



Distribución geográfica y estado de conservación de las poblaciones de *Mammillaria pectinifera*

Geographic distribution and conservation status of *Mammillaria pectinifera* populations

Edward M. Peters¹, Santiago Arizaga^{2✉}, Carlos Martorell³, Rigel Zaragoza⁴ y Exequiel Ezcurra⁵

¹Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad. Liga Periférico- Insurgentes Sur 4903, Parques del Pedregal, Tlalpan, 14010 México, D. F., México.

²Escuela Nacional de Estudios Superiores, Unidad Morelia. Universidad Nacional Autónoma de México-Campus Morelia. Antigua Carretera a Pátzcuaro 8701, Col. Ex-Hacienda de San José de la Huerta, 58190 Morelia, Michoacán, México.

³Departamento de Ecología y Recursos Naturales, Facultad de Ciencias, Universidad Nacional Autónoma de México. Circuito Exterior s/n, Ciudad Universitaria, Coyoacán, 04510 México, D. F., México.

⁴Centro de Investigaciones en Geografía Ambiental. Universidad Nacional Autónoma de México. Antigua Carretera a Pátzcuaro # 8701, Col. Ex-Hacienda de San José de la Huerta, 58190 Morelia, Michoacán, México.

⁵Department of Botany and Plant Science. University of California-Riverside. 900 University Avenue, Riverside, California 92521, USA.

✉ santiago_arizaga@enesmorelia.unam.mx

Resumen. *Mammillaria pectinifera* es un cacto amenazado y endémico del valle de Tehuacán. A mediados de la década de 1990 sólo se conocían 6 localidades con un número reducido de individuos, información que fue clave para proteger a la especie con instrumentos legales nacionales e internacionales. Para ampliar el conocimiento de la distribución geográfica y estado de conservación de esta especie, realizamos recorridos exploratorios en zonas ecológicas similares al de las poblaciones conocidas y, posteriormente, mediante un modelo predictivo de distribución geográfica. Los resultados indican que la especie está conformada por al menos 31 localidades y un número mucho mayor de individuos al registrado en estudios previos, lo que sugiere que para evaluar la distribución, abundancia y presión sobre especies poco conspicuas, es necesario dar un fuerte énfasis al trabajo de exploración, utilizando las mejores herramientas y métodos disponibles. No obstante, al incremento sustancial de localidades e individuos, y que el 55% de éstas se encuentran dentro de la Reserva de la Biosfera Tehuacán-Cuicatlán, este cacto presenta un alto grado de presión antrópica, lo que sugiere que la especie es vulnerable a desaparecer en algunas localidades si las tasas de deterioro de su hábitat no disminuyen en el corto plazo.

Palabras clave: Cactaceae, Reserva de la Biosfera Tehuacán-Cuicatlán, modelación de nicho ecológico, análisis GARP, Nom-059.

Abstract. *Mammillaria pectinifera* is an endangered cactus endemic to the Tehuacán Valley. In the mid-1990s, 6 localities with few individuals were known. This information was crucial for protecting the species through national and international legal instruments. To enhance the knowledge on its geographic distribution and conservation status, exploratory expeditions were made: first throughout ecological areas similar to those known with existing populations, and later based on a predictive model of geographic distribution. Results show that the species is composed by at least 31 localities and a much larger number of individuals, and suggest the need of stronger emphasis on exploration with the best available methods and tools in order to assess the distribution, abundance and pressure on a slightly conspicuous species. In spite of the substantial increase in localities, and considering the fact that 55% of them are within the Tehuacán-Cuicatlán Biosphere Reserve, the cactus is under high anthropogenic pressure, suggesting that the species is vulnerable to disappearing in some localities if deterioration rates of its habitat are not reduced in the short term.

Key words: Cactaceae, Tehuacán-Cuicatlán Biosphere Reserve, ecological niche modelling, GARP analysis, Red list.

Introducción

Las cactáceas han llamado la atención de científicos y aficionados por sus adaptaciones al medio árido y su

diversidad de formas de vida, que van desde los pequeños cactos globosos, de unos cuantos centímetros de diámetro hasta los impresionantes candelabros de más de 15 m de altura. Estas plantas han encontrado en México condiciones ideales para desarrollarse y diversificarse, ya que cerca del 60% del territorio es árido (Bravo-Hollis, 1978). México

alberga cerca del 45% de las especies de cactáceas del mundo con, aproximadamente, 63 géneros, 669 especies y 244 subespecies, de los cuales un 79% son endémicas (Arias, 1993; Guzmán et al., 2003).

Los cactus mexicanos están experimentando disturbios de tipo antropogénico: cambios de uso de suelo por deforestación, agricultura, ganadería, crecimiento urbano y en algunos casos sobrecolecta; haciéndolos un recurso natural altamente amenazado (Hernández y Godínez, 1994; Martorell y Peters, 2005; Semarnat, 2010; CITES, 2013; UICN, 2013). Como resultado, en los últimos años han sido incluidos en listados a nivel nacional e internacional para señalar su categoría de riesgo y su necesidad de protección. Para el caso de México, 276 taxones (202 especies y 74 subespecies) figuran en la Norma Oficial Mexicana (Nom-059-Semarnat-2010), 190 especies en la lista roja de la UICN y 35 taxones (géneros, especies y subespecies) en el Apéndice I del CITES (Semarnat, 2010; UICN, 2013; CITES, 2013).

Los géneros *Opuntia* y *Mammillaria* son los cactus con el mayor número de especies en México (Bravo-Hollis y Sánchez-Mejorada, 1991; Guzmán-Cruz et al., 2003). De los 232 taxones del género *Mammillaria* (163 especies y 69 subespecies), el 90% son endémicos de México (Hunt et al., 2006). Para el género *Mammillaria*, se ha estimado que el desierto Chihuahuense, incluyendo Querétaro e Hidalgo, comprende el 54% de las especies, el desierto Sonorense contiene el 24%, mientras que el valle de Tehuacán-Cuicatlán alberga el 11% (Bravo-Hollis y Sánchez-Mejorada, 1991; Guzmán-Cruz et al., 2003).

Mammillaria pectinifera (Rümpel) F. A. C. Weber es un cacto raro –por su presencia en bajos números, su restricción geográfica y por su alta especificidad de hábitat (Rabinowitz et al., 1986; Zavala-Hurtado y Valverde, 2003)–, endémico del valle de Tehuacán-Cuicatlán. Está incluido en el Apéndice I de la CITES (CITES, 2013) y es considerado como una especie amenazada por la Nom-059 (Semarnat, 2010) y por la UICN (2013). Su estudio se ha centrado en la descripción básica de su morfología y taxonomía (Boke, 1960; Bravo-Hollis y Sánchez-Mejorada, 1991; Arias et al., 1997), y más recientemente en aspectos de su biología, ecología y filogeografía (Rodríguez-Ortega y Ezcurra, 2001; Zavala-Hurtado y Valverde, 2003; Martorell y Peters, 2005; Rodríguez-Ortega et al., 2006; Valverde y Zavala-Hurtado, 2006; Peters et al., 2008; Martorell y Peters, 2009; Peters et al., 2009; Valverde et al., 2009; Peters et al., 2011; Cornejo-Romero et al., 2014). Se trata de un cacto globoso de tamaño pequeño, simple y semigeofítico de 1-5 cm de diámetro y de 1-2 cm de altura; las areolas tienen espinas radiales blancas, pectinadas y adpresas que cubren totalmente a la planta (Arias et al., 1997).

Trabajos previos al presente muestran que el conocimiento de la distribución geográfica de *M. pectinifera* era escaso (Anderson, 1990; Bravo-Hollis y Sánchez-Mejorada, 1991; Arias et al., 1997). Desde el punto de vista poblacional, Anderson et al. (1994) mencionan la existencia de sólo 3 poblaciones, de las cuales 2 presentaban evidencias de amenaza por la modificación del hábitat (extracción de roca para construcción, basureros, crecimiento urbano y ganadería), así como por la colecta ilegal de plantas por coleccionistas.

Avanzar en el conocimiento de *M. pectinifera* es fundamental para establecer esquemas de conservación, ya que su rareza y el deterioro acelerado de su hábitat las expone a la pérdida o deterioro de sus poblaciones. Además, la vulnerabilidad de la especie está íntimamente ligada al número de poblaciones e individuos. En función de lo anterior, los objetivos del presente trabajo son: *i*) conocer la distribución actual de *M. pectinifera* en la región de Tehuacán-Cuicatlán; *ii*) caracterizar algunas poblaciones y evaluar su estado de conservación, e *iii*) identificar los factores que la amenazan para emitir recomendaciones para su conservación.

Materiales y métodos

Área de estudio. La investigación se realizó en la región de Tehuacán-Cuicatlán. Ésta se caracteriza por poseer una de las vegetaciones xerófilas más diversas del mundo (Smith, 1965; Meyrán, 1980; Villaseñor et al., 1990; Rzedowski, 1991; Arias, 1993; Arias et al., 1997; Dávila et al., 2002), con un 30% de endemismos (Villaseñor et al., 1990; Dávila et al., 2002). Se ubica en el sureste de Puebla y el noroeste de Oaxaca (Fig. 1), y es la región árida más meridional de Norteamérica.

Distribución geográfica. Se revisó la literatura existente sobre la distribución de la especie (Anderson, 1990; Bravo-Hollis y Sánchez-Mejorada, 1991; Anderson et al., 1994) y en el Herbario Nacional de México (MEXU), a finales de 1995. Con la información obtenida se realizaron salidas de campo, entre marzo de 1996 a mayo de 1997, para cotejar la existencia de la poblaciones y registrar las condiciones ecológicas de la especie. Para fines comparativos estas poblaciones fueron denominadas como *poblaciones históricas*.

Para ubicar nuevas localidades de *M. pectinifera*, se realizaron salidas exploratorias en 2 periodos distintos (1997 y 1999), buscando sitios con condiciones ecológicas similares a las observadas en las *poblaciones históricas*. Cuando se encontraron nuevas localidades de la especie, se registró su ubicación geográfica con un geoposicionador (GPS Marca Garmin, Modelo Etrex). Nos referiremos a estas nuevas localidades como *poblaciones descubiertas*,

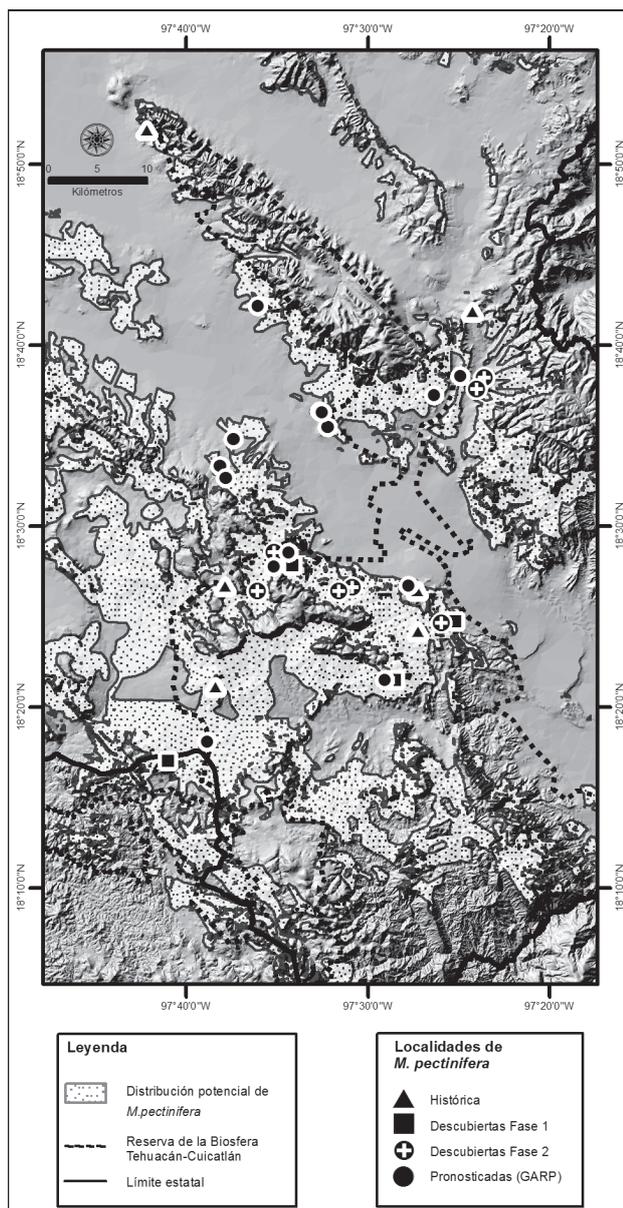


Figura 1. Ubicación del sitio de estudio, distribución potencial de *M. pectinifera* y ubicación geográfica de las distintas localidades registradas en esta investigación (Cuadro 1).

distinguiendo como Fase 1 a los hallazgos de 1997, y como Fase 2 a las poblaciones encontradas en 1999.

Usando las poblaciones descubiertas en la Fase 1, más las *poblaciones históricas*, se desarrolló un modelo de distribución potencial mediante el programa Genetic Algorithm for Rule-Set Prediction (GARP). Éste emplea inteligencia artificial para buscar relaciones no aleatorias entre puntos de presencia de organismos y variables ambientales (Benito-De Pando y Peñas-De Giles, 2007).

El algoritmo ha sido probado en campo varias veces, con resultados predictivos muy robustos (Peterson, 2001; Anderson et al., 2003; Luna-Vega et al., 2012). Los datos ambientales usados por el GARP fueron: edafología, geología, uso de suelo, vegetación y topografía vectoriales a una escala de 1:250 000 (Inegi, 1985-2000, 1980-2000, 1995-1997, 2005). A partir de los datos topográficos se generó un modelo digital de elevación mediante el programa Triangular Irregular Networks (TIN; Zeiler, 1999) con el que se elaboró un mapa de pendientes y altitudes. El máximo número de iteraciones se estableció en 700 (valor usualmente entre 100 y 1 000), con un límite de convergencia de 0.07 (valor usualmente entre 0.01 y 0.1; Peterson y Kluza, 2005). Por lo tanto, al conjuntar los mapas derivados de los datos ambientales con las pendientes y altitudes, se obtuvo como resultado final el mapa de distribución potencial de *M. pectinifera* en la región de Tehuacán-Cuicatlán. Luego se probó el modelo predictivo usando las *poblaciones descubiertas* en la Fase 2.

Con la finalidad de buscar nuevas localidades dentro del área de distribución potencial generado, se realizaron salidas esporádicas de verificación en campo desde octubre de 2007 hasta agosto de 2012. Las nuevas localidades descubiertas en esta etapa fueron denominadas como *poblaciones pronosticadas GARP*.

Caracterización de las poblaciones. Descripción del hábitat. En las *poblaciones históricas* y *descubiertas* en la Fase 1, se registró la altitud —con un altímetro Marca Brunton—, el azimut —N, S, E y O; con una brújula Marca Brunton—, la pendiente —con un clinómetro manual Marca Suunto— y la topografía definida por la forma geológica —ladera, cima y valle—. En 10 sitios al azar por población se estimó visualmente la pedregosidad, definida como la proporción (%) de suelo cubierto por rocas. Asimismo, para cada población se registró la ubicación geográfica con un geoposicionador y el tipo de vegetación usando la clasificación propuesta por Flores-Mata et al. (1971) y Rzedowski (1978), además, se registraron las especies de plantas fisonómicamente dominantes.

Atributos poblacionales. En las *poblaciones históricas* y *descubiertas* en la Fase 1, se estimó el área total (A), trazando el polígono regular, dentro de la cual se encontraban todos los individuos. Usando transectos de 100 m de largo por 1 m de ancho, se muestreó de manera aleatoria, aproximadamente el 1% de la superficie de cada población, excepto en la población de Azumbilla en donde sólo se muestreó el 0.5% del área, debido a la gran extensión de misma. Estos datos se extrapolaron al área total para evaluar el tamaño poblacional (N) que representa la cantidad de individuos por localidad. Los datos anteriores permitieron estimar la densidad de las

poblaciones. Para evaluar si las poblaciones diferían en su densidad se utilizó una prueba H de Kruskal-Wallis y pruebas de U pareadas (Sokal y Rohlf, 1995). También se registró si los individuos presentaban daño visible asociado al ganado o algún agente natural.

Los individuos fueron clasificados por categorías de tamaños del diámetro (≤ 8 , 8.1-16, 16.1-32, y > 32 mm) para describir la estructura de las poblaciones. Dichas categorías corresponden a las plántulas, los individuos juveniles, y a 2 categorías de adultos (A1 y A2), respectivamente; las 2 últimas categorías son los individuos reproductivos. Para comparar las estructuras observadas en las diferentes poblaciones, se utilizó una prueba de χ^2 de independencia seguida de una prueba de residuos ajustados de Haberman para identificar las categorías que difirieron entre poblaciones (Greig-Smith, 1983).

Estatus de conservación de las poblaciones. Se basó en una evaluación cualitativa en campo del estado de conservación que presenta cada población de *M. pectinifera*, tomando en consideración los siguientes criterios: 1) área de distribución de la población; 2) cercanía a poblados humanos; 3) impactos antrópicos en la población y en su vecindad; 4) estructura poblacional. Conjuntando estos criterios se definieron los siguientes niveles de conservación de la población: C = conservada: cuando la población está en un área amplia (≥ 1 ha), no muestra evidencias de estar amenazada por las actividades humanas y exhibe individuos de diversos tamaños que evidencian una dinámica poblacional adecuada. V = alterada: la población se distribuye en un área intermedia (1- 0.5 ha), su hábitat presenta alteraciones por las actividades humanas y exhibe pocos individuos pequeños que sugieren una alteración en su dinámica poblacional. E = en vías de extinción: cuando la población se distribuye en un área pequeña (≤ 0.5 ha), el hábitat está muy afectado por las actividades humanas y hay muy pocos individuos en la población con carencia de individuos pequeños, lo que evidencia una dinámica poblacional muy crítica.

Resultados

Distribución geográfica. Antes de este estudio sólo se conocían 6 localidades de *M. pectinifera* (poblaciones históricas) y se corroboró su presencia. Durante la primera fase de exploración (1997) se descubrieron 4 localidades más, a las que se sumaron otras 8 nuevas localidades en la fase 2 (poblaciones descubiertas; Cuadro 1).

En la figura 1 se muestra el mapa de distribución potencial de *M. pectinifera* que se predijo mediante el modelo GARP. La distribución potencial corresponde, aproximadamente, a una superficie de 175 000 ha, de la cual 38% se ubica dentro de la Reserva de la Biosfera

Tehuacán-Cuicatlán, principalmente en el sureste de Puebla, y en menor proporción hacia el norte de Oaxaca.

La búsqueda dirigida de nuevas localidades de *M. pectinifera*, dentro de esta área de distribución potencial, dio como resultado el hallazgo de 13 localidades (poblaciones pronosticadas GARP; Cuadro 1).

Todas las localidades se ubican dentro del área predicha por el modelo GARP; no obstante, en 5 localidades que fueron visitados no se encontró la especie. Sin embargo, todo este esfuerzo redituó en un incremento sustancial de la distribución conocida de *M. pectinifera*, pasando de 6 a 31 localidades conocidas (Cuadro 1; Fig. 1).

Descripción del hábitat. Las poblaciones de *M. pectinifera* presentaron un rango de distribución altitudinal que varió desde 1 740 a 2 280 m snm, con un valor promedio de $2\ 056 \pm 54$ m. No hubo una preferencia estadísticamente significativa por un azimut determinado, aunque hubo un mayor número de poblaciones en laderas orientadas hacia el este. Los sitios mostraron pendientes poco inclinadas, oscilando de 5° a 15° , con una media de $9.1^\circ \pm 1.38^\circ$. El 69% de los sitios se encontraron sobre laderas, seguido de las cimas (23%). Por el contrario, los valles (8%) fueron poco frecuentes (Cuadro 2).

El suelo que prefiere *M. pectinifera* es poco compacto, de color oscuro, tipo rendzina, desarrollado sobre roca caliza, lo que permite la infiltración del agua y asegura una buena disponibilidad de nutrientes para el cacto.

Se observó en todos los sitios la presencia de material parental en la superficie conformada por rocas sedimentarias de origen calcáreo. Los suelos fueron pedregosos, con una cobertura de rocas de alrededor del 40% (Cuadro 2), la cual no difirió entre poblaciones ($F= 2.24$; $gl= 4$; 53 ; $p= 0.08$).

De manera general, se encontró que la vegetación que conforma el hábitat de la especie estudiada es el matorral submontano (80%), en transición hacia el matorral rosetófilo montano, con la frecuente dominancia de agaváceas, nolináceas y cactáceas. El otro tipo de vegetación donde se encuentra *M. pectinifera* es el matorral micrófilo (20%), que se caracterizó por la presencia de leguminosas de hojas pequeñas (*Acacia* y *Mimosa*; Cuadro 2).

Atributos poblacionales. Las poblaciones mostraron áreas (A) muy desiguales que oscilaron entre 1 y 40 ha, con una media de 9.59 ± 4.01 ha (Cuadro 3). El número de individuos en cada población (N) fue igualmente variable, oscilando entre 2 000 y 21 000 plantas (promedio: $8\ 336 \pm 2\ 019$ individuos). El número de individuos en cada población no estuvo correlacionado con su área ($r= 0.3248$, $p= 0.180$). La mitad de las poblaciones presentó menos de 6 000 individuos. Entre las 10 poblaciones estudiadas se estimaron en total alrededor de 83 000 individuos que

Cuadro 1. Relación de poblaciones (N) y localidades (n) de *M. pectinifera* en el valle de Tehuacán-Cuicatlán

Poblaciones	Año de hallazgo	# Localidad (n)	Nombre de la localidad	Fuente			
Históricas (N= 6)	1980's	1	El Riego-a	Bravo-Hollis y Sánchez-Mejorada, 1991			
		2	Tecamachalco				
		3	San Antonio Texcala				
	≈1986	4	San Lucas Teteletitlán	Arias et al., 1997			
	1993	5	Santiago Nopala				
	1995	6	Azumbilla				
Descubiertas Fase 1 (N= 4)	1997	7	Santa María Coapan	Este trabajo			
		8	San Bartolo Teontepec				
		9	San Sebastián Frontera				
		10	Zapotitlán Salinas-a				
Descubiertas (Fase 2) (N= 8)	1999	11	Chapulco Norte				
		12	Chapulco Sur				
		13	Mezquite				
		14	Mirador				
		15	Montón de Piedra				
		16	Sipiapan				
		17	Tambor				
		18	Cerro Gordo				
		Pronosticadas GARP (N= 13)	2007		19	Tepanco	
					20	Lobo	
					21	Rancho Viejo	
22	San Andrés Cacaloapán						
23	San Marcos						
2008	24		Chapulco Oeste				
	25		Zapotitlán Salinas-b				
	26		El Riego-b				
2012	27		San Luis Temalacayuca				
	28		El Calvario				
	29	Nopala Virgen					
	30	Nopala Norte					
	31	Cruz de Quiote					
N= 31		n= 31					

se distribuyen de manera muy claramente agregada a la vista, normalmente en porciones desprovistas de o con poca vegetación. La densidad poblacional (D) promedio fue de $2\ 383 \pm 484$ individuos/ha, oscilando entre los 237 y 4 731 individuos/ha, difiriendo significativamente entre poblaciones ($H= 33.34$; $gl= 9, 74$; $p < 0.001$). Mediante pruebas de U pareadas se encontró que Azumbilla y San Sebastián Frontera difirieron del resto de las poblaciones.

En todas las poblaciones estudiadas se encontraron evidencias de actividad humana (Cuadro 3). El 75% corresponde a actividades productivas, destacando las pecuarias (55%, principalmente por pastoreo) y las agrícolas (15%); y en menor grado a las extractivas (canteras con 5%). En el 25% restante se encontraron veredas y brechas, y en menor grado con la presencia de basureros y asentamientos humanos. En el 90% de las poblaciones encontramos evidencias de animales domésticos en las cercanías y dentro de las poblaciones; de aquéllos, el ganado caprino fue más importante, con una

frecuencia del 64%. En 3 localidades el cambio de uso del suelo resultó en una gran amenaza a la especie. En un sitio el impacto se debió al establecimiento de una magueyera para la producción de pulque y en los otros 2, a la presencia de tiraderos de basura; uno que recibe los residuos de la ciudad de Tehuacán y el otro que presta los servicios a las comunidades de San Andrés Cacaloapán y Tepanco de López. Todas las poblaciones de *M. pectinifera* están muy próximas a asentamientos humanos, en promedio a 3.0 km de distancia.

La estructura poblacional en términos del diámetro que mostraron los individuos, presentó, en general, una forma de campana en todas las poblaciones, de manera que los individuos de tamaño intermedio (adultos) están presentes en un número mayor, mientras los más pequeños (plántulas) y los más grandes se encuentran en proporciones menores. No obstante, hay algunas categorías de tamaño que presentan un exceso o una deficiencia en algunas localidades (Cuadro 4), lo que determinó que la estructura

Cuadro 2. Descripción de las condiciones ecológicas del hábitat de *M. pectinifera* en el valle de Tehuacán. El símbolo (—) significa que no se cuenta con el valor correspondiente para la variable en cuestión

Localidad	Altitud (m)	Azimet	Pendiente	Topografía	Pedregosidad (%)	Tipo de vegetación	Dominante fisonómico
Azumbilla	2 180	S, E, O y N	5° y 15°	Laderas	—	Matorral submontano	<i>Agave salminana</i> <i>Quercus</i> sp. <i>Yucca</i> sp.
Santa María Coapan	1 740	N	5°	Ladera	34±12	Matorral micrófilo	<i>Acacia</i> sp. <i>Hechtia tehuacana</i> <i>Yucca periculosa</i>
El Riego-a	1 940	NE	—	Cima Ladera	49±16	Matorral submontano	<i>Acacia</i> sp. <i>Dasyllirion acrotriche</i> <i>Hechtia tehuacana</i> <i>Yucca periculosa</i>
San Sebastián Frontera	2 000	NE	10°	Cima Ladera	37±6	Matorral submontano	<i>Acacia subangulata</i> <i>Agave peacockii</i> <i>Gochnatia hypoleuca</i> <i>Yucca periculosa</i>
Santiago Nopala	2 280	NO	7°	Ladera	68±12	Matorral submontano	<i>Brahea dulcis</i> <i>Dasyllirion acrotriche</i> <i>Yucca periculosa</i>
Tecamachalco	2 200	E	—	Cima Ladera	—	Matorral micrófilo	<i>Ipomea</i> sp <i>Opuntia pilifera</i> Pastos
San Bartolo Teontepec	2 000	N, E	—	Ladera	29±7	Matorral submontano	<i>Brahea dulcis</i> <i>Yucca periculosa</i>
San Lucas Teteletitlán	2 220	SO	8°	Ladera	—	Matorral submontano	<i>Calliandropsis</i> sp <i>Dasyllirion acotriche</i> <i>Yucca periculosa</i>
San Antonio Texcala	1 900	N, S, E y O	5-15°	Valle	—	Matorral submontano	<i>Calliandropsis</i> sp <i>Mimosa luisana</i> <i>Yucca periculosa</i>
Zapotitlán Salinas-a	2 100	S	6°	Ladera	—	Matorral submontano	<i>Yucca periculosa</i> <i>Agave stricta</i> <i>Acacia</i> sp.

de tamaños fuera significativamente diferente entre las 10 poblaciones ($\chi^2= 83.63$; $gl= 27$; $p< 0.001$).

Discusión

El conocimiento de la distribución geográfica de *M. pectinifera* aumentó sensiblemente a través de nuestra exploración, pasando de 6 poblaciones conocidas a 31. Se estima que el número de poblaciones es aún mayor, ya que hay localidades conocidas por otros investigadores, autoridades de la Reserva, así como tentativamente presentes en otros herbarios nacionales e internacionales no consultados (Zavala-Hurtado y Valverde, 2003; Valverde y Zavala-Hurtado, 2006; Loaiza y Salazar, 2008; Valverde et al., 2009). Esto señala la escasa exploración botánica que ha tenido *M. pectinifera*, parcialmente por su tamaño pequeño, pero, sobre todo, por lo inconspicuo,

lo que dificulta su ubicación en campo, no sólo para los botánicos, sino para la gente local.

Una de las consecuencias de lo anterior tiene repercusiones sobre las conclusiones del estatus de la especie. Así, por ejemplo, Anderson et al. (1994) registraron a *M. pectinifera* extinta en El Riego. Esta investigación mostró lo contrario; pero en 2007 la población desapareció por extracción de rocas en una cantera sobre la que se desarrollaba. Exploraciones recientes, en agosto de 2012, han evidenciado nuevamente la presencia de *M. pectinifera* en la zona (El Riego-b), pero sobre una cantera que se encuentra en operación, por lo que de nuevo está en alto riesgo de extinción local.

El modelo predictivo GARP para ubicar a *M. pectinifera* parece confiable, descartando acertadamente las partes bajas y señalando la presencia de la especie hacia las montañas. Cerca del 95% del área potencial aún está

Cuadro 3. Caracterización de las poblaciones y efectos antropogénicos de *M. pectinifera*

Población	Área total (A) (ha)	Tamaño poblacional (N) (inds/pob)	Densidad (D) (inds/ha)	Actividad productiva o humana	Cercanía a poblados (km)	Tipo de ganado o cultivo	Tipo de daño del hábitat
Azumbilla	40	5 727	237	Pastoreo	5	Caprino	Pisoteo
Santa María Coapan	1.05	2 545	2 172	Pastoreo	1.9	Caprino	Pisoteo
El Riego-a	1.81	7 727	4 097	Basurero	4	Caprino	Transformación
San Sebastián Frontera	4.73	4 182	882	Minería	4	Vacuno	Consumo
Santiago Nopala	1.54	5 636	3 527	Pastoreo	3	Caprino	Extracción
Tecamachalco	13.46	20 909	1 581	Veredas	1.8	Caprino	Pisoteo
San Bartolo Teontepec	4	7 727	1 892	Ganado	5.8	Caprino	Consumo
San Lucas Teteletitlán	4.36	2 091	1 022	Pastoreo	0.1	Caprino	Fuego
San Antonio Texcala	22.81	18 545	4 731	Pastoreo	2	Magüeyera	Pisoteo
Zapotitlán Salinas-a	2.17	8 273	3 688	Veredas	3.1	Caballar	Extracción

Cuadro 4. Frecuencia observada de la estructura de tamaños de las distintas poblaciones. Entre paréntesis, el valor resultante de la prueba de residuos ajustados de Haberman. La clase de tamaño que se encuentra en “exceso” presenta un valor mayor a 2 (negritas). La clase de tamaño que se encuentra “deficiente” presenta un valor menor a -2

Población	≤ 8 mm	8.1-16 mm	16.1-32 mm	> 32 mm
Azumbilla	0 (-1.8)	5 (-1.1)	21 (1.7)	3 (0.6)
Santa María Coapan	8 (0.0)	27 (1.2)	44 (-1.0)	6 (-0.1)
El Riego-a	13 (2.9)	27 (2.6)	28 (-2.7)	0 (-2.4)
Santiago Nopala	7 (1.5)	12 (0.0)	23 (-0.8)	3 (-0.2)
San Bartolo Teontepec	4 (-2.1)	23 (-1.3)	75 (2.8)	6 (-0.8)
San Lucas Teteletitlán	3 (-0.4)	7 (-1.2)	27 (1.6)	2 (-0.5)
San Sebastián Frontera	2 (-1.7)	12 (-1.3)	38 (0.7)	10 (2.7)
Tecamachalco	15 (0.2)	57 (3.3)	80 (-1.4)	2 (-3.2)
San Antonio Texcala	12 (-1.9)	50 (-0.6)	118 (0.4)	23 (2.5)
Zapotitlán Salinas-a	22 (3.1)	24 (-2.3)	73 (-0.4)	13 (1.2)

inexplorada, con todos los registros confirmados en el estado de Puebla, aunque potencialmente también puede estar en Oaxaca. En general, *M. pectinifera* forma agregaciones de unos cuantos cientos de metros, quizá como resultado de una alta especificidad por el microambiente donde habita (Zavala-Hurtado y Valverde 2003), lo que determina que el modelo predictivo no las detecte, siendo la causa de que la especie no esté presente en toda el área potencial de distribución propuesta.

Un problema inminente con la geografía de la especie, es la incertidumbre sobre los límites de distribución espacial entre poblaciones. En este sentido hemos asumido que cada localidad corresponde a una población de *M. pectinifera*, ya que otros estudios señalan que las poblaciones de cactáceas endémicas frecuentemente están aisladas, con tamaños poblacionales pequeños, distribución restringida, reclutamientos bajos, además de que el movimiento de polen y dispersión de semillas es muy limitado (Godínez-Álvarez et al., 2003; Moraes et al., 2005; Gorelick, 2009; Mandujano et al., 2010; Tapia-Salcido, 2011). Bajo este supuesto hay presumiblemente 31 poblaciones distintas de *M. pectinifera* en el valle de Tehuacán-Cuicatlán, 6 corresponden a las poblaciones históricas, mientras que las 25 restantes pertenecen a las poblaciones nuevas descubiertas durante un periodo de 16 años (Cuadro 1; Fig. 1). No obstante, es necesaria la aplicación de otras metodologías que permitan corroborar esta hipótesis, como puede ser a través de la genética poblacional.

De acuerdo con la zonificación del programa de manejo de la Reserva de la Biosfera Tehuacán-Cuicatlán recientemente aprobado (Anónimo, 2012), el 45% de todas las localidades conocidas de *M. pectinifera* quedan fuera del polígono de conservación (Área de Influencia; Cuadro 5). Esto representa 14 poblaciones de la especie estudiada que presumiblemente corresponden en su mayoría a poblaciones aisladas entre ellas.

Por el contrario, el 55% de las localidades se encuentran dentro de la Reserva y presumiblemente corresponde a 17 poblaciones. Estas poblaciones exhiben diferentes grados de protección, según la zonificación del programa de manejo de la reserva (Anónimo, 2012; Cuadro 5) y la distribución geográfica encontrada en este estudio. En ese sentido, 4 poblaciones (13% del total) estarían protegidas por este instrumento de conservación (zona de Preservación). Nueve presuntas poblaciones (29% del total) estarían parcialmente protegidas, ya que se distribuyen dentro de la zona de Aprovechamiento Sustentable de los Ecosistemas, en donde son permitidas las actividades agropecuarias que potencialmente podrían poner en riesgo a la especie, a pesar de realizarse bajo esquemas de manejo sustentable, según establece el programa de manejo. Por el contrario, 4 poblaciones (13% del total) potencialmente estarían amenazadas al ubicarse dentro de la zona de Uso Tradicional en donde se permite el cambio de uso del suelo bajo esquemas tradicionales (Cuadro 5), ya que los esquemas actuales de manejo tradicional son más intensos que los que se presentaron en décadas pasadas. Así, por ejemplo, hay una mayor superficie de transformación de la vegetación nativa por terrenos agrícolas para alimentar a una población humana que se encuentra en franco crecimiento, los hatos de ganado son más numerosos y las canteras son explotadas con mayor intensidad.

Esto significa que hay numerosas localidades donde se desarrolla *M. pectinifera* que no están adecuadamente protegidas. Estimaciones cualitativas basadas en el trabajo de campo sugieren que el 45% de las poblaciones son potencialmente vulnerables de extinción local de continuar los factores antrópicos que actualmente las afectan (Cuadro 5).

Aunque hemos documentado a la alza el número de poblaciones y de individuos, pareciera que el grado de amenaza de *M. pectinifera* no es tan severo como se pensaba (Valverde et al., 2009; Zavala-Hurtado y Valverde, 2003),

Cuadro 5. Ubicación de las localidades y poblaciones de *M. pectinifera* en relación con el Programa de Manejo de la RB Tehuacán-Cuicatlán. Estimación del estatus de conservación: C= conservada; V= alterada y E= en vías de extinción

Zonificación	Área (%)	Localidad según Cuadro 1 y estatus de conservación	Poblaciones por periodo de descubrimiento					Total
			Histórica	Descubiertas		GARP	Total	
				Fase 1	Fase 2			
A. Reserva de la biosfera								
1. Preservación	28.92	8v, 13c, 14c, 15c	0	1	2	1	4	
2. Uso tradicional	27.28	16c, 26v, 29v, 30v	0	0	2	2	4	
3. Aprovechamiento sustentable de los recursos naturales	6.74	Ninguna	0	0	0	0	0	
4. Aprovechamiento sustentable de los ecosistemas	36.35	1 ^E , 3 ^V , 4 ^C , 5 ^V , 7 ^V , 10 ^C , 17 ^C , 24 ^V , 25 ^C	4	2	1	2	9	
5. Aprovechamiento especial	0.05	Ninguna	0	0	0	0	0	
6. Uso público	0.21	Ninguna	0	0	0	0	0	
7. Asentamientos humanos	0.45	Ninguna	0	0	0	0	0	
B. Área de influencia (Fuera de la Reserva)	—	2 ^V , 6 ^C , 9 ^C , 11 ^V , 12 ^V , 18 ^C , 19 ^C , 20 ^C , 21 ^C , 22 ^V , 23 ^V , 27 ^C , 28 ^C , 31 ^V	2	1	3	8	14	
Gran total		—	6	4	8	13	31	

la región y esta especie están bajo un severo disturbio crónico (Martorell y Peters, 2005). En todas las poblaciones de *M. pectinifera* de esta investigación hay perturbaciones constantes del hábitat, entre las que figuran: a) presencia de ganado, principalmente el caprino. Sin embargo, aún no tenemos evidencias claras de cómo contribuye a la dinámica poblacional del cacto; b) reducción de la densidad poblacional por basureros municipales en 2 localidades; c) alta vulnerabilidad de poblaciones por transformación del hábitat, debido a actividades extractivas de cantera, reforestaciones con especies exóticas, desarrollo de magueyeras y por fuegos inducidos.

En un estudio realizado por Valverde et al. (2009), aplicaron el método de evaluación del riesgo de extinción de las especies silvestres en México (MER) a *M. pectinifera*, concluye que esta especie se encuentra en un estado crítico de conservación, proponiendo incluso su cambio de estatus, pasando de amenazada a especie en peligro de extinción.

Es importante difundir el conocimiento sobre la biología, geografía y conservación de *M. pectinifera* entre la sociedad, sobre todo, entre los propietarios de los terrenos donde crece, ya que muchos no conocen la planta, lo que coadyuvaría a fortalecer las medidas de preservación en su área de distribución natural. Lo anterior tendría que estar aunado a programas permanentes de monitoreo y de conservación *in situ* a nivel comunal, privado o ejidal, según la tenencia del suelo en cuestión, e idealmente asociado con algún estímulo económico dirigido a los dueños de las tierras para impulsar su cuidado y conservación. Además, habría que reforzarlo con esfuerzos de conservación *ex situ*, pero teniendo el cuidado de que esta responsabilidad recaiga en alguna institución nacional de reconocimiento científico.

Agradecimientos

Hacemos patente nuestro reconocimiento al Biól. Carlos Pizaña, Director de la Reserva de la Biosfera Tehuacán-Cuicatlán, así como a las autoridades locales y a numerosos comuneros y campesinos del valle de Tehuacán que contribuyeron al desarrollo de este trabajo. A todos aquellos estudiantes de la carrera de Geografía de la Universidad Nacional Autónoma de México, quienes colaboraron de manera muy entusiasta en la búsqueda de nuevas localidades. A los Drs. Salvador Arias y Alejandro Zavala, así como al M. en C. Ignacio Torres por compartir información sobre la distribución y datos históricos de la especie en estudio.

Literatura citada

- Anderson, E. F. 1990. Succulent plant conservation studies and training in Mexico: Stage 1, Part 2 and Stage 2. World Wildlife Found-USA. Reporte interno. Washington, D. C.
- Anderson, E. F., S. Arias y N. P. Taylor. 1994. Threatened cacti of Mexico. Succulent plant research. Vol. II. Royal Botanical Gardens, Kew. 135 p.
- Anderson, R. P., D. Lew y T. Peterson. 2003. Evaluating predictive models of species' distributions: criteria for selecting optimal models. *Ecological Modelling* 162:211-232.
- Anónimo. 2012. Acuerdo por el que se da a conocer el Resumen del Programa de Manejo del Área Natural Protegida con el carácter de Reserva de la Biosfera Tehuacán-Cuicatlán, ubicada en los estados de Oaxaca y Puebla. Diario Oficial de la Federación. Segunda Sección. México. 222 p.
- Arias, S. 1993. Cactáceas: conservación y diversidad en México. *Revista de la Sociedad Mexicana de Historia Natural. Volumen especial XLIV*:109-115.
- Arias, S., S. Gama y L. U. Guzmán-Cruz. 1997. Flora del valle de Tehuacán-Cuicatlán. Fascículo 14: Cactaceae A. L. Juss. Instituto de Biología, Universidad Nacional Autónoma de México. México, D. F. 146 p.
- Benito-De Pando, B. y J. Peñas-De Giles. 2007. Aplicación de modelos de distribución de especies a la conservación de la biodiversidad en el sureste de la península Ibérica. *GeoFocus* 7:100-119.
- Boke, N. H. 1960. Anatomy and development in *Solisia*. *American Journal of Botany* 47:59-65.
- Bravo-Hollis, H. 1978. Las cactáceas de México. Vol. I. Universidad Nacional Autónoma de México. México, D. F. 743 p.
- Bravo-Hollis, H. y H. Sánchez-Mejorada. 1991. Las cactáceas de México. Vols. II y III. Universidad Nacional Autónoma de México. México, D. F. 404 p.
- CITES. 2013. Convención sobre el Comercio Internacional de Especies Amenazadas de Fauna y Flora Silvestres. Apéndice I, II y III. <http://www.cites.org/eng/app/appendices.php>; última consulta: 2.IV.2014.
- Cornejo-Romero, A., J. Medina-Sánchez, T. Hernández-Hernández, B. Rendón-Aguilar, P. L. Valverde, A. Zavala-Hurtado, S. P. Rivas-Arancibia, M. A. Pérez-Hernández, G. López-Ortega, C. Jiménez-Sierra y C. F. Vargas-Mendoza. 2104. Quaternary origin and genetic divergence of the endemic cactus *Mammillaria pectinifera* in a changing landscape in the Tehuacán Valley, Mexico. *Genetics and Molecular Research* 13:73-88.
- Dávila, P., M. C. Arizmendi, A. Valiente-Banuet, J. L. Villaseñor, A. Casas y R. Lira. 2002. Biological diversity in the Tehuacán-Cuicatlán Valley, Mexico. *Biodiversity and Conservation* 11:421-442.
- Flores-Mata, G., J. Jiménez-López, X. Madrigal-Sánchez, F. Moncayo-Ruiz y F. Takaki. 1971. Mapa y descripción de tipos de vegetación de la República Mexicana. Dirección de Agrología, Secretaría de Recursos Hidráulicos. México, D. F. 59 p.
- Godínez-Álvarez, H., T. Valverde y P. Ortega-Baes. 2003. Demographic trends in the Cactaceae. *Botanical Review* 69:173-203.
- Gorelick, R. 2009. Evolution of cacti is largely driven by genetic drift, not selection. *Bradleya* 27:37-48.
- Greig-Smith, P. 1983. Quantitative plant ecology. 3rd ed. Blackwell Scientific Publications. London. 198 p.
- Guzmán-Cruz, L. U., S. Arias y P. Dávila. 2003. Catálogo de cactáceas mexicanas. Conabio-Universidad Nacional Autónoma de México, México, D. F. 315 p.
- Hernández, H. M. y H. Godínez. 1994. Contribución al conocimiento de las cactáceas mexicanas amenazadas. *Acta Botánica Mexicana* 26:33-52.
- Hunt, D., N. Taylor y G. Charles. 2006. The new cactus Lexicon. Vols. I and II: Descriptions and illustrations of the cactus family. DH Books, Sherborne. 373 p.
- Inegi (Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática). 1985-2000. Conjunto de datos edafológicos vectoriales escala 1:250 000 Serie I, Continuo Nacional., Aguascalientes, México.
- Inegi (Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática). 1995-1997. Conjunto de datos vectoriales de la serie topográfica escala 1:250 000. Serie II. Aguascalientes, México.
- Inegi (Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática). 2005. Conjunto de datos vectoriales de uso de suelo y vegetación, Serie 3 (continuo nacional), escala 1:250 000. Aguascalientes, México.
- Inegi Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática). 1980-2000. Conjunto de datos geológicos vectoriales escala 1:250 000, Serie I, Continuo Nacional. Aguascalientes, México.
- Loaiza, S. R. y J. M. Salazar. 2008. Guía de campo con especies de la familia Cactaceae presentes en la Reserva de la Biosfera Tehuacán-Cuicatlán. Disco compacto editado por Reserva de la Biosfera Tehuacán-Cuicatlán. Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas e Instituto Tecnológico Superior de Zacapoaxtla. Puebla, México.
- Luna-Vega, I., O. Alcántara-Ayala, R. Contreras-Medina y C. A. Ríos-Muñoz. 2012. Ecological niche modeling on the effect of climatic change and conservation of *Ternstroemia lineata* DC. (Ternstroemiaceae) in Mesoamerica. *Botany* 90:637-650.
- Mandujano, M. C., I. Carrillo-Ángeles, C. Martínez-Peralta y J. Golubov. 2010. Reproductive biology of Cactaceae. In *Desert plant-biology and biotechnology*, K. G. Ramawat (ed.). Springer, Berlin, Heidelberg, Germany. p. 197-230.
- Martorell, C. y E. M. Peters. 2005. The measurement of chronic disturbance and its effects on the threatened cactus *Mammillaria pectinifera*. *Biological Conservation* 124:119-207.
- Martorell, C. y E. M. Peters. 2009. Disturbance response analysis: a method for rapid assessment of the threat to species in disturbed areas. *Conservation Biology* 23:377-387.
- Meyrán, G. J. 1980. Guía botánica de cactáceas y otras suculentas del valle de Tehuacán. Sociedad Mexicana de Cactología.

- México, D. F. 50 p.
- Moraes, E. M., A. G. Abreu, S. C. S. Andrade, F. M. Sene y V. N. Solferini. 2005. Population genetic structure of two columnar cacti with a patchy distribution in eastern Brazil. *Genetica* 125:311-323.
- Peters, E. M., C. Martorell y E. Ezcurra. 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.
- Peters, E. M., C. Martorell y E. Ezcurra. 2009. The adaptive value of cued seed dispersal in desert plants: seed retention and release in *Mammillaria pectinifera* (Cactaceae), a small globose cactus. *American Journal of Botany* 96:537-541.
- Peters, E. M., C. Martorell y E. Ezcurra. 2011. The effects of serotiny and rainfall-cued dispersal on fitness: bet-hedging in the threatened cactus *Mammillaria pectinifera*. *Population Ecology* 53:383-392.
- Peterson, A. T. 2001. Predicting species geographic distributions based on ecological niche modeling. *Condor* 103:599-605.
- Peterson, A. T. y D. A. Kluza. 2005. Ecological niche modeling as a new paradigm for large-scale investigations of diversity and distribution of birds. USDA Forest Service General Technical Report. PSW-GTR- 191:1201-1204.
- Rabinowitz, D., S. Cairns y T. Dillon. 1986. Seven forms of rarity and their frequency in the flora of the British Isles. *In* Conservation biology: the science of scarcity and diversity, M. E. Soulé (ed.). Sinauer Associates, Sunderland, London. p. 182-204.
- Rodríguez-Ortega, C. E. y E. Ezcurra. 2001. Distribución espacial en el hábitat de *Mammillaria pectinifera* y *M. carnea* en el valle de Zapotitlán Salinas, Puebla, México. *Cactáceas y Suculentas Mexicanas* 46:63-67.
- Rodríguez-Ortega, C. E., M. Franco y M. C. Mandujano. 2006. Serotiny and seed germination in three threatened species of *Mammillaria* (Cactaceae). *Basic and Applied Ecology* 7:533-544.
- Rzedowski, J. 1978. Vegetación de México. Limusa. México, D. F. 432 p.
- Rzedowski, J. 1991. Diversidad y orígenes de la flora fanerógama de México. *Acta Botanica Mexicana* 14:3-21.
- Semarnat (Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales). 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, Segunda Sección. México.
- Smith, E. C. 1965. Flora. Tehuacán Valley. *Fieldiana Botany* 31:107-143.
- Sokal, R. R. y F. J. Rohlf. 1995. Biometry: the principles and practice of statistics in biological research. W. H. Freeman and Co, New York. 887 p.
- Tapia-Salcido, H. J. 2011. Análisis de la diversidad y estructura genética poblacional de dos especies del género *Mammillaria*, endémicas del valle de Tehuacán-Cuicatlán. Tesis, Facultad de Estudios Superiores Iztacala, Universidad Nacional Autónoma de México. México, D. F. 43 p.
- UICN (Unión Internacional para la Conservación de la Naturaleza). 2013. IUCN Red List of Threatened Species. Version 2013.2. www.iucnredlist.org; última consulta: 2.IV.2014.
- Valverde, P. L. y J. A. Zavala-Hurtado. 2006. Assessing the ecological status of *Mammillaria pectinifera* Weber (Cactaceae), a rare and threatened species endemic of the Tehuacán-Cuicatlán Region in Central Mexico. *Journal of Arid Environments* 64:193-208.
- Valverde, P. L., J. A. Zavala-Hurtado, C. Jiménez-Sierra, B. Rendón-Aguilar, A. Cornejo-Romero, S. Rivas-Arancibia, G. López-Ortega y M. A. Pérez-Hernández. 2009. Evaluación del riesgo de extinción de *Mammillaria pectinifera*, cactácea endémica de la región de Tehuacán-Cuicatlán. *Revista Mexicana de Biodiversidad* 80:219-230.
- Villaseñor, J. L., P. Dávila y F. Chiang. 1990. Fitogeografía del valle de Tehuacán-Cuicatlán. *Boletín de la Sociedad Botánica Mexicana* 50:135-149.
- Zavala-Hurtado, J. A. y P. L. Valverde. 2003. Habitat restriction in *Mammillaria pectinifera*, a threatened endemic Mexican cactus. *Journal of Vegetation Science* 14:891-898.
- Zeiler, M. 1999. Modeling our world: the ESRI guide to geodatabase design. Environmental Systems Research Institute Press. Redlands, California. 199 p.