez *et al.*, 2003). Las variaciones que se presentan en *M. kraehenbuehlii* en relación con este patrón pueden estar fuertemente afectadas por la reproducción asexual que presenta la especie.

### **Fenología y visitantes florales**

La producción de flores y frutos en esta especie se presenta entre marzo y junio. No ha sido posible llevar a cabo la observación y coleta de los visitantes florales debido a lo irregular de la fenología en esta planta. Las características de la estructura floral sugieren un síndrome de polinización melitófila, al igual que distintas especies de *Mammillaria*, es probable que al igual que otras cactáceas de formas globosas y tamaño pequeño, estas sean visitadas por pequeños himenópteros, coleópteros, y otros insectos

(Mandujano *et al.* 2010).

### **Capacidad reproductiva**

De acuerdo con las observaciones y registros realizados en las distintas poblaciones, aparentemente esta especie no tiene problemas intrínsecos a su biología u ocasionados por perturbaciones en su hábitat que pudieran limitar la capacidad reproductiva, y la consecuente regeneración y mantenimiento de sus poblaciones. La población de Tamazulapan presentó un promedio de  $16.4 \pm 2.48$  semillas por fruto y un porcentaje de germinación de 57%. En San Martín Palosolo el número promedio de semillas por fruto fue de  $22.07 \pm 3.4$  semillas y el porcentaje de germinación de 69%. En Tequixtepec I el número promedio de semillas por frutos fue de  $12.8 \pm 3.6$  y un porcentaje de germinación de 85%. Por otro lado en Tequixtepec II el promedio de semillas por fruto fue de  $16.03 \pm 1.6$  con un 77% de germinación; mientras que en Tequixtepec III el promedio de semillas por fruto fue de  $18.61 \pm 3.59$  con un 66% de germinación. Para la localidad de Tequixtepec IV se registró un promedio de  $22.53 \pm 1.53$  semillas por fruto, las cuales alcanzan el 56% de germinación de semillas después de 30 días.



Figura 12. Individuo cespitoso de *Mammillaria kraehenbuehlii* en floración.

### **DIVERSIDAD Y ESTRUCTURA GENÉTICA**

A partir del análisis de las cinco poblaciones estudiadas de *M. kraehenbuehlii*, se estimó para la especie una heterocigosidad esperada y observada, en 0.71 y 0.62 respectivamente; y una diversidad alélica promedio de 6.76. Solamente en una población (Tequixtepec II) se encontró un nivel alto de endogamia, en las demás se registraron niveles bajos (Cuadro 10). En contraste, a nivel de especie la endogamia fue relativamente alta ( $F_{IT} = 0.39$ ). A nivel de especie los resultados de diferenciación promedio indican que es moderada ( $R_{ST} = 0.26$ ) y que se pueden deber a los niveles de flujo génico ( $Nm = 3$ ), aparentemente

determinados por la distancia geográfica actual entre poblaciones. Las comparaciones pareadas entre poblaciones mostraron que San Martín Palo Solo, la población más alejada geográficamente del resto, es la que presenta niveles altos de diferenciación genética (0.36 a 0.49) y a la vez los niveles más bajos de flujo génico ( $< 1$ ) con las demás poblaciones. El análisis de AMOVA estimó que la principal fuente de variación genética en esta especie ocurre dentro de los individuos (58%), seguida por entre los individuos dentro de las poblaciones (30%) y finalmente entre las poblaciones (12%). Los resultados de este estudio muestran que en las cinco poblaciones se tienen valores relativamente altos de heterocigosidad observada y que solamente la población Tequixtepec II tiene niveles altos de endogamia, sin embargo, considerando que mantiene niveles altos de flujo génico con Tequixtepec I y III, se podría considerar como plan de conservación que no se aislen geográficamente estas tres poblaciones. Además, para prever la disminución de la diversidad genética a largo plazo se recomienda que no se reduzcan los tamaños poblacionales.

Cuadro 10. Parámetros poblacionales de diversidad genética para *M. kraehenbuehlii*.  $H_E$  = heterocigosidad esperada,  $H_O$  = heterocigosidad observada,  $N_A$  = número promedio de alelos,  $F_{IS}$  = coeficiente de endogamia dentro de la población, el asterisco indica  $P < 0.05$ .

	$H_E$	$H_O$	$N_A$	$F_{IS}$
San Martín Palosolo	0.75	0.69	7.2	0.03
Tamazulapan	0.71	0.63	5.2	0.11
Tequixtepec 1	0.77	0.66	6.2	0.14
Tequixtepec 2	0.77	0.5	7.6	0.35*
Tequixtepec 3	0.75	0.67	7.6	0.1

Cuadro 11. Método de evaluación riesgo de extinción de plantas en México (MER) para *Mammillaria kraehenbuehlii*.

Criterio del MER	Información generada	Valor obtenido dentro del criterio del MER
A Características de la distribución geográfica	Mapa de distribución geográfica Mapa de distribución real y potencial	0.64
B Características del hábitat	Diagnóstico del estado actual de la calidad de su hábitat en relación con las actividades humanas	0.33
C Vulnerabilidad biológica intrínseca	Diagnóstico del estado actual de las poblaciones. Información fenológica	0.17
D Impacto de la actividad humana	Diagnóstico de los factores de riesgo y de la importancia relativa que presentan para la especie	0.30
		<b>1.44</b>

**Categoría propuesta de acuerdo con la evaluación anterior: Sujeta a Protección Especial (Pr)**

*Mammillaria napina***INFORMACIÓN TAXONÓMICA**

Reino: Plantae

División: Magnoliophyta

Clase: Magnoliopsida

Orden: Caryophyllales

Familia: Cactaceae

Nombre científico: *Mammillaria napina* J.A. Purpus, 1912.**DESCRIPCIÓN DE LA ESPECIE**

Tallo simple, de semigloboso a aplanado, raíz larga, napiforme en la porción subterránea. Tubérculos dispuestos en 8 y 13 series espiraladas, de consistencia firme, cónicos, lateralmente compresos en la base, con jugo acuoso; 8-10 mm de longitud 7-8 mm de espesor en la base. Axilas lanosas, a veces desnudas. Areolas ovales de 3 mm de longitud y 2 mm de anchura, con lana blanca amarilla cuando jóvenes, más tarde desnudas. Espinas por lo común radiales, de 10-12 y de 8-9 mm de longitud, delgadamente subuladas, muy rígidas, lisas, de color amarillo claro a dorado, un tanto pectinadas, entrecruzadas. Flores campanuladas, de 40 mm de anchura, grandes y muy vistosas; segmentos exteriores del perianto rosa, con la franja media castaño rosada, obtusos, con el margen entero lineares-lanceolados, estrechos, de 25 mm de longitud y 2 mm de anchura; segmentos interiores del perianto de color rosa, con la superficie superior de color rosa oscuro a rosa violeta brillante, de 35 mm de longitud y 3 mm de anchura; filamentos blancos, con las anteras anaranjado-amarillo; estilo de 20 mm de longitud, anaranjado claro, con 5-6 lóbulos del estigma, de color blanco a amarillo, de 4 mm de longitud. Fruto globoso hasta un poco alargado, 4-7 mm de longitud 3-6 mm de espesor, verdoso a café blanquecino; conserva adheridos los restos secos del perianto. Semillas de 1.2 mm de longitud y 1 mm de anchura; testa foveolada, negra, brillante, con hilo largo redondo hasta alargado (Arias *et al.* 1997).

**ASPECTOS GEOGRÁFICOS***Distribución*

La especie se distribuye exclusivamente en el Estado de Puebla, dentro de los municipios de Cañada Morelos, Tecamachalco, Nicolás Bravo (Azumbilla) y Zapotitlán.

*Localidades estudiadas*

Las cinco poblaciones consideradas para el estudio de esta especie fueron: Cañada Morelos I, Cañada Morelos II, Nopala, Santa Ana Teloxtoc y Xochiltepec. Además se presenta información relevante acerca de dos poblaciones más, no consideradas inicialmente: Chacateca y Cerro Conocúa.

*Calidad de hábitat, impacto de las actividades humanas y amenazas*

Las poblaciones de la especie se localizan en altitudes de 2085 msnm, pendientes de 6 grados y azimuth de 138 grados. El clima de la población de "Azumbilla" corresponde al tipo seco templado, con verano cálido y con lluvias en verano BS1kw(w). Las poblaciones de esta planta se encuentran preferentemente en sitios planos o con pendiente ligera. No dependen de plantas nodrizas para su establecimiento y desarrollo, aunque su germinación y crecimiento puede ocurrir en grietas de las rocas.

Las posibles amenazas al hábitat de esta especie pueden ser la agricultura de temporal, la ganadería vacuna, las brechas, la carretera federal, vía ferroviaria; factores que podrían influir en sus poblaciones dado la cercanía a la que se encuentran.

Se ha reportado anteriormente que la situación del hábitat permite la permanencia de las poblaciones de esta especie en el mediano plazo, debido fundamentalmente a su preferencia por los sitios perturbados. Los procesos de ganadería y las actividades humanas que afectan la cobertura vegetal no afectan a sus individuos dada su independencia de las plantas nodrizas. Se han encontrado individuos de esta especie creciendo cerca de sitios muy perturbados (tiraderos de basura) a orillas de la carretera hacia Nopala. Aparentemente, lo anterior no representa un ambiente hostil para la especie, pero habría que darle seguimiento a esta población en el futuro.



Figura 13. Ganadería de temporal y vías de comunicación cercanas a las poblaciones de *Mammillaria napina*, podrían ser las principales amenazas para la especie.

### Área de ocupación real y potencial, mapas y perfil bioclimático

Se presenta a continuación el área de ocupación real y potencial para *M. napina*, así como su perfil bioclimático representado en 19 variables (Cuadro 12). Los aspectos anteriores fueron estimados a partir de los registros de 13 poblaciones o subpoblaciones de la especie.

Número de localidades = 52  
 EOO: 739.074 km<sup>2</sup> - AMENAZADA (EN)  
 EOO: Diametro máximo: 54.505km  
 AOO: tamaño de la celda: 0.5 km<sup>2</sup>  
 Número de celdas :19  
 AOO Area:4.75 km<sup>2</sup> - CRITICAMENTE AMENAZADA (CR)  
 AOO: Número de subpoblaciones (Adyacencia de las celdas): 14  
 AOO: Índice de proximidad = 1.61362  
 Análisis de Rapoport: Area 20.2131 km<sup>2</sup>  
 Análisis de Rapoport: Número de subpoblaciones: 13

### ANÁLISIS DEL SUELO

Las características del suelo donde crece esta especie presentan ligeras variaciones en las distintas poblaciones. En la localidad de Cañada Morelos I, la textura es arena francosa, mientras que en Cañada Morelos II, Santa Ana Teloxtoc, Nopala y Xochiltepec, la textura del suelo es franco arenosa. En las cinco localidades estudiadas los porcentajes de arenas (56-76%) fueron altos, tuvieron porcentajes intermedios de limo (18-33%) y bajos porcentajes de arcillas (6-11%). Es importante mencionar que el tipo de suelo en el que crece esta especie es muy semejante entre las distintas localidades, a pesar de que se encuentran alejadas por varios kilómetros. Los detalles de las características físicas y químicas del

suelo se presentan en los archivos de Excel.

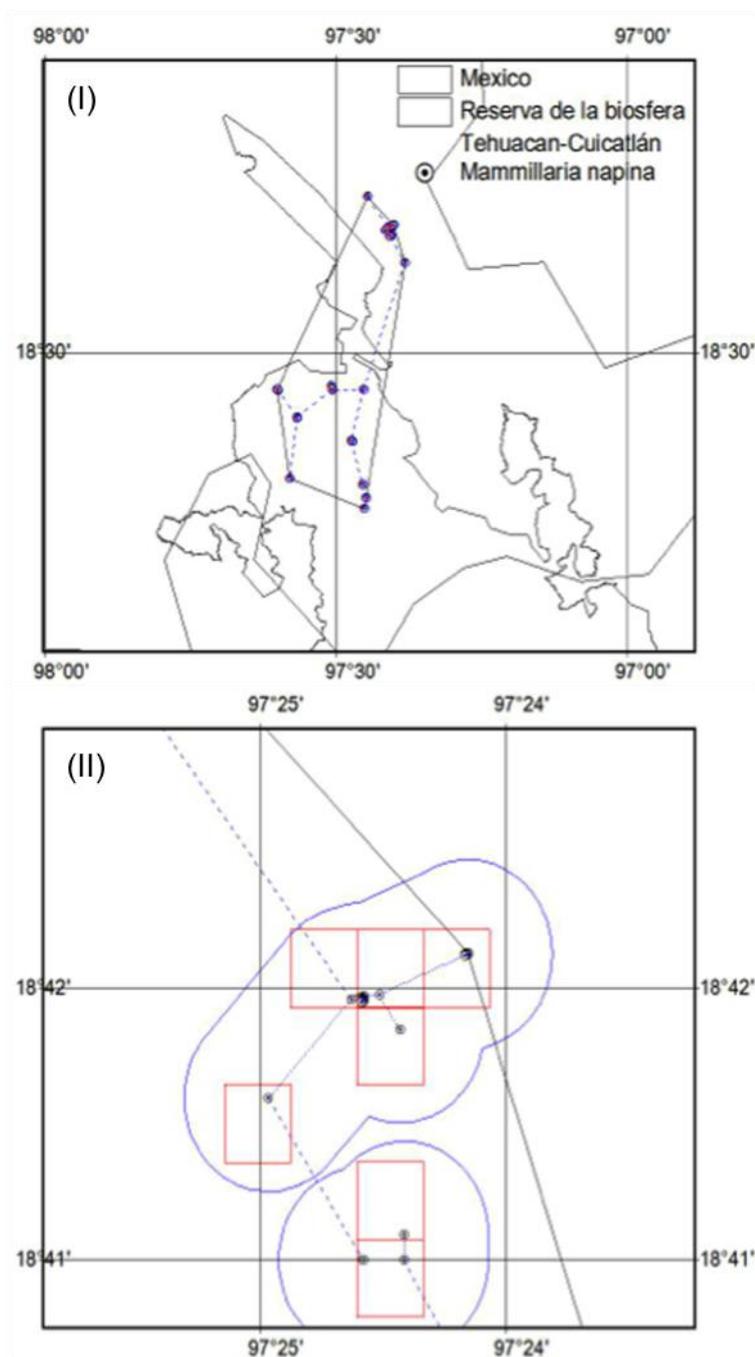


Figura 14. Modelo general geográfico de evaluación de extensión del área de ocupación (EOO) (I) y de área de ocupación "real" (AOO) (II). Acercamiento mostrando detalles de las subpoblaciones más nororientales.

Cuadro 12. Perfil bioclimático de *Mammillaria napina*.

Parámetros (unidades)	Valores (mín., máx., promedio $\pm$ e. e.).
Temperatura promedio anual °C	14.4-17.5 (16.7 $\pm$ 0.68)
Oscilación diurna de la temperatura °C	13.6-15 (14.6 $\pm$ 0.45)

Isotermalidad °C	0.66-0.69 (0.67±0)
Estacionalidad de la temperatura (coeficiente de variación, %)	0.52-0.63 (0.6±0.02)
Temperatura máxima promedio del periodo más cálido °C	25.2-28.4 (27.6±0.84)
Temperatura mínima promedio del periodo más frío °C	3.6-6.7 (5.8±0.55)
Oscilación anual de la temperatura °C	20.1-22.4 (21.8±0.60)
Temperatura promedio del cuatrimestre más lluvioso °C	15-19 (18.1±0.90)
Temperatura promedio del cuatrimestre más seco °C	12.2-15.1 (14.3±0.61)
Temperatura promedio del cuatrimestre más cálido °C	16.4-19.6 (18.8±0.73)
Temperatura promedio del cuatrimestre más frío °C	12.2-15 (14.3±0.60)
Precipitación anual mm	445-562 (471±27.78)
Precipitación del periodo más lluvioso mm	24-32 (28±1.27)
Precipitación del periodo más seco mm	0
Estacionalidad de la precipitación (coeficiente de variación, %)	84-96 (93±2.45)
Precipitación del cuatrimestre más lluvioso mm	228-289 (237±12.07)
Precipitación del cuatrimestre más seco mm	0
Precipitación del cuatrimestre más cálido mm	165-210 (194±8.99)
Precipitación del cuatrimestre más frío mm	13-24 (15±2.50)

## ASPECTOS ECOLÓGICOS

### *Tipo de vegetación y especies asociadas/acompañantes*

Agrupaciones de cactáceas arborescentes (bosques de cactáceas columnares). Agrupaciones de plantas arbóreas de zonas bajas (<1800 m de altitud). Cardonal de *Pseudomitrocereus fulviceps*. Izotal de *Yucca periculosa*.

Chacateca. Los individuos de *M. napina* en esta población crecen solamente cerca de la cima de la montaña del mismo nombre, donde la vegetación tiene elementos de matorral rosetófilo y cactáceas columnares. La vegetación se encuentra en relativo buen estado, aunque en el área se observan restos de *Brahea nitida*, la cual es una planta muy utilizada por las comunidades del Valle de Tehuacán-Cuicatlán. Las especies de plantas acompañantes con la mayor densidad fueron: *Agave stricta*, *Agave kerchovei*, *Agave potatorum*, *Beaucarnea purpusii*, *Brahea dulcis*, *Brahea nitida*, *Dasyilirion serratifolium*, *Dodonea viscosa*, *Echinocactus platyacanthus*, *Ferocactus robustus*, *Ferocactus flavovirens*, *Mimosa aculeaticarpa*, *Nolina longifolia*, *Pseudomitrocereus fulviceps*, *Pseudosmodingium multifolium* y *Quercus sebifera*.

Cañada Morelos I. Esta población se ubica también en la cima de un cerro en donde la vegetación es escasa, las especies dominantes fueron: *Aeschynomene compacta*, *Aralia humilis*, *Castilleja lithospermoides*, *Croton ciliatoglanduliferus*, *Dodonea viscosa*, *Donneslmithia cordata*, *Fraxinus purpusii*, *Gibasis consobrina*, *Gibasoides laxiflora*, *Gymnosperma glutinosum*, *Heliotrophium canescens*, *Heliotrophium confertiflorum*, *Hintonia latiflora*, *Hoffmannseggia humilis*, *Jefea pringlei*, *Krameria cytisoides*, *Lesquerela pueblensis*, *Leucophyllum pringlei*, *Neopringlea viscosa*, *Polygala obscura*, *Ptelea trifoliata*, *Quercus sebifera*, *Russelia obtusata*, *Salvia thymoides*, *Sanvitalia fruticosa*, *Sutherlandia frutescens*, *Tradescantia crassifolia*, y *Vauquelinia australis*.

Cañada Morelos II. Esta población se encuentra en la ladera de un cerro, cerca de la carretera. Las especies acompañantes con mayor abundancia fueron: *Agave kerchovei*, *Agave potatorum*,

*Bouvardia ternifolia*, *Chrysactinia mexicana*, *Coryphanta pallida*, *Dalea zimapanica*, *Gochnatia hypoleuca*, *Gymnosperma glutinosum*, *Havardia elachistophyla*, *Hechtia glomerata*, *Mammillaria sphacelata*, *Mammillaria haageana*, *Mimosa aculeaticarpa*, *Opuntia huajuapensis*, *Opuntia pilifera*, *Salvia thymoides* y *Yucca periculosa*.

### **Densidad y estructura de tamaños**

Chacateca: la abundancia total de esta población fue de 22 individuos, los cuales tienen un tamaño promedio de  $42.05 \pm 1.9$  mm de diámetro. Cerca del 54% de la población pertenece a tamaños de 40 a 45 mm, mientras que no se registró ningún individuo menor a los 20 mm, sugiriendo que la tasa de reclutamiento de esta población es infrecuente. Cañada Morelos I: se registró una densidad promedio de  $107.75 \pm 65.9$  individuos en  $250 \text{ m}^2$  y un tamaño promedio de  $33.8 \pm 0.75$  mm de diámetro. Únicamente el 13% de los individuos pertenecen a categorías de tamaño menores a 20 mm, las cuales podrían representar a los individuos juveniles y plántulas. Cañada Morelos II: la abundancia total de esta población fue de 48 individuos y un tamaño promedio de  $34.05 \pm 1.43$  mm de diámetro. Cerca del 30% de los individuos en la población pertenece a tamaños mayores de 40 mm mientras que sólo el 8% pertenece a tamaños menores a los 20 mm, sugiriendo que la tasa de reclutamiento de esta población es baja. Cerro del Conocuá: la abundancia total registrada en esta población fue de 17 individuos con un tamaño promedio de  $39.8 \pm 8.3$  mm de diámetro. La mayoría de las plantas (82%) tienen tamaños mayores a 20 mm, mientras que solo el 18% de la población pertenece a plantas con tamaños menores a 20 mm. Debido a el escaso número de individuos dentro de esta localidad, esta no fue considerada como una población dentro del estudio, pero se presenta como un antecedente para estudios futuros sobre la distribución histórica y actualizada de la especie. Nopala: en esta población la abundancia total es de 62 individuos con un tamaño promedio de  $36.9 \pm 1.3$  mm de diámetro. Cerca del 60% de la población se encuentra dentro de tamaños mayores a 20 mm. El 46% de las plantas registradas presentó estructuras reproductivas durante el periodo de muestreo. Santa Ana Teloxtoc: se observó una abundancia total de 92 individuos, que presentan un diámetro promedio de  $38.14 \pm 1.6$  mm. El 23% de las plantas tienen tamaños de 35-40 mm. Se registraron estructuras reproductivas en el 68% de los individuos a lo largo del periodo de muestreo. Por último, para la localidad de Xochiltepec la abundancia total fue de 68 individuos, que presentaron un diámetro promedio de  $32.05 \pm 0.93$  mm. El 75% de las plantas tienen tamaños de entre 25 y 40 mm, mientras que en el 35% del total se observaron estructuras reproductivas; un dato importante en esta población fue que no se registraron individuos en las dos primeras categorías de tamaño (0-5 y 5.1-10 mm), lo que sugiere un bajo reclutamiento.

### **Fenología y visitantes florales**

La producción de flores y frutos en esta especie se presentó entre marzo y mayo. Debido a la irregularidad de la fenología entre distintos años no ha sido posible la observación de los visitantes florales. Las características de las estructuras florales de la especie sugieren un síndrome de polinización melitófila, al igual que en las distintas especies de *Mammillaria* consideradas en este estudio, así como en otro tipo de cactáceas de formas globosas y tamaño pequeño, sus flores pueden ser visitadas por pequeños himenópteros, coleópteros y otros insectos (Mandujano *et al.* 2010).



Figura 15. Individuo de *Mammillaria napina* en floración.

### Capacidad reproductiva

Se colectaron frutos y/o semillas de cinco localidades. La localidad de Cañada Morelos I presentó valores promedio de  $41.35 \pm 4.11$  semillas por fruto y sus semillas comenzaron su germinación a partir del día 15; mientras que Cañada Morelos II tuvo un promedio de  $31.5 \pm 6.78$  semillas por fruto, las cuales inician su germinación a partir del día 9. Las semillas de estas dos poblaciones alcanzan su máximo porcentaje de germinación (21-22%) después de 21 y 15 días en condiciones de laboratorio, respectivamente. Xochiltepec tuvo  $45.08 \pm 5.08$  semillas por fruto y 38% de germinación, mientras que Santa Ana Teloxtoc un promedio de  $45.9 \pm 4.1$  semillas por fruto y 35% de semillas germinadas. Para la localidad de Nopala se colectaron semillas directamente esparcidas sobre el tallo de las plantas y sobre el suelo alrededor de éstas. Se colectaron también frutos incompletos extraídos del tallo de la planta (esta especie retiene los frutos dentro de su tallo por un tiempo indefinido). Debido a lo anterior, no fue posible estimar el promedio del número de semillas por fruto. No obstante, se determinó que las semillas pueden alcanzar hasta el 66% de germinación en aproximadamente 9 días. Las semillas de las diferentes poblaciones comienzan a germinar después de 1-16 días de ser sembradas bajo condiciones controladas, con humedad constante. Alcanzan valores intermedios de germinación con porcentajes de 35-66%.

### DIVERSIDAD Y ESTRUCTURA GENÉTICA

A partir del análisis de las cinco poblaciones estudiadas de *M. napina*, se estimó para la especie una heterocigosidad esperada y observada, de 0.71 y 0.54, respectivamente; y una diversidad alélica promedio de 7. En dos poblaciones se encontraron niveles altos de endogamia y en tres de ellas niveles moderados (Cuadro 13). En contraste, a nivel de especie la endogamia fue alta ( $F_{IT} = 0.40$ ). Los resultados de diferenciación poblacional para la especie indican que es moderada ( $R_{ST} = 0.19$ ) que se

pueden deber a los altos niveles de flujo génico ( $Nm = 4.2$ ). La diferenciación estimada entre pares de poblaciones mostró que la diferencia genética es alta entre Nopala con el resto de las poblaciones y moderada entre Cañada Morelos I y II. El análisis de AMOVA estimó que la principal fuente de variación genética ocurre dentro de los individuos (59%), seguida por la variación entre los individuos dentro de las poblaciones (24%), entre grupos (13%) y finalmente entre las poblaciones dentro de los grupos (4%). Los resultados de este estudio muestran que en las cinco poblaciones se tienen valores moderados de heterocigosidad observada y que solamente las poblaciones de Cañada Morelos II y Nopala tienen niveles de endogamia significativa, lo cual podría deberse a que en ellas se registraron tamaños poblacionales pequeños y en el caso de Nopala el aislamiento geográfico podría estar favoreciendo la pérdida de diversidad genética. Además comparados los valores de diversidad alélica con las otras especies aquí estudiadas se tienen valores bajos. Por ello, se recomienda como una medida de conservación para esta especie, garantizar que no se reduzcan aún más los tamaños poblacionales y que se evite el aislamiento geográfico entre las poblaciones actuales.

Cuadro 13. Parámetros poblacionales de diversidad genética para *M. napina*.  $H_E$  = heterocigosidad esperada,  $H_O$  = heterocigosidad observada,  $N_A$  = diversidad alélica,  $F_{IS}$  = coeficiente de endogamia dentro de la población, el asterisco indica  $P < 0.05$ .

	$H_E$	$H_O$	$N_A$	$F_{IS}$
Cañada Morelos I	0.62	0.49	8.5	0.21
Cañada Morelos II	0.73	0.53	6.5	0.27*
Nopala	0.66	0.43	4.2	0.39*
Santa Ana Teloxtoc	0.77	0.65	9.7	0.16
Xochiltepec	0.76	0.61	6.7	0.19

Cuadro 14. Método de evaluación riesgo de extinción de plantas en México (MER) para *Mammillaria napina*.

Criterio del MER	Información generada	Valor obtenido dentro del criterio del MER de plantas en México
A Características de la distribución geográfica	Mapa de distribución geográfica Mapa de distribución real y potencial	0.54
B Características del hábitat	Diagnóstico del estado actual de la calidad de su hábitat en relación con las actividades humanas	0.33
C Vulnerabilidad biológica intrínseca	Diagnóstico del estado actual de las poblaciones. Información fenológica	0.39
D Impacto de la actividad humana	Diagnóstico de los factores de riesgo y de la importancia relativa que presentan para la especie	0.7
		<b>1.96</b>

**Categoría propuesta de acuerdo con la evaluación anterior: Amenazada (A)**

### *Evaluación de los efectos del Cambio climático sobre las especies estudiadas*

Dada la tasa de cambios ambientales proyectados para el siglo XXI, es necesaria la aplicación de medidas urgentes de adaptación y mitigación para disminuir la galopante erosión de la biodiversidad. Aún sabiendo que la creciente evidencia muestra que los recientes cambios ambientales inducidos por el hombre ya han provocado cambios en la distribución de las especies, cambios en la fenología, así como extinciones de especies, es difícil generar proyecciones acertadas de las respuestas de las especies a los futuros cambios ambientales. Esto es problemático ya que hay una creciente necesidad de adoptar medidas proactivas para planificar la conservación usando predicciones de las respuestas de las especies a futuros cambios ambientales.

Hay una cantidad sustancial de información que describe y evalúa los impactos de varios escenarios de cambio climático y cambios en el uso del suelo sobre la distribución de las especies (Lira *et al.*, 2009; Téllez *et al.*, 2006). Los modelos predictivos incluyen una amplia gama de presuposiciones y limitaciones que son ampliamente reconocidas y que comprometen su uso para desarrollar estrategias confiables de adaptación y mitigación para la biodiversidad.

En este estudio se emplearon los modelos del Centro Hadley Version 3, los cuales incluyen varias mejoras y como resultado los modelos no requieren ajustes para prevenir una deriva climática excesiva. El modelo HadCM3 fue usado por el Hadley Centre para proveer datos para el tercer reporte de evaluación de IPCC. La simulación SRESA2, contenida en este juego de datos, incluye proyecciones de gases invernadero (incluyendo metano), que son consistentes con los niveles históricos y con el futuro escenario de IPCC SRESA2, sulfuro (proyección directa e indirecta, química de sulfuro sin DMS natural y emisiones antecedentes de SO<sub>2</sub>; emisiones antropogénicas de SO<sub>2</sub> desde la superficie y sólo de alto nivel) y ozono troposférico/estratosférico.

Es así, que si incorporamos los resultados del análisis de los impactos del cambio climático sobre la distribución de las especies, el escenario futuro que le espera es diferencial y en alguno de los casos es poco alentador. No obstante, en un escenario conservador, ya que incluso alguna de las especies podría expandir sus áreas hacia 2060, en el escenario drástico las probabilidades de contracción se incrementarían sustancialmente, algunas de éstas perdiendo un área de distribución considerable.

Si a los resultados antes descritos de la evaluación del MER y a los valores encontrados para ubicar en un determinado estado de conservación a cada especie, se suman los de los efectos del cambio climático, es seguro que para alguna de las especies el estatus debería ser modificado.

En el cuadro 15 se muestran, con base en los modelos actuales y aquellos para los escenarios Hadcm3 A2 y B2, las contracciones y expansiones que podrían sufrir las áreas de distribución de las cinco especies estudiadas. En este cuadro se refleja el área que resulta del modelo de distribución potencial generado por MaxEnt y esta clasificado de acuerdo con el área cubierta por cada probabilidad en la escala logarítmica de ese algoritmo.

Cuadro 15. Áreas de distribución potencial actual y después de aplicar escenarios de cambio climático. Dada la resolución espacial inicial de 50 x 50 m, los valores deben ser divididos entre cuatro para obtener hectáreas y entre 400 para obtener km<sup>2</sup>. La columna de la izquierda muestra las clases derivadas de la escala logarítmica de probabilidades del modelo de MaxEnt, yendo de los más bajos hacia los más altos (1 > 9). Se marcan en gris los intervalos con mayor probabilidad de predicción y que consideramos deberían ser los primeramente considerados al momento de evaluar los efectos del cambio global sobre la distribución de las especies.

	<i>Ferocactus haematacanthus</i>			<i>Mammillaria hernandezii</i>			<i>Mamillaria huitzilopochtli</i>		
<b>HADCM3_A2</b>	<b>Actual</b>	<b>2060</b>	<b>2090</b>	<b>Actual</b>	<b>2060</b>	<b>2090</b>	<b>Actual</b>	<b>2060</b>	<b>2090</b>
1	981413 6	9555521 8	964871 6	1001714 6	991458 5	996514 4	98614 65	993056 3	99045 04
2	116643	262735	196611	24042	79476	48229	50415	54672	57001
3	53516	86369	78866	9422	28777	22975	30748	28865	31497
4	30583	57503	47202	6312	16234	14778	28423	16489	15542
5	17278	32119	36900	4751	12214	9348	25565	14479	16481
6	13423	28967	21744	4329	9573	5750	19013	10559	14656
7	10294	21736	18611	3047	6500	3177	27648	9264	12557
8	11161	19017	15625	1885	3444	1414	24287	4953	14009
9	4178	7548	6937	278	409	397	3648	1368	4983
<b>HADCM3_B2</b>	<b>Actual</b>	<b>2060</b>	<b>2090</b>	<b>Actual</b>	<b>2060</b>	<b>2090</b>	<b>Actual</b>	<b>2060</b>	<b>2090</b>
1	981413 6	9581658	955244 5	1001714 6	993703 1	992209 6	98614 65	991932 5	99695 36
2	116643	232314	241720	24042	67849	73552	50415	52958	35244
3	53516	87282	109726	9422	26094	34550	30748	27732	11176
4	30583	56772	59523	6312	13938	18233	28423	17015	7357
5	17278	40887	35494	4751	10904	9091	25565	12893	6430
6	13423	31983	27640	4329	8171	6177	19013	10451	8427
7	10294	20883	20025	3047	3951	4360	27648	12775	8257
8	11161	16099	17965	1885	2804	2807	24287	14670	14652
9	4178	3334	6674	278	470	346	3648	3393	10133
	<i>Mammillaria kraehenbuehlii</i>			<i>Mammillaria napina</i>					
<b>HADCM3_A2</b>	<b>Actual</b>	<b>2060</b>	<b>2090</b>	<b>Actual</b>	<b>2060</b>	<b>2090</b>			
1	9695951	9639928	9665841	8718945	8925061	9119042			
2	156354	170147	161786	494905	398508	371002			
3	78768	83092	87066	301951	232616	209045			
4	50016	60517	47458	185346	149410	153887			
5	36798	35955	40512	119162	123392	87492			
6	27864	31493	31829	89186	97649	52256			
7	14105	23324	14383	78596	74011	31662			
8	8173	20725	16302	61645	55291	40556			
9	3183	6031	6035	21476	15274	6270			
<b>HADCM3_B2</b>	<b>Actual</b>	<b>2060</b>	<b>2090</b>	<b>Actual</b>	<b>2060</b>	<b>2090</b>			
1	9695951	9664093	9692040	8718945	8825861	8843983			
2	156354	163316	147948	494905	444456	424463			
3	78768	82775	83812	301951	257800	254896			
4	50016	57054	54716	185346	146412	185441			
5	36798	40532	39953	119162	130484	117225			
6	27864	32546	26397	89186	129832	104509			

7	14105	17592	15354	78596	84381	79504
8	8173	11641	9244	61645	40078	44670
9	3183	1663	1748	21476	11908	16521

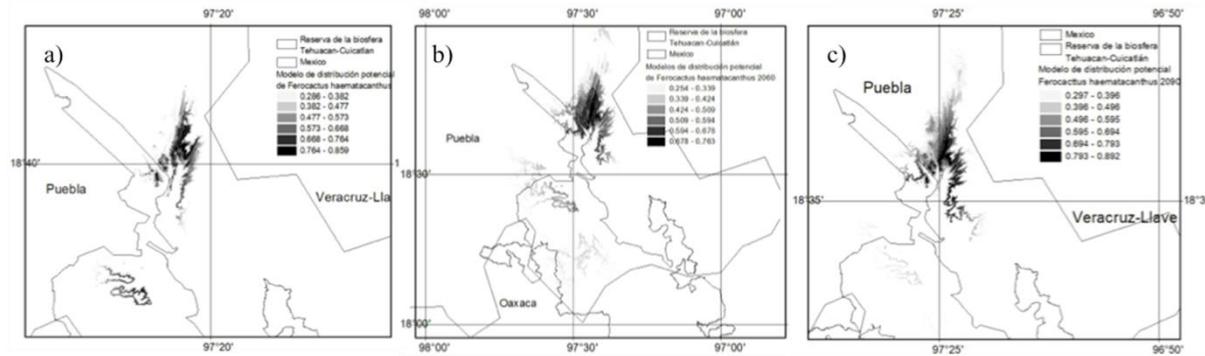


Figura 16. Modelos de distribución potencial de *Ferocactus haematacanthus*. a) actual, b) Hadcm3\_B2\_2060, y c) Hadcm3\_B2\_2090.

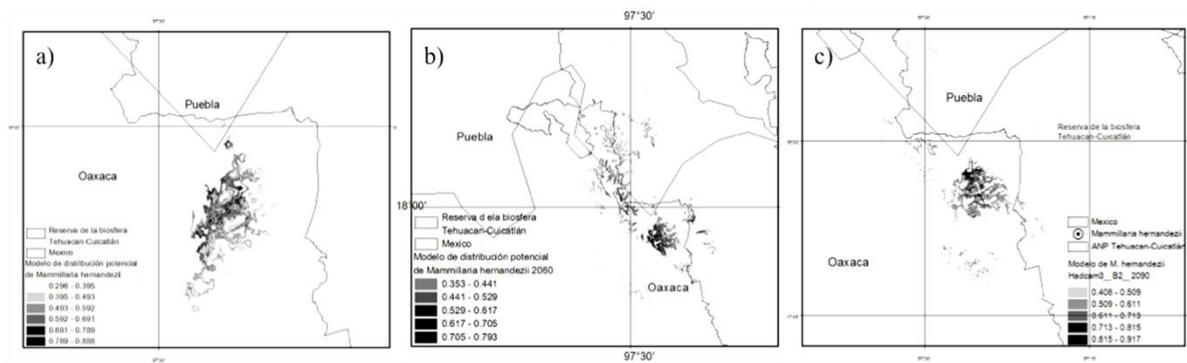


Figura 17. Modelos de distribución potencial de *Mammillaria hernandezii* a) actual, b) Hadcm3\_B2\_2060, y c) Hadcm3\_B2\_2090.

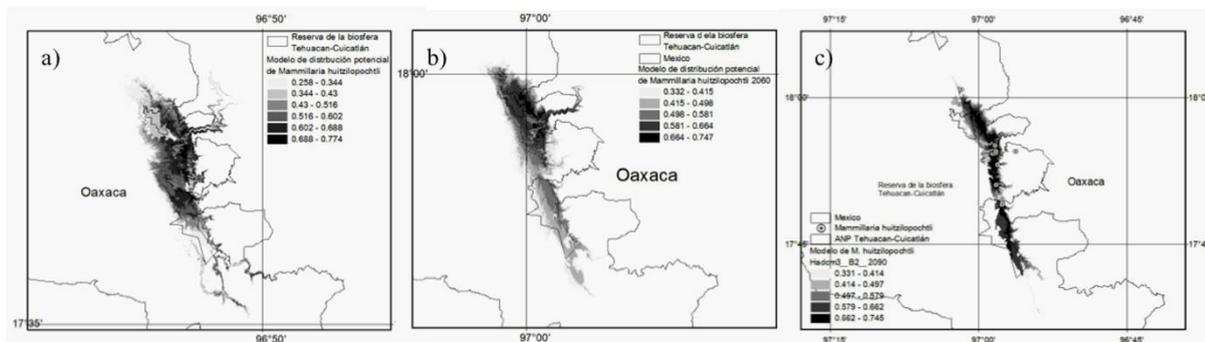


Figura 18. Modelos de distribución potencial de *M. huitzilopochtli* a) actual, b) Hadcm3\_B2\_2060, y c) Hadcm3\_B2\_2090.

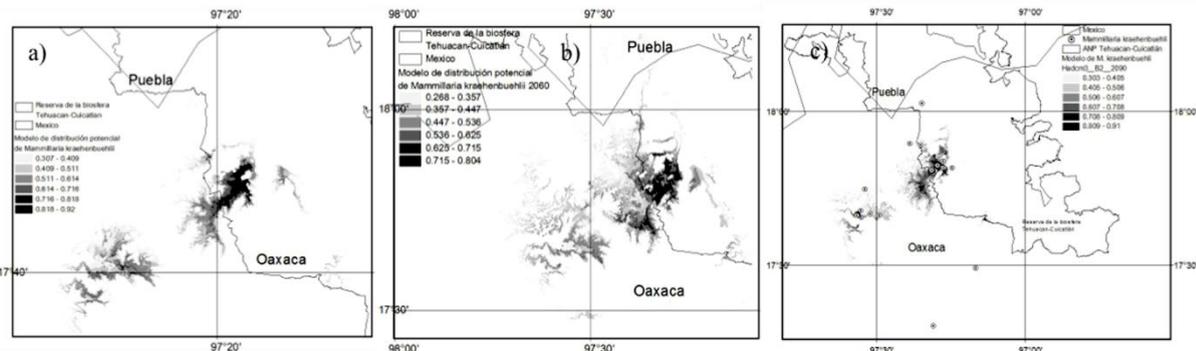


Figura 19. Modelos de distribución potencial de *M. kraehenbuehlii* a) actual, b) Hadcm3\_B2\_2060, y c) Hadcm3\_B2\_2090.

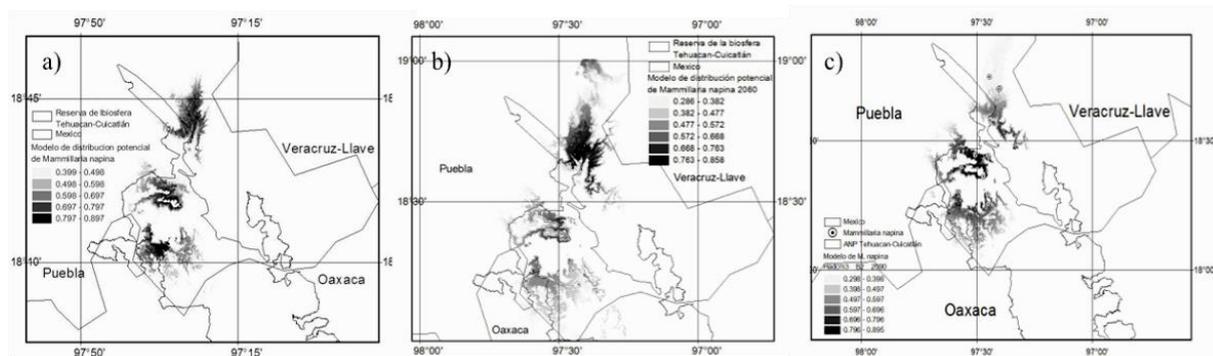


Figura 20. Modelos de distribución potencial de *M. napina* a) actual, b) Hadcm3\_B2\_2060, y c) Hadcm3\_B2\_2090.

## DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

La distribución de las cinco especies estudiadas fue limitada ya que abarca menos del 5% del territorio nacional en todos los casos, inclusive las poblaciones de *Mammillaria hernandezii* posiblemente estén incluidas en menos del 1% del territorio. Aunado a lo anterior, todas las poblaciones de esta especie se localizan afuera del polígono de la Reserva de la Biósfera de Tehuacán-Cuicatlán. El tamaño poblacional, así como el área real de ocupación fue pequeño en todas las poblaciones de las especies estudiadas, con excepción de una población de *Mammillaria huitzilopochtli*, la cual fue localizada al final del estudio y en la que se encontró una alta densidad de plantas. Además, se observó aislamiento geográfico en todas las poblaciones, causado tanto por barreras naturales (distancia y heterogeneidad del paisaje) como por fragmentación del hábitat (perturbación y disturbio antropogénico, sobrecolecta, etc.). De manera general, el microhábitat de las especies estudiadas es aparentemente no-específico y la interacción con otras especies de plantas (facilitación o nodriscismo) es facultativa sólo en algunas poblaciones de *Mammillaria* spp., lo cual es un patrón recurrente en distintas especies de cactáceas globosas (Godínez-Álvarez *et al.* 2003). Sin embargo, en las poblaciones de *M. huitzilopochtli* se encontró una mayor densidad en grietas y acantilados de rocas con una textura de suelo particular; mientras que se registró un número relativamente alto de individuos de *M. hernandezii* asociados a pastizales de *Cynodon dactylon* y *Aristida adscensionis*, posiblemente originados por disturbio antropogénico. La distribución restringida en las poblaciones de estas especies posiblemente obedezca a la combinación de distintas variables climáticas, así como a diversos eventos dentro de su historia evolutiva. Como ha sido mencionado en trabajos anteriores, es bien conocido que la distribución espacial de las cactáceas puede ser sensible a la textura del suelo, lo cual a su vez es asociado con el desarrollo del suelo. De manera general, tanto *Ferocactus haematacanthus* como las 4 especies de *Mammillaria*

estudiadas crecen en suelos con texturas predominantemente arenosas y niveles intermedios de fertilidad, en términos del contenido de materia orgánica y potasio. Aunque los sitios donde crece *M. hernandezii* se caracterizan por tener suelos incipientes con relativamente bajo contenido de materia orgánica, debido, entre otros factores, a la escasez de la cobertura vegetal. De la misma forma, los acantilados de roca donde crece *M. huitzilopochtli* tienen bajo contenido en materia orgánica y nutrientes. La preferencia de las distintas especies de cactáceas sobre suelo con diferentes texturas puede estar relacionado con su habilidad para germinar y establecerse (Ruedas *et al.* 2006).

La cactácea toneliforme *Ferocactus haematacanthus* presentó patrones fenológicos distintos a las especies globosas de *Mammillaria*. Esta especie de *Ferocactus* tiene una floración masiva y sincrónica dentro y entre sus poblaciones, los visitantes florales están presentes (principalmente insectos generalistas) y se observó una producción relativamente alta de frutos y semillas. Las semillas recientemente colectadas mostraron bajos porcentajes de germinación bajo condiciones de invernadero, es posible que una proporción de sus semillas presenten latencia fisiológica y requieran de un periodo de postmaduración en el suelo para germinar (Rojas-Aréchiga y Vázquez-Yanes 2000). El análisis de las estructuras de tamaños en las distintas localidades muestran que, a pesar de que el número de individuos jóvenes y adultos es proporcionalmente alto, las evidencias de reclutamiento son escasas en las poblaciones estudiadas. Los resultados del presente estudio sugieren que es altamente probable que el número de individuos totales de *F. haematacanthus* sea menor a 500, por lo que de acuerdo con el MER, debería de considerarse, por la vía directa, en la categoría de riesgo “En peligro de extinción (P)” (Cuadro 2). No obstante lo anterior, debe de tenerse cautela con este resultado ya que es posible que existan un número mayor de poblaciones que las estudiadas aquí.

Por otro lado, en las distintas poblaciones de las especies de *Mammillaria* estudiadas se observaron variaciones en relación con sus patrones reproductivos. Solamente se ha observado una floración masiva y sincrónica dentro y entre las poblaciones en *Mammillaria kraehenbuehlii* y *Mammillaria napina*, aunque en esta última la reproducción sincrónica y masiva puede estar relacionada con el fenómeno conocido como el niño (ENSO por sus siglas en inglés), sin embargo se requieren estudios de largo plazo para comprobar la idea anterior. Por el contrario, la producción de flores y frutos en las poblaciones de *M. hernandezii* y *M. huitzilopochtli* es relativamente baja, y a pesar de que la fenología está relacionada con la temporada invernal, se observó que los descensos en la temperatura pueden afectarla negativamente. Al menos tres de las cuatro especies de *Mammillaria* presentan síndrome de polinización por insectos (se observaron principalmente pequeños himenópteros en algunas poblaciones). Su número de semillas por fruto es bajo (<100 semillas) en comparación con otras cactáceas de similar forma de crecimiento (Rojas-Aréchiga y Vázquez-Yanes 2000; Álvarez *et al.* 2004) y la germinación fue variable. Mientras que *M. kraehenbuehlii* y *M. napina* presentaron bajos porcentajes de germinación, éstos son altos para semillas de *M. huitzilopochtli*. En relación con este aspecto, los datos existentes para *M. hernandezii* son insuficientes dado que en dos años consecutivos la producción de flores fue abortada a causa de descensos drásticos en la temperatura. Aunado a lo anterior, en poblaciones de *M. hernandezii* y *M. napina* se ha reportado serotinia o retención de semillas (Rodríguez-Ortega 2008) la cual es una estrategia ligada al ambiente que podría afectar su dinámica poblacional. En relación con lo anterior, no se observaron evidencias de reclutamiento reciente en las poblaciones de *M. hernandezii* y *M. napina*, aunque sí se observaron plántulas de *M. huitzilopochtli* e individuos clonales de distintos tamaños en *M. kraehenbuehlii* en algunas de sus respectivas poblaciones. De manera general, los resultados de las estructuras de tamaños en las poblaciones de las distintas especies coinciden con lo observado en diversas especies de cactáceas (Godínez-Alvarez *et al.* 2003). La mayoría reflejan patrones de reclutamiento por pulsos, posiblemente asociados con temporadas particularmente benéficas para la germinación y el establecimiento de nuevos individuos, condiciones que son escasas en las zonas semiáridas del Valle de Tehuacán-Cuicatlán. El número de individuos pequeños, que representan a las plántulas, es de manera general muy bajo en las poblaciones estudiadas.

En relación con la diversidad y estructura genética de las especies estudiadas (con excepción de *F. haematacanthus*) se tienen las siguientes conclusiones generales, en términos de heterocigosidad observada promedio las cuatro especies de *Mammillaria*, presentan niveles moderados, lo cual no es congruente con el tamaño poblacional relativamente pequeño que fue estimado en la parte ecológica de

este estudio. Lo anterior puede ser explicado considerando que, 1) es probable que lo que actualmente se observa como poblaciones pequeñas y aisladas entre ellas, representen remanentes de poblaciones grandes y continuas que existieron en el pasado, 2) que sea un efecto del marcador molecular, dado que se reconoce que los microsátélites suelen detectar altos niveles de variabilidad alélica en contraste por ejemplo con las isoenzimas; las que han sido utilizadas tradicionalmente para el análisis de diversidad genética de cactáceas. Esto último se podría sustentar con el caso de *Astrophytum asterias* (Terry *et al.* 2012), otra cactácea globosa de pequeño tamaño que también presenta tamaños poblacionales pequeños y aislamiento geográfico, ya que con microsátélites también se detectaron niveles altos de heterocigosidad. Sin embargo, el caso de *M. huitzilopochtli* es el más preocupante dado que en las cinco poblaciones analizadas se encontraron niveles altos de endogamia, lo cual no puede ser explicado solamente desde el punto de vista de los niveles de flujo génico pues en promedio son altos, por tanto quizá estén notándose los efectos de la combinación de flujo, deriva génica y tamaños poblacionales pequeños. De acuerdo con el MER, *M. huitzilopochtli* debería de considerarse como “Amenazada (A)” (Cuadro 8). Todas las especies tienen niveles relativamente moderados de endogamia lo que indica que al menos alguna de sus poblaciones tiene deficiencia de heterocigotos, aunque en *M. kraehenbuehlii* no parece ser el caso, por tanto el tamaño poblacional es el parámetro demográfico que se debe cuidar para evitar la pérdida de heterocigosidad. Actualmente, *M. kraehenbuehlii* puede ser considerada como “Sujeta a Protección Especial (Pr)” (Cuadro 11). Respecto a los niveles de diversidad alélica, los cuales han sido discutidos en relación con la reducción drástica de los tamaños poblacionales (cuellos de botella) ocurridos en pocas generaciones (Allendorf 1986) es *M. hernandezii* el caso más preocupante (Cuadro 4). Los resultados de estos análisis apoyan lo obtenido en el MER, el cual ubicaría a *M. hernandezii* como especie “En Peligro de Extinción (P)” (Cuadro 5). Para las cuatro especies se puede concluir que es fundamental mantener sus tamaños poblacionales que eviten efectos de endogamia y de deriva génica, así como cuidar que no se incremente el aislamiento geográfico que impida el flujo de genes por las vías de semilla o polen entre poblaciones. Es importante además enfatizar que los individuos de cada población representan la principal fuente de variación genética de acuerdo con el análisis de AMOVA. El estado actual de las poblaciones de *M. napina* sugiere que esta especie se ubicaría en la categoría de “Amenazada (A)” de acuerdo con el MER (Cuadro 14).

Las evaluaciones de conservación de especies particulares, entre ellas las más sensibles por su distribución restringida, que es el caso del presente estudio, son no solo necesarias, sino altamente diagnósticas. Estas aún son insuficientes ante las expectativas de los embates futuros de los inevitables cambios en el uso del suelo y los efectos que el cambio climático propicien. Si bien, en algunos de los casos una evidente afectación por los cambios en el uso del suelo no fue patente, el hecho de haber documentado durante varios años los avances y acercamiento de la agricultura de subsistencia y temporal, el incremento y nuevamente acercamiento de ganado menor hacia varias de las poblaciones estudiadas, nos indica que es cuestión de tiempo que las poblaciones estudiadas se vean afectadas directamente por tales eventos. Además, si estos eventos que parecen inevitables son sumados a las evidencias documentadas en los cambios en la fenología de, al menos, dos de las especies por efectos del clima, el escenario de afectación es dramático.

Es así, que no obstante haber llegado a conclusiones categóricas para cada una de las especies en este estudio, basadas como ya se describió en el análisis de algunos factores relacionados con ellas desde una perspectiva casi exclusivamente biológica, la incertidumbre que genera la afectación que producirán esos factores estresantes señalados, lleva a extremar las precauciones y a emitir medidas urgentes de mitigación y recuperación en prácticamente todas las especies consideradas en este trabajo. De acuerdo con la información disponible en la literatura, en conjunto con la generada mediante trabajo de campo y laboratorio en el presente estudio, se muestran las categorías resultantes del MER (cuadro 16) para las cinco especies estudiadas; la evaluación detallada se presenta tanto en las secciones anteriores como en el Anexo 1.

**Cuadro 16. Método de evaluación de riesgo de extinción de plantas en México (MER)**

Categorías de riesgo de las especies estudiadas, se muestra la categoría de riesgo actual (NOM-059-SEMARNAT-2010) y la resultante en base al presente estudio.

<b>Especie</b>	<b>Categoría NOM 2010</b>	<b>Puntaje obtenido</b>	<b>Resultado</b>
<i>Ferocactus haematacanthus</i>	Sujeta a Protección Especial (Pr)	1.83	En Peligro de Extinción (P). Por Vía Directa.
<i>Mammillaria hernandezii</i>	Sujeta a Protección Especial (Pr)	2.27	En Peligro de Extinción (P)
<i>Mammillaria huitzilopochtli</i>	Sujeta a Protección Especial (Pr)	1.99	Amenazada (P)
<i>Mammillaria kraehenbuehlii</i>	Sujeta a Protección Especial (Pr)	1.44	Sujeta a Protección Especial (Pr)
<i>Mammillaria napina</i>	Amenazada (A)	1.96	Amenazada (A)

**BIBLIOGRAFÍA**

- Allendorf F. W. 1986. Genetic drift and the loss of the allele versus heterozygosity. *Zoo Biology*. 5:181–190.
- Álvarez R., Godínez A. H., Guzmán U. y Dávila A. P. 2004. Aspectos Ecológicos de dos Cactáceas Mexicanas Amenazadas: Implicaciones para su Conservación. *Boletín de la Sociedad Botánica de México*. 75: 7-16.
- Arias M. S., Gama L. S. y Guzmán C. L. 1997. Fascículo 14. Cactaceae A. L. Juss. Flora de Valle de Tehuacán-Cuicatlán. Instituto de Biología UNAM. Pp: 38-40.
- Becerra 1997. Estudio de caso: Las Cactáceas en: *La diversidad biológica de México: Estudio de País 1998*. CONABIO 1998. México.
- Ceballos G. 2001. Especies raras el conocimiento de la diversidad biológica y la conservación. *Biodiversitas*. Año 6 núm. 38.
- CONABIO. 1998. *La diversidad biológica de México: Estudio de País 1998*. Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad. México.
- ESRI (Environmental Scientific Research Institute). 2000. ArcView 3.2. ESRI Redlands California.
- Excoffier L., Laval G. y Schneider S. 2005. Arlequin ver. 3.0: An integrated software package for population genetics data analysis. *Evolutionary Bioinformatics Online* 1: 47-50.
- Flores V.O. y P. Gerez. 1994. Biodiversidad y conservación en México: vertebrados vegetación y uso del suelo. 2ª edición. CONABIO-UNAM. México. 439 pp.
- Flores-Martínez A., Manzanero-Medina G. I., Martínez-Hernández G. C. y Pacheco-Vásquez. G. S. 2002. Aspectos sobre la ecología y reproducción de *Mammillaria kraehenbuehlii* (Krainz) Krainz en la Mixteca de Oaxaca México. *Cactáceas y Suculentas Mexicanas* 47: 57-68.
- Flores-Martínez A. y Manzanero-Medina G. I. 2005. Método de evaluación de riesgo de extinción de *Mammillaria huitzilopochtli* D. R. Hunt. *Cactáceas y Suculentas Mexicanas* 1: 15-26.
- Flores-Martínez A., Manzanero M. G. I., Rojas-Aréchiga M., Mandujano M. C. y Golubov J. 2008. Seed age germination responses and seedling survival of an endangered cactus that inhabit cliffs. *Natural Areas Journal* 28:51-57.
- Flores-Martínez A., Manzanero-Medina G. I., Golubov J., Montaña C. y Mandujano M. C. 2010. Demography of an endangered endemic rupicolous cactus. *Plant Ecology* 210: 53-66.
- Frankham, R., Ballou, J. D., Briscoe, D. A. 2002. *Introduction to Conservation Genetics*. Cambridge University Press, Cambridge.

- Godínez A. H. 2002. Evaluación de dos cactáceas mexicanas incluidas en el apéndice 1 de CITES. Universidad Nacional Autónoma de México. Facultad de Estudios Superiores Iztacala. Informe final SNIB-CONABIO proyecto No. V039. México D. F.
- Godínez-Álvarez H., Valverde T. y Ortega-Baes P. 2003. Demographic Trends in the Cactaceae. *The Botanical Review* 69: 173-203.
- Gutiérrez G. K. 2007. Evaluaciones preliminares de conservación: estudio de caso de *Feroactus haematacanthus* (Salm-Dick) Bravo Cactaceae. Tesis de Biología. FES Iztacala UNAM. 63 p.
- INEGI, 2009. Guía para la interpretación de cartografía, uso de suelo y vegetación. Escala 1:250000, Serie III. 74 p.
- Inskipp T. y Gillett H. J. (Eds.). 2003. Checklist of CITES Species. Compilado por UNEP-WCMC. CITES Secretariat Geneva Switzerland y UNEP-WCMC Cambridge UK. 339 p.
- Lira R., Téllez V. O. y Dávila A. P. 2009. The effects of climate change on the geographic distribution of Mexican wild relatives of domesticated Cucurbitaceae. *Genetic Resource and Crop Evolution* 56(5): 691-703.
- Luna V. I., Alcántara A. O. y R. Contreras M. R. 2004. Patterns of diversity endemism and conservation: an example with Mexican species of Ternstroemiaceae Mirb. ex DC. (Tricolpates: Ericales). *Biodiversity and Conservation* 13: 2723-2739.
- Mandujano M. C. 2003. *Mammillaria hernandezii*. Clasificación de tres especies endémicas de *Mammillaria* dentro del PROY-NOM-ECOL-059-2000. Departamento de Ecología Evolutiva, Instituto de Ecología, Universidad nacional Autónoma de México. Base de datos SNIB-CONABIO. Proyecto W031. México. D.F.
- Mandujano M. C., Carrillo A. I., Martínez P. C. y Golubov J. 2010. Reproductive biology of Cactaceae. En Ramawat K. G. (Ed.): *Desert Plants*. Springer Berlin Heidelberg Pub. Pp: 197-230.
- Martorell C. y Patiño P. 2006. Globose cacti (*Mammillaria*) living on cliffs avoid high temperatures in a hot dryland of Southern Mexico. *Journal of Arid Environments* 67: 541-552.
- Martorell C. y Peters E. M. 2008. Disturbance response analysis: a method for rapid assessment of the threat to species in disturbed areas. *Conservation Biology* 23(2): 377-387.
- Michalakis Y. y Excoffier L. 1996. A generic estimation of population subdivision using distances between alleles with special reference for microsatellite loci. *Genetics* 142:1061-4.
- Nei M. 1977. F-statistics and analysis of gene diversity in subdivided populations. *Annals of Human Genetics*. 41: 225-233.
- Palmer M. E. 1987. A critical look at rare plant monitoring in the United States. *Biological Conservation* 39: 113-127.
- Pavlik M. B. 1997. Perspectives tools and institutions for conserving rare plants. *The Southwestern Naturalist* 42(4): 375-383.
- Peters E. M., Martorell C. y Ezcurra E. 2008. Nurse rocks are more important than nurse plants in determining the distribution and establishment of globose cacti (*Mammillaria*) in the Tehuacán Valley, Mexico. *Journal of Arid Environments* 72: 593-601.
- Rodríguez-Ortega C. 2008. Consecuencias demográficas y evolutivas del secuestro de semillas en tres especies del género *Mammillaria* (Cactaceae). Tesis de Doctorado. Posgrado en Ciencias Biológicas UNAM.
- Rojas-Aréchiga M. y Vásquez-Yanes C. 2000. Cactus seed germination: a review. *Journal of Arid Environments* 44: 85-104.
- Ruedas M., Valverde T. y Zavala-Hurtado J. A. 2006. Analysis of the factors that affect the distribution and abundance of three *Neobuxbaumia* species (Cactaceae) that differ in their degree of rarity. *Acta Oecologica* 29: 155-164.
- Schemske D. W., Husband B. C., Ruckelshaus M. H., Goodwillie C., Parker I. M. y Bishop J. G. 1994. Evaluating approaches to the conservation of rare end endangered plants. *Ecology* 75(3): 584-606.
- Steenbergh W. H. y Lowe C. H. 1969. Critical factors during first years of life of the saguaro (*Cereus giganteus*) at the Saguaro National Monument Arizona. *Ecology* 50: 823-834.

- SEMARNAT. 2010. Norma Oficial Mexicana NOM-059-SEMARNAT-2010. Protección ambiental-Especies nativas de México de flora y fauna silvestres-Categorías de riesgo y especificaciones para su inclusión, exclusión o cambio-Lista de especies en riesgo. Diario Oficial de la Federación 30 de diciembre de 2010.
- Solórzano A. S., Cortés P. C., Ibarra A., Dávila A. P. y Oyama K. 2009. Isolation characterization and cross-amplification of polymorphic microsatellite loci in the threatened endemic *Mammillaria crucigera* (Cactaceae). *Molecular Ecology Resources* 9: 156-158.
- Téllez V. O. y Dávila P. A. 2003. Protected Areas and Climate Change: A Case Study of the Cacti in the Tehuacán-Cuicatlán Biosphere Reserve México. *Conservation Biology* 17: 3.
- Téllez V. O. Dávila A. P. y Lira S. R. 2006. The effects of climate change on the long-term conservation of *Fagus grandifolia* var. *mexicana* an important species of the Cloud Forest in Eastern Mexico. *Biodiversity and Conservation* 15: 1095-1107.
- Terry M. K., Pepper A. E., Strong A. W., Tarin D. M., Price D. M., y Manhart J. R. 2012. Genetic structure of a population of the endangered star cactus (*Astrophytum asterias*) in southern Texas. *Southwest Naturalist*. 57:182-188.
- Ureta S. C. 2006. Evaluación del disturbio antropogénico crónico sobre el comportamiento demográfico de dos especies de *Mammillaria* (Cactaceae). Tesis de Biología. Facultad de Ciencias UNAM. 71 p.
- Ureta S. C. y Martorell C. 2009. Identifying the impacts of chronic anthropogenic disturbance on two threatened cacti to provide guidelines for population-dynamics restoration. *Biological Conservation* 142: 1992-2001.
- Valiente-Banuet, A., Solís L., Dávila A. P., Arizmendi M. C., Silva P. C., Ortega R. J., Treviño C. J., Rangel L. S., y Casas A. 2009. Guía de la vegetación del Valle de Tehuacán-Cuicatlán. UNAM. Pp: 36-58.
- Villaseñor J. y Téllez V. O. 2004. Distribución potencial de las especies del género *Jefea* (Asteraceae) en México. *Anales del Instituto de Biología* 75(2): 205-220.
- Vischi N., Natale E. y Villamil C. 2004. Six endemic plant species from central Argentina: an evaluation of their conservation status. *Biodiversity and Conservation* 13: 997-1008.
- Wright S. 1951. The genetical structure of populations. *Annals of Eugenics*. 15:323-354.