



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA CHAPINGO

DEPARTAMENTO DE FITOTECNIA

INSTITUTO DE HORTICULTURA

**ECOGEOGRAFÍA Y DIVERSIDAD MORFOLÓGICA DEL
GÉNERO *Crataegus* L. EN MÉXICO, CON BASE EN
CARACTERÍSTICAS DE SEMILLAS Y ENDOCARPIOS**

TESIS

Que como requisito parcial para obtener el grado de

MAESTRA EN CIENCIAS EN HORTICULTURA

Presenta

KARINA SANDIBEL VERA SÁNCHEZ



Bajo la supervisión del

Dr. Raúl Nieto Ángel

Chapingo, Estado de México. Mayo de 2018.

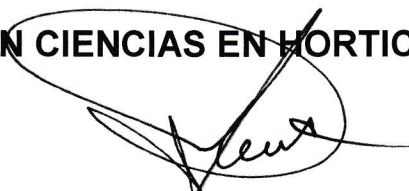


ECOGEOGRAFÍA Y DIVERSIDAD MORFOLÓGICA DEL GÉNERO *Crataegus*
L. EN MÉXICO, CON BASE EN CARACTERÍSTICAS DE SEMILLAS Y
ENDOCARPIOS

Tesis realizada por **KARINA SANDIBEL VERA SÁNCHEZ** bajo la supervisión
del Comité Asesor indicado a continuación, aprobada por el mismo y aceptada
como requisito parcial para obtener el grado de:

MAESTRA EN CIENCIAS EN HORTICULTURA

DIRECTOR:



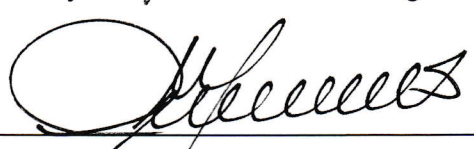
Dr. Raúl Nieto Ángel

ASESOR:



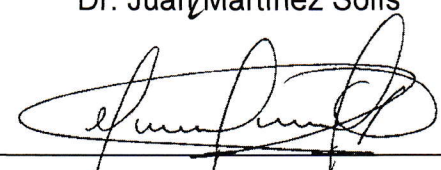
Dr. Alejandro F. Barrientos Priego

ASESOR:



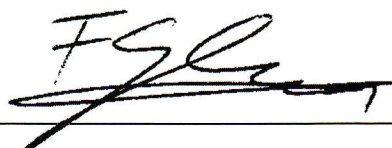
Dr. Juan Martínez Solís

ASESOR:



Dr. Héctor Mauricio Parra Quijano

ASESOR:



Dr. Fernando González Andrés

CONTENIDO

LISTA DE CUADROS	v
LISTA DE FIGURAS.....	vi
DEDICATORIA	viii
AGRADECIMIENTOS	ix
DATOS BIOGRÁFICOS.....	xi
RESUMEN GENERAL	xii
GENERAL SUMMARY	xiii

CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN GENERAL	1
LITERATURA CITADA	7

CAPÍTULO II

MAPEO DE LA DIVERSIDAD MORFOLÓGICA Y ECOGEOGRÁFICA DEL GÉNERO <i>CRATAEGUS</i> L. EN MÉXICO, CON BASE EN CARACTERÍSTICAS DE SEMILLAS Y ENDOCARPIOS	12
RESUMEN	12
ABSTRACT	13
INTRODUCCIÓN	14
MATERIALES Y MÉTODOS	17
Caracterización fenotípica y ecogeográfica	17
Mapeo de la diversidad morfológica y ecogeográfica	18
RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	20
Variabilidad fenotípica y ecogeográfica.....	20
Mapeo de la diversidad fenotípica y ecogeográfica	28
CONCLUSIONES	34
LITERATURA CITADA	36

CAPÍTULO III

PRIORIZACIÓN DE ÁREAS PARA LA CONSERVACIÓN <i>IN SITU</i> DE LA DIVERSIDAD DE TEJOCOTE (<i>CRATAEGUS</i> <i>SPP.</i>) EN MÉXICO.....	43
RESUMEN	43
ABSTRACT	44
INTRODUCCIÓN	45

MATERIALES Y MÉTODOS.....	49
Área de estudio	49
Recopilación y mapeo de criterios.....	50
Selección de criterios y reclasificación de escalas	50
Cálculo de pesos y conjuntos de criterios de alta importancia	52
Suma de criterios y mapas de áreas prioritarias	52
Identificación de áreas prioritarias y recomendaciones	53
RESULTADOS Y DISCUSIÓN	54
Criterios importantes para la conservación <i>in situ</i> de tejocote	55
Criterios de alta importancia para la conservación <i>in situ</i> de tejocote.....	58
Mapas de identificación de áreas prioritarias para la conservación <i>in situ</i> de tejocote..	60
Recomendaciones para tomadores de decisiones	67
CONCLUSIONES	68
LITERATURA CITADA	69

LISTA DE CUADROS

Cuadro 1.1. Variables morfológicas evaluadas en semillas y endocarpios de 57 genotipos de tejocote (<i>Crataegus</i> spp.).....	20
Cuadro 1.2. Valores y vectores-características en cuatro componentes principales de 60 características morfológicas en semillas y endocarpios de 57 genotipos de tejocote (<i>Crataegus</i> spp.).....	22
Cuadro 1.3. Principales características en semillas y endocarpios de tejocote (<i>Crataegus</i> spp.) extraídas del PCA para cada grupo delimitados en el análisis de agrupamientos.....	24
Cuadro 1.4. Variables ecogeográficas y unidades de medida a partir de las cuales se realizó la caracterización ecogeográfica del género <i>Crataegus</i> L.	26
Cuadro 1.5. Promedio de variables para cada grupo formado por el análisis de agrupamiento de 56 genotipos de tejocote (<i>Crataegus</i> spp.).	27
Cuadro 1.6. Número de especies y registros por especie obtenidos de la integración de 1,093 registros de presencia del género <i>Crataegus</i> L.	28
Cuadro 2.1. Estado favorable, valores finales y peso de los criterios importantes para la identificación de áreas prioritarias para la conservación <i>in situ</i> de especies de tejocotes silvestres (<i>Crataegus</i> spp.), obtenidos por expertos (EXP) y por proceso analítico jerárquico (AHP).....	56
Cuadro 2.2. Estado favorable, valores finales y peso de los criterios importantes para la identificación de áreas prioritarias para la conservación <i>in situ</i> de tejocote cultivado (<i>C. mexicana</i>) obtenidos por expertos (EXP) y por proceso analítico jerárquico (AHP).	57
Cuadro 2.3. Ubicación y superficie de las áreas prioritarias para la conservación <i>in situ</i> de tejocote silvestre (<i>Crataegus</i> spp.) y cultivado (<i>C. mexicana</i>) con base en siete sumatorias de criterios (escenarios).....	67
Cuadro suplementario 1.1. Clasificación taxonómica y estado de origen de los 57 genotipos de tejocote (<i>Crataegus</i> spp.) utilizados para la caracterización de semillas y endocarpios.	40
Cuadro suplementario 1.2. Variables ecogeográficas utilizadas en la caracterización ecogeográfica de tejocote (<i>Crataegus</i> spp.). Los tres grupos de variables se encuentran dentro de la herramienta SelecVar de CAPFITOGEN 2.0 (Parra-Quijano <i>et al.</i> , 2015).	40
Cuadro suplementario 2.1. Descripción y método de rasterización de los criterios que fueron sometidos al proceso de selección y priorización, para la identificación de áreas prioritarias para la conservación de <i>Crataegus</i> spp.	76

LISTA DE FIGURAS

- Figura 1.1.** Ilustración de 10 variables utilizadas para la caracterización morfológica de 57 genotipos de semillas y endocarpios de tejocote (*Crataegus* spp.). Estas características representan la base para el cálculo del resto de las variables.....18
- Figura 1.2.** Agrupamiento de 57 genotipos de tejocote (*Crataegus* L.) por el método jerárquico de Ward basado en 60 características fenotípicas de semillas y endocarpios.24
- Figura 1.3.** Importancia de las variables 1) Bioclimáticas, 2) Edáficas y 3) Geofísicas resultante de la Clasificación “Random Forest” para tejocote (*Crataegus* L.).25
- Figura 1.4.** Agrupamiento de los genotipos por método Jerárquico de Ward basado en nueve características ecogeográficas de los sitios de recolección de 56 genotipos de tejocote (*Crataegus* L.).27
- Figura 1.5.** Distribución de 814 registros de *Crataegus* spp. con un valor de calidad mayor que 60.29
- Figura 1.6.** Tres puntos calientes de diversidad ecogeográfica (zonas de concentración de mayores valores promedio de distancias ecogeográficas) de *Crataegus* spp. en México, sobre 814 sitios de recolección o presencia con alta calidad de georreferenciación.31
- Figura 1.7.** Diversidad fenotípica (semillas y endocarpios) de 57 genotipos de tejocote (*Crataegus* spp.) en 1) zona centro [Estado de México, Ciudad de México (CDMX), Puebla, Tlaxcala y Morelos], 2) zona occidente (Michoacán), 3) zona suroeste (Oaxaca) y 4) zona sur (Chiapas). Las celdas delimitadas por el corte del decil 9 (D9) son las que se consideran con la diversidad más alta.32
- Figura 1.8.** Diversidad ecogeográfica (adaptativa abiótica) de 57 genotipos de tejocote (*Crataegus* spp.) en 1) zona centro [Estado de México, Ciudad de México (CDMX), Puebla, Tlaxcala y Morelos], 2) zona occidente (Michoacán), 3) zona suroeste (Oaxaca) y 4) zona sur (Chiapas). Las celdas delimitadas por el corte del decil 9 (D9) son las que se consideran con la diversidad más alta.33
- Figura 1.9.** Coincidencia de alta diversidad fenotípica (semillas y endocarpios) y ecogeográfica (adaptativa abiótica) de 56 genotipos de *Crataegus* spp. en la zona centro y sur de México. Las celdas de mayor diversidad se ubicaron en el corte del decil 9.34
- Figura 2.1. A.** Área de estudio, distribución geográfica y sitios donde se aplicó la encuesta a productores de tejocote cultivado (*C. mexicana*). **B.** Área de

estudio, distribución geográfica y sitios donde se aplicó la encuesta a recolectores de tejocote silvestre (*Crataegus* spp.).49

Figura 2.2. Proceso general para la identificación de áreas prioritarias para la conservación *in situ* de tejocote silvestre (*Crataegus* spp.) y cultivado (*C. mexicana*) en México. Los recuadros verde y rojo indican el número de criterios considerados en cada etapa tanto para silvestres y para cultivados en cada etapa del proceso, respectivamente. E₁, E₂, E₃, E₄, E₅, E₆ y E₇ representan diferentes sumatorias de mapas y escenarios de comparación.54

Figura 2.3. Escenarios de áreas prioritarias para la conservación *in situ* de tejocote silvestre (*Crataegus* spp.), con base en siete diferentes combinaciones criterios-mapa. **E₁.** Todos los criterios con el mismo peso. **E₂.** Todos los criterios con los pesos asignados por expertos. **F₃.** Todos los criterios con los pesos asignados por AHP. **E₄.** CAI-EXP con el mismo peso **E₅.** CAI-EXP con los pesos asignados por expertos. **E₆.** CAI-AHP con el mismo peso. **E₇.** CAI-AHP con los pesos asignados por AHP.63

Figura 2.4. Escenarios de áreas prioritarias para la conservación *in situ* de tejocote cultivado (*C. mexicana*), con base en siete diferentes combinaciones criterios-mapa. **E₁.** Todos los criterios con el mismo peso. **E₂.** Todos los criterios con los pesos asignados por expertos. **F₃.** Todos los criterios con los pesos asignados por AHP. **E₄.** CAI-EXP con el mismo peso **F₅.** CAI-EXP con los pesos asignados por expertos. **E₆.** CAI-AHP con el mismo peso. **E₇.** CAI-AHP con los pesos asignados por AHP.65

DEDICATORIA

Para Castula y Porfirio

*Mis Padres, por darme la dicha de estar a su lado, guiarme, amarme
y consentirme.*

Para María del Carmen, Anahí, Guadalupe Itzel y Porfirio Enrique

Los hermanos que me impulsan a creer, soñar y volar.

Para Moisés

Por tu amor, tu motivación y por creer siempre en mí.

Para mis Amigos

*Por el privilegio de conocerles y compartir cada detalle de mi vida
con Ustedes.*

Para la vida, la familia, la amistad y el amor...

Con cariño....

Sandibel

AGRADECIMIENTOS

Al **Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología**, por la beca otorgada bajo el Convenio número 622936.

A la **Universidad Autónoma Chapingo**, por abrir sus puertas para realizar mis estudios de Posgrado y hacerme parte de su honorable matrícula.

A la **Universidad Nacional de Colombia** y la **University of Birmingham** por mostrarme nuevos horizontes profesionales.

Al **Dr. Raúl Nieto Ángel** por la dirección y asesoría de este trabajo. Especial agradecimiento por su incondicional apoyo, motivación, confianza y compañía en este recorrido.

Al **Dr. Alejandro F. Barrientos Pliego**, por su valiosa asesoría, revisión y contribución en el desarrollo y mejora de este trabajo. Por representar un ejemplo a seguir e inspirar siempre ganas de seguir aprendiendo.

Al **Dr. Juan Martínez Solís**, por su determinante apoyo en la ejecución de las actividades que contribuyeron en la realización y mejora de este trabajo. Por las oportunidades y facilidades brindadas, por su confianza y motivación.

Especial agradecimiento al **Dr. Héctor Mauricio Parra Quijano**, por su constante asesoría, colaboración, revisión y contribución en la mejora de este trabajo. Por compartir conmigo nuevos conocimientos y herramientas. Por su confianza, motivación y por transmitirme esa increíble pasión por continuar explorando el mundo del saber y conocer.

Al **Dr. Fernando González Andrés** por su revisión y aportaciones al presente trabajo.

A los jóvenes investigadores **Elena Lera** y **A. Levi Cadenas** por su valioso apoyo en la edición de imágenes.

A **G. Itzel Vera**, **Anahí Vera**, **Moisés Matías**, **Betsabé Diego** e **Ilse M. Mancilla** por su invaluable apoyo en la extracción, limpieza y realización de cortes de endocarpios.

A todos los **expertos** en la conservación y aprovechamiento sostenible de los recursos fitogenéticos de México que compartieron su punto de vista en el proceso de priorización de criterios.

A la **Familia Vera-Sánchez** por la cofinanciación de las diferentes actividades que permitieron la ejecución y mejora de este trabajo.

Sinceros agradecimientos a la **Familia Parra-Paredes-Quijano, Aremi Contreras, Lourdes Mateos, Ilse M. Mancilla, Betsabé Diego, Tabita Q. Pérez, María Almeyda y Nigel Maxted** por las experiencias y conocimientos de la vida que compartieron conmigo.

A todas las personas que han contribuido en la inspiración y la ejecución de este trabajo, que han hecho más fácil el camino para llegar hasta aquí.

DATOS BIOGRÁFICOS

Karina Sandibel Vera Sánchez nació en Agosto de 1988 en Villa de Allende, Estado de México, donde realizó sus estudios básicos y de nivel medio superior. Es Bióloga por la Universidad Autónoma Metropolitana en la Ciudad de México, grado obtenido en el año 2010. Realizó estancias académicas en la Universidad Autónoma de Baja California, México (2010), University of Birmingham, Reino Unido (2017) y Universidad Nacional de Colombia sede Bogotá, Colombia (2018).

Su trayectoria profesional la desempeñó en el Servicio Nacional de Inspección y Certificación de Semillas (SAGARPA-SNICS) de 2011 a 2016 en la coordinación de acciones en conservación y utilización sostenible de los recursos fitogenéticos para la alimentación y la agricultura.

En colaboración con otros autores ha publicado un libro¹, un capítulo de libro² y contribuciones en artículos científicos. Se ha capacitado constantemente en materia de recursos fitogenéticos y sistemas de información geográfica.

¹ Vera-Sánchez, K. S., Cadena-Iñiguez, J., Latournerie-Moreno, L., Santiaguillo- Hernández, J. F., Rodríguez-Contreras, A., Basurto-Pena, F.A., Castro-Lara, D., Rodríguez-Guzmán, E., López-López, P., Ríos-Santos, E. (2016). *Conservación y utilización sostenible de las Hortalizas Nativas de México*. Servicio Nacional de Inspección y Certificación de Semillas, México. 132p

² Vera-Sánchez, K. S., Santos, R. G., & Aragón-Cuevas, F. (2015). 42 Community seed banks in Mexico. In: Vernooy, R., Shrestha, P., & Sthapit, B. (Eds.). (2015). *Community seed banks: Origins, evolution and prospects*. Routledge.

RESUMEN GENERAL

Ecogeografía y diversidad morfológica del género *Crataegus* L. en México, con base en características de semillas y endocarpios³

La diversidad de las plantas es la base de la seguridad alimentaria, contribuye a la productividad sostenibilidad y estabilidad de los sistemas agrícolas. La preocupación por su acelerada pérdida debido a las condiciones generadas por el cambio climático y uso de suelo, ha potenciado el diseño de metodologías para promover su conservación. Como herramientas para orientar y optimizar estrategias de manejo y conservación de los recursos genéticos de tejocote (*Crataegus* spp.), en esta investigación se realizó el mapeo de la diversidad morfológica de semillas y endocarpios y de la diversidad ecogeográfica de los sitios de recolección de 57 genotipos tejocote. También se identificaron áreas prioritarias para la conservación *in situ* de su diversidad a través de un Análisis Espacial Multi-Criterio. Toda vez que el tejocote representa un alto valor económico y cultural para los mexicanos, así como un potencial para uso industrial y para consumo en fresco. Aunque es considerado todavía un frutal de recolección, la superficie con nuevas plantaciones y su actividad comercial están incrementando, por lo que su diversidad se encuentra en riesgo de reducción. Como resultados, la diversidad ecogeográfica y fenotípica presentan una asociación que puede ser útil en la planeación de estrategias de conservación y en la identificación de germoplasma con características adaptativas sobresalientes, sin antes realizar evaluaciones morfológicas o agronómicas. Las áreas prioritarias para la conservación *in situ* de tejocote silvestre se ubicaron en Chiapas, Estado de México y Morelos, éstas están dadas por la riqueza de especies, diversidad fenotípica y ecogeográfica. Mientras que para tejocote cultivado fueron dadas por el número de variedades cultivadas, número de usos, áreas con agricultura temporal y diversidad fenotípica y ecogeográfica. Estas áreas se situaron en Puebla y en menor proporción en Veracruz y Chiapas.

Palabras clave: diversidad fenotípica, conservación, tejocote, análisis multicriterio, áreas prioritarias.

³ Tesis de Maestría en Ciencias en Horticultura, Universidad Autónoma Chapingo.
Autor: Karina Sandibel Vera Sánchez.
Director de Tesis: Raúl Nieto Ángel.

GENERAL SUMMARY

Ecogeography and morphological diversity of the genus *Crataegus* L. in Mexico, based on seed and endocarp characteristics⁴

The diversity of plants is the basis of food security, as it contributes to sustainable productivity and the stability of agricultural systems. The concern for its accelerated loss due to the conditions generated by climate and land-use change has led to an increase in the design of methodologies to enhance its conservation. As tools to guide and optimize strategies for the management and conservation of the genetic resources of hawthorn (*Crataegus* spp.), we mapped the morphological diversity of seeds and endocarps and the ecogeographic diversity of the collection sites of 57 genotypes of hawthorn. Priority areas for *in situ* conservation of its diversity were also identified through a Multi-Criteria Spatial Analysis, since the hawthorn represents a high economic and cultural value for Mexicans, as well as having potential for industrial use and fresh consumption. Although it is still considered a harvest fruit, the area with new plantations and its commercial activity are increasing, so its diversity is at risk of reduction. As results, the ecogeographic and phenotypic diversity present an association that can be useful in the planning of conservation strategies and in the identification of germplasm with elite adaptive characteristics, without first performing morphological or agronomic evaluations. The priority areas for the *in situ* conservation of wild hawthorn were located in Chiapas, State of Mexico and Morelos because of the richness of species and phenotypic and ecogeographic diversity. On the other hand, the priority areas for the *in situ* conservation of cultivated hawthorn were given by the number of cultivated varieties, number of uses, areas with rainfed agriculture and phenotypic and ecogeographic diversity. These areas were located in Puebla and to a lesser extent in Veracruz and Chiapas.

Keywords: phenotypic diversity, conservation, hawthorn, Multi-criteria Analysis, priority areas.

⁴ Thesis of Horticultural Sciences MSc program, Universidad Autonoma Chapingo.
Author: Karina Sandibel Vera Sánchez.
Advisor: Raúl Nieto Ángel.

CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN GENERAL

La agrobiodiversidad es un término que se refiere a la diversidad biológica que ha sido modificada o manipulada por el hombre con objetivos agrícolas (Long *et al.*, 2003). Es considerada como un subgrupo de la biodiversidad que incluye la diversidad y variabilidad de plantas, animales, microorganismos y la conservación *in situ* y *ex situ* de los recursos genéticos para la agricultura (Partap & Sthapit, 1998). Es esencial para satisfacer las necesidades humanas, es la base para la producción y la seguridad alimentaria (Long *et al.*, 2003; Ajlouni, El-Oqlah, Al-Ghzawi, Al-Tawaha & Amri, 2010; De la Rosa & Fajardo, 2016; CBD, 2017).

Esta diversidad agrícola existe a nivel de ecosistemas, especies y genes y es el resultado de la interacción del ambiente, los recursos genéticos y los sistemas y prácticas de manejo aplicados por las personas, a lo largo de miles de años (FAO, 2009). Los recursos de origen vegetal con valor real o potencial para la alimentación y la agricultura son denominados recursos fitogenéticos para la alimentación y la agricultura (FAO, 2010), se agrupan en variedades de especies cultivadas, tanto tradicionales (también denominadas locales, autóctonas o criollas) como mejoradas y materiales obtenidos en trabajos de mejora genética; especies silvestres emparentadas con las cultivadas que pueden contribuir al acervo genético de sus parientes cultivados, y estados intermedios de domesticación (Esquinas-Alcázar, 1993).

Los principales usuarios de la agrobiodiversidad son los fitomejoradores quienes buscan fuentes de genes de interés para transferirse a variedades modernas. Sin embargo, para poder usar esa diversidad es necesario tener conocimiento sobre ella y ese conocimiento sólo se obtiene llevando a cabo la caracterización y evaluación. Estos procesos demandan gran infraestructura humana y económica, ante esta situación, la necesidad de innovar ha llevado a generar herramientas y metodologías de menor costo y complejidad (Parra-Quijano, Torres, Iriando,

López & Molina, 2015). Una alternativa es la caracterización ecogeográfica, que ofrece información ambiental del sitio donde crece un individuo o una población vegetal, directamente relacionada con el proceso de adaptación al entorno biótico o abiótico, como una medida indirecta de la diversidad genética funcional representa una alternativa, teniendo en cuenta la relación entre fenotipo, genotipo y ambiente (Parra-Quijano, Iriondo, De la Cruz & Torres, 2011). Los datos ecogeográficos pueden definirse como la combinación de datos climáticos, ecológicos y geográficos, su uso se ha incrementado desde 1990 (Peeters, Wilkes & Galwey, 1990; Parra-Quijano *et al.*, 2011; Parra-Quijano, Iriondo & Torres, 2012).

Sin embargo, desde el siglo pasado diversos factores han erosionado la agrobiodiversidad, actualmente se afirma que sólo 30 cultivos proporcionan el 95 % de la energía total que se obtiene de los alimentos, y cuatro de ellos (arroz, maíz, trigo y patata) suministran más del 60 % de las calorías (De la Rosa, L. & Fajardo, 2016). Otros factores como el incremento y cambios en los patrones de población, industrialización y crecimiento urbano, expansión de la agricultura, introducción de nuevas variantes biológicas, cambio climático, así como degradación, fragmentación y simplificación de hábitats, han contribuido con su pérdida (Lobo & Medina 2009; Mercer & Perales, 2010).

Por lo anterior, surge la necesidad de implementar acciones no sólo para incrementar la producción de alimentos a través de variedades con características que se adapten a las nuevas condiciones ocasionadas por el cambio climático, con altos rendimientos, o produciendo de manera amigable con el ambiente; sino también en el desarrollo de estrategias para la conservación de la agrobiodiversidad que constituye la materia prima y la fuente de genes, ya que el cambio climático tendrá impactos directamente en la agricultura, modificando el crecimiento ambiental y geográfico, y la prevalencia de pestes y enfermedades dando como resultado la reducción de la productividad agrícola (Wheeler & von Braun, 2013; Rosenzweig *et al.*, 2014). Es por ello que las acciones de conservación se fortalecieron ampliamente en todo el mundo desde mediados

del siglo pasado (FAO 2010). Estas acciones pueden enfocarse a la conservación *ex situ*, haciendo referencia a los bancos de germoplasma; y a la conservación *in situ* que se refiere específicamente a la conservación de las especies en su hábitat natural o con los productores en forma tradicional o convencional.

La conservación de la biodiversidad está estrechamente relacionada con otros factores como el cambio climático, el cambio de cobertura y uso del suelo y, el desarrollo sustentable. Por ello, se visualiza como un problema complejo que involucra aspectos ambientales, biológicos, socioeconómicos y operacionales (Liu, Zhang & Hong, 2011; Bottero, Comino, Duriavig, Ferretti & Pomarico, 2013). Por lo que surge la necesidad de generar metodologías que permitan planear de manera integral la conservación de la biodiversidad. Las herramientas de sistemas de información geográfica (SIG) permiten realizar análisis complejos que combinan diferentes fuentes de datos espaciales y generan mapas con información precisa (Guarino *et al.*, 2002), combinadas con Análisis Multi-Criterio (MCA) son una herramienta que ayuda en la construcción de planeación espacial de la conservación de la diversidad y que apoya en el diseño y formulación de políticas públicas (Bottero *et al.*, 2013).

México es un país con características fisiográficas y ecológicas de gran relevancia desde una perspectiva global de conservación de la diversidad biológica. La biodiversidad mexicana es reconocida en la clasificación de países megadiversos (Llorente-Bousquets & Ocegueda, 2008). Se ubica en el quinto lugar considerando únicamente las plantas vasculares ya que posee aproximadamente 25 mil especies (CONABIO, 2009). Villaseñor (2016) documenta 277 familias, 2,854 géneros, 23,314 especies and 1,414 taxones subespecíficos. Es un importante centro de domesticación y de diversidad de numerosos cultivos, algunos de gran importancia global. Esta diversidad es el resultado de eventos biológicos, así como de la interacción durante cientos de generaciones entre poblaciones humanas y estas especies. Las poblaciones humanas, a raíz de sus necesidades, intereses, prácticas y conocimientos han ido conformando y manteniendo esta diversidad (Bellon *et al.*, 2009). Las culturas

prehispánicas mesoamericanas domesticaron aproximadamente 2,000 especies vegetales con fines alimenticios, terapéuticos, textiles, y para construcción. En la actualidad miles de especies silvestres o en proceso de domesticación también suplen las necesidades de los mexicanos.

Por su parte, el género *Crataegus* L. se distribuye en diferentes regiones del mundo, se han descrito de 140 a 200 especies divididas en 40 series taxonómicas, de las cuales aproximadamente dos terceras partes se encuentran en Norteamérica y el resto en Euro-Asia (Phipps, 1997; Phipps *et al.*, 2003). En México, las especies de este género se conocen como «tejocote», término que deriva del náhuatl *texocotl* que significa «fruta dura» (Núñez-Colín *et al.*, 2008a). Aunque su clasificación taxonómica aún no es clara, se reportan alrededor de 15 especies (10 endémicas) que pertenecen a seis series taxonómicas (Eggleston, 1909; Phipps, 1997; Núñez-Colín & Hernández-Martínez, 2011). Serie Parvifoliae (Loudon) Rehder: 1) *C. uniflora* Müenchhausen. Serie Mexicanae (Loudon) Rehder: 2) *C. mexicana* De Candolle, 3) *C. stipulosa* (Humboldt, Bonpland & Kunth) Steudel, 4) *C. nelsoni* Eggleston. Serie Crus-galli (Loudon) Rehder: 5) *C. gracilior* J. B. Phipps [Sinonimia de *C. pubescens* (H. B. K.) Steud.], 6) *C. rosei* Eggleston, 6a) *C. rosei* subesp. *parryana*, 6b) *C. rosei* subesp. *rosei*, 6bi) *C. rosei* subesp. *rosei* var. *rosei*, 6bii) *C. rosei* subesp. *rosei* var. *mahindae*, 6biii) *C. rosei* subesp. *rosei* var. *amoena*. Serie Madrenses J. B. Phipps: 7) *C. tracyi* Ashe ex Eggleston, 7a) *C. tracyi* var. *coahuilensis*, 7b) *C. tracyi* var. *madrensis*, 8) *C. aurescens* J. B. Phipps. Serie Greggiana J. B. Phipps: 9) *C. greggiana* Eggleston, 9a) *C. greggiana* var. *greggiana*, 9b) *C. greggiana* var. *pepo*, 10) *C. serratissima* J. B. Phipps, 11) *C. sulfurea* J. B. Phipps, 12) *C. grandifolia* J. B. Phipps, 12a) *C. grandifolia* var. *grandifolia*, 12b) *C. grandifolia* var. *potosina*. Serie Baroussanae J. B. Phipps: 13) *C. baroussana* Eggleston, 13a) *C. baroussana* var. *baroussana*, 13b) *C. baroussana* var. *jamensis*, 14. *C. cuprina* J. B. Phipps, 15) *C. johnstonii* J. B. Phipps.

Estas especies se distribuyen principalmente de forma silvestre en las zonas montañosas de la Sierra Madre Oriental, Sierra Madre Occidental y de la Sierra

Madre del Sur, así como en el Eje Neovolcánico, la precipitación pluvial es el principal factor ambiental que define la distribución del género en México (Núñez-Colín *et al.*, 2008b).

Para los mexicanos el tejocote representa un valor económico y cultural importante en la época decembrina. Desde la época prehispánica los frutos fueron recolectados para consumo y sembrados en los huertos de los pueblos indígenas, posteriormente se cultivaron con fines comerciales (Nieto-Ángel y Borys, 1992). Es utilizado para consumo humano como fruto en fresco, en bebidas y dulces artesanales; tiene propiedades medicinales, valor nutrimental, valor ecológico, como portainjerto y en la industria alimentaria como fuente de pectinas y vitamina C (Nieto-Ángel, 2007). Es un frutal subutilizado considerado como de recolección (Nieto-Ángel, 2007) y se reportan huertas comerciales en cinco estados de la República, donde destaca Puebla con más del 95 % de la producción para el año 2015 (SIAP, 2017).

El estudio del tejocote en México se realiza desde la década de los 90s y se centra principalmente en trabajos sobre variabilidad fenotípica y genética (Nieto-Ángel, Ortiz, González-Andrés & Borys; Núñez-Colín *et al.*, 2008a; Núñez-Colín *et al.*, 2009; Nieto-Ángel, Pérez-Ortega, Núñez-Colín, Martínez-Solís & González-Andrés, 2009; Betancourt-Olvera *et al.*, 2018), búsqueda de genotipos sobresalientes (Velasco-Hernández *et al.*, 2017) fitoquímicos, calidad de pectinas y componentes volátiles (García-Mateos, Aguilar-Santelises, Soto-Hernández & Nieto-Ángel, 2013a; García-Mateos, Ibarra-Estrada & Nieto-Ángel, 2013b). En la Universidad Autónoma Chapingo se encuentra establecido el Banco de Germoplasma de Tejocote con más de 150 accesiones, como estrategia de conservación *ex situ* (Nieto-Ángel & Borys, 1992; Nieto-Ángel, 2007; Betancourt-Olvera *et al.*, 2018).

Debido a las nuevas condiciones climáticas, al crecimiento poblacional, así como a las nuevas especificaciones en la producción y atención de demandas de mercado del tejocote, es importante diseñar estrategias de conservación para proteger el acervo genético de especies silvestres afines a las cultivadas, por

este motivo, en este trabajo se plantearon dos objetivos principales 1) Realizar un análisis espacial de la variabilidad morfológica (semillas y endocarpios) y adaptativa (abiótica) de *Crataegus* spp. en México. 2) Priorizar áreas para la conservación *in situ* del género *Crataegus* L. con base en un análisis multicriterio y sistemas de información geográfica, con la finalidad de generar herramientas que apoyen en el diseño de estrategias de conservación de los recursos genéticos del tejocote (*Crataegus* spp.) en México.

Acorde con el primer objetivo, se realizó la caracterización morfológica de semillas y endocarpios, así como la caracterización ecogeográfica de los sitios de recolección de 57 genotipos de tejocotes en diferentes regiones del país. Posteriormente, se hizo uso de herramientas SIG que permitieron identificar los patrones espaciales de la diversidad fenotípica y ecogeográfica, lo cual puede apoyar en la optimización de la conservación y uso de los recursos genéticos de tejocote (*Crataegus* spp.) en México. Con los mapas de diversidad se determinó que la diversidad ecogeográfica y fenotípica de tejocote presentan una asociación que puede ser útil en la planeación de estrategias de conservación y en la identificación de germoplasma con características adaptativas sobresalientes. También se identificaron de manera sencilla y rápida tres puntos calientes de variabilidad ecogeográfica en el centro, noreste y sur del país, que se proponen como sitios prioritarios para la recolección de germoplasma para su conservación *ex situ*, porque posiblemente los genotipos que se encuentran en esos sitios serían muy valiosos en la búsqueda de tolerancia a estrés biótico y abiótico. Además, probablemente allí hay genes de interés, porque en áreas reducidas se acumulan adaptaciones diferentes. Finalmente se reconoce que la comprensión de los patrones espaciales de la diversidad, se convierte en una herramienta útil para la toma de decisiones en materia de conservación *ex situ* e *in situ* de las especies de tejocote en México.

En relación al segundo objetivo, por medio de encuestas a expertos se obtuvo que 22 criterios son importantes para la conservación de tejocote silvestre y 23 criterios para el cultivado. El cálculo de los pesos de los criterios se realizó por

un Proceso Analítico Jerárquico (AHP, por sus siglas en inglés) y por conocimientos de expertos. Los resultados arrojaron que riqueza de especies, diversidad fenotípica y ecogeográfica fueron los criterios de mayor importancia para la definición de áreas prioritarias para la conservación *in situ* de tejocote silvestre, las cuales se ubicaron particularmente en Chiapas, Estado de México y Morelos. La determinación de áreas prioritarias para la conservación *in situ* de tejocote cultivado fue dada por criterios como el número de variedades cultivadas, número de usos, diversidad fenotípica, diversidad ecogeográfica y áreas con agricultura temporal. Del presente estudio surgió como propuesta una lista de áreas prioritarias para la conservación *in situ* de tejocote, tanto cultivado como silvestre, la cantidad de dichas áreas a incluir en un futuro programa de conservación dependería de la disponibilidad de recursos económicos.

Literatura citada

- Ajlouni, M., El-Oqlah, A., Al-Ghzawi, A., Al-Tawaha, A., & Amri, A. (2010). Diversity and *in-situ* conservation of legume species in the mediterranean ecosystem. *Jordan Journal of Agricultural Sciences*, 6(2), 183-193.
- Bellon, M. R., Barrientos-Priego, A. F., Colunga-García Marín, P., Perales, H., Reyes Agüero, J. A., Rosales Serna, R., Zizumbo-Villarreal, D. (2009). Diversidad y conservación de recursos genéticos en plantas cultivadas. En CONABIO (Ed.), *Capital natural de México, vol. 2: Estado de conservación y tendencias de cambio* (pp. 355-382). México: Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad.
- Betancourt-Olvera, M., Nieto-Ángel, R., Urbano, B. and González-Andrés, F. (2018). Analysis of the biodiversity of hawthorn (*Crataegus* spp.) from the morphological, molecular, and ethnobotanical approaches, and implications for genetic resource conservation in scenery of increasing cultivation: the case of Mexico. *Genetic Resources and Crop Evolution*, 65(3), 897-916. doi: 10.1007/s10722-017-0583-4
- Bottero, M., Comino, E., Duriavig, M., Ferretti, V., and Pomarico, S. (2013). The application of a Multicriteria Spatial Decision Support System (MCSDDS) for the assessment of biodiversity conservation in the Province of Varese (Italy). *Land Use Policy*, 30(1), 730-738. doi: 10.1016/j.landusepol.2012.05.015

- CBD. (2017). Agricultural biological diversity: review of phase I of the programme of work and adoption of a multi-year work programme. COP 5 Decision V/5. Recuperado de: <https://www.cbd.int/decision/cop/default.shtml?id=7147>
- CONABIO. (2009). *Catálogo taxonómico de especies de México*. Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad. México. Recuperado de: <http://www.biodiversidad.gob.mx/pais/capitalNatMex.html>
- De la Rosa, L. y Fajardo, J. (2016). La agrobiodiversidad como elemento de la seguridad alimentaria y ambiental. *Arbor*, 192 (779), a316. doi: 10.3989/arbor.2016.779n3006
- Eggleston, W. W. (1909). The *Crataegi* of Mexico and Central America. *Bulletin of the Torrey Botanical Club*, 36, 501-514.
- Esquinas-Alcázar, J. T. (1993). La diversidad genética como material básico para el desarrollo agrícola. En Cubero, J. I. y Moreno, M. T. (coords.), *La Agricultura del Siglo XXI* (pp. 79-102). Madrid: Mundi-Prensa.
- FAO. (2010). Second report on the state of the world's plant genetic resources for food and agriculture. Food and Agriculture Organization of the United Nations. Rome. Recuperado de: <http://www.fao.org/docrep/014/i1500s/i1500s.pdf>
- FAO. (2009). Cómo alimentar al mundo en 2050. Foro de expertos de alto nivel. Roma 12-13 octubre 2009. Recuperado de: <http://www.fao.org/wsfs/forum2050/wsfs-forum/es/>
- García-Mateos, R., Aguilar-Santelises, L., Soto-Hernández, M., and Nieto-Ángel, R. (2013a). Flavonoids and antioxidant activity of flowers of Mexican *Crataegus* spp. *Natural product. research.*, 27(9), 834-836.
- García-Mateos, R., Ibarra-Estrada, E., and Nieto-Ángel, R. (2013b). Antioxidant compounds in hawthorn fruits (*Crataegus* spp.) of Mexico. *Revista Mexicana de Biodiversidad*, 84(4), 1298-1304.
- Guarino, L., Jarvis, A., Hijmans, R.J. and Maxted, N. (2002). Geographic Information Systems (GIS) and the conservation and use of plant genetic resources. In J. M. M. Engels, R. V. Ramanatha, A. H. D. Brown and M. T. Jacson (Eds.), *Managing plant genetic diversity* (pp. 387-404). Roma, Italia: International Plant Genetic Resources Institute (IPGRI). Recuperado de: http://www.diva-gis.org/docs/gis_pgr_conservation.pdf
- Liu, X., Zhang, L. and Hong, S. (2011). Global biodiversity research during 1900–2009: a bibliometric analysis. *Biodiversity and Conservation*, 20, 807–826.
- Llorente-Bousquets, J. y Ocegueda, S. (2008). Estado del conocimiento de la biota. En CONABIO, *Capital natural de México, vol. 1: Conocimiento actual*

de la biodiversidad, México (pp. 283–322). México: Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad.

- Lobo-Arias, M. y Medina, C. I. (2009). Conservación de recursos genéticos de la agrobiodiversidad como apoyo al desarrollo de sistemas de producción sostenibles. *Ciencia y Tecnología Agropecuaria*, 10(1), 33-42.
- Long, C. L., Li, H., Ouyang, Z., Yang, X., Li, Q. and Trangmar, B. (2003). Strategies for agrobiodiversity conservation and promotion: a case from Yunnan, China. *Biodiversity & Conservation*, 12(6), 1145-1156. doi: 10.1023/A:1023085922265
- Mercer, K. L. and Perales, H. R. (2010). Evolutionary response of landraces to climate change in centers of crop diversity. *Evolutionary applications*, 3(5-6), 480-493. doi: 10.1111/j.1752-4571.2010.00137.x
- Nieto-Ángel, R. (2007). Colección, conservación y caracterización del tejocote (*Crataegus* spp.). En R. Nieto-Ángel (Ed). *Frutales Nativos, un Recurso Fitogenético de México* (pp: 25-107). Estado de México, México: Universidad Autónoma Chapingo.
- Nieto-Ángel, R., y Borys, M. W. (1992). Banco de germoplasma de tejocote (*Crataegus* spp.) de la República Mexicana. Universidad Autónoma Chapingo, Chapingo (México). *Revista Chapingo*, 77, 126-130.
- Nieto-Ángel, R., Ortiz, J., González-Andrés, F. and Borys, M. W. (1997). Endocarp morphology as an aid for discriminating wild and cultivated Mexican hawthorn. *Fruits*, 52, 317-324.
- Nieto-Ángel, R., Pérez-Ortega, S. A., Núñez-Colín, C. A., Martínez-Solis, J. and González-Andrés, F. (2009). Seed and endocarp traits as markers of the biodiversity of regional sources of germplasm of tejocote (*Crataegus* spp.) from Central and Sothern México. *Scientia Horticulturae*, 14(2), 177-184. doi: 10.1016/j.scienta.2009.01.034
- Núñez-Colín, C. A. y Hernández-Martínez, M. Á. (2011). La problemática en la taxonomía de los recursos genéticos de tejocote (*Crataegus* spp.) en México. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 2(1), 141-153.
- Núñez-Colín, C. A., Nieto-Ángel, R., Barrientos-Priego, A. F., Sahagún-Castellanos, J., Segura, S. and González-Andrés, F. (2008a). Variability of three regional sources of germplasm of tejocote (*Crataegus* spp.) from central and southern Mexico. *Genetic resources and crop evolution*, 55(8), 1159-1165. doi: 10.1007/s10722-008-9316-z
- Núñez-Colín, C. A., Nieto-Ángel, R., Barrientos-Priego, A. F., Segura, S., Sahagún-Castellanos, J. y González-Andrés, F. (2008b). Distribución y caracterización eco-climática del género *Crataegus* L. (Rosaceae,

Subfam. Maloideae) en México. *Revista Chapingo Serie Horticultura*, 14(2), 177-184.

- Núñez-Colín, C. A., Sahagún-Castellanos, J., González- Andrés, F., Barrientos-Priego, A. F., Segura, S. and Nieto-Ángel, R. (2009). Identification of morphometrics traits for screening of tejocote (*Crataegus* spp.) germplasm for better yield potential. *Fruits*, 64, 35-44.
- Parra-Quijano, M., Iriondo, J. M., De la Cruz, M. and Torres, E. (2011). Strategies for the development of core collections based on ecogeographical data. *Crop Sci.*, 51(2), 656–666. doi: 10.2135/cropsci2010.04.0191
- Parra-Quijano, M., Torres, E., Iriondo, J. M., López, F. and Molina, P. A. (2015). *CAPFITOGEN tools. User manual version 2.0*. International Treaty on Plant Genetic Resources for Food and Agriculture. FAO. Rome. 251 pp. Recuperado de: <http://www.capfitogen.net/en/>
- Parra-Quijano, M., Iriondo, J. M. and Torres, E. (2012). Applications of ecogeography and geographic information systems in conservation and utilization of plant genetic resources. *Spanish Journal of Agricultural Research*, 10(2), 419-429.
- Partap T. and Sthapit B. (1998). Managing Agrobiodiversity, Farmers' Changing Perspectives and Institutional Resources in the Hindu Kush-Himalayan Region. International Centre for Integrated Mountain Development, Kathmandu, Nepal, pp. 1-30.
- Peeters, J. P., Wilkes, H. G. and Galwey, N. W. (1990). The use of ecogeographical data in the exploitation of variation from gene banks. *Theor. Appl. Genet.*, 80,110-112.
- Phipps, J.B. (1997). *Monograph of Northern Mexican Crataegus (Rosaceae subfam. Maloideae)* (No. 15). BRIT Press.
- Phipps, J. B., O'Kennon, R. J. and Lance, R. W. (2003). Hawthorns and medlars. *Timber Press*, Portland, USA. 139 p.
- Rosenzweig C., Elliott, J., Deryng, D., Ruane, A. C., Müller, C., Arneth, A., Boote, K. J., Folberth, C., Glotter, M., Khabarov, N., Neumann, K., Piontek, F., Pugh, T. A. M., Schmid, E., Stehfest, E., Yang, H. and Jones, J. W. (2014). Assessing agricultural risks of climate change in the 21st century in a global gridded crop model intercomparison. *PNAS*, 111(9), 3268–3273. doi: 10.1073/pnas.1222463110
- Velasco-Hernández, A., Saucedo-Veloz, C., Nieto-Ángel, R., Ramírez-Guzmán, M. E., Saucedo-Reyes, D. and Nieto-López, E. H. (2017). Fruit growth, maturation, and shelf life of two cultivars of tejocote (*Crataegus mexicana* Moc. & Sessé). *Fruits*, 72(2), 74-81.

- Villaseñor, J. L. (2016) Checklist of the native vascular plants of Mexico. *Revista Mexicana de Biodiversidad*, 87, 559–902. doi: 10.1016/j.rmb.2016.06.017
- Wheeler, T. and von Braun, J. (2013). Climate Change Impacts on Global Food Security. *Science*, 341(6145), 508–513. doi: 10.1126/science.1239402

CAPÍTULO II

MAPEO DE LA DIVERSIDAD MORFOLÓGICA Y ECOGEOGRÁFICA DEL GÉNERO *Crataegus* L. EN MÉXICO, CON BASE EN CARACTERÍSTICAS DE SEMILLAS Y ENDOCARPIOS

Resumen

La diversidad agrícola es esencial para satisfacer las necesidades humanas y es la base para la producción y la seguridad alimentaria. Los mapas de diversidad permiten identificar de manera rápida y sencilla las áreas donde se concentra la mayor variabilidad, convirtiéndose en una herramienta eficaz para tomar decisiones en materia de conservación. En México, el tejocote (*Crataegus* L.) aún considerado como frutal de recolección, representa un alto potencial para uso industrial y para consumo en fresco. Se reconocen aproximadamente 15 especies en las regiones templadas del país, sin embargo, por falta de estudios taxonómicos y la alta variabilidad existente, su estudio resulta complicado. Con el objetivo de realizar un análisis espacial de la variabilidad morfológica y adaptativa (abiótica) del género *Crataegus* L. en México, se realizó la caracterización morfológica de semillas y endocarpios, así como la caracterización ecogeográfica de los sitios de recolección de 57 genotipos de tejocotes de diferentes regiones del país. Las características relacionadas con el tamaño y forma del endocarpio, cavidad seminal y semilla, así como el número de endocarpios por fruto, fueron las que más contribuyeron para reconocer la variabilidad existente. Nueve variables ecogeográficas con mayor importancia definen la distribución de especies del género *Crataegus* L. en México. Destacan entre ellas la isothermalidad, precipitación, radiación solar y porcentaje de arcilla en el suelo. Estas variables permitieron identificar tres zonas donde se concentra la mayor variabilidad de condiciones adaptativas de tejocote, en el centro, noreste y sur del país, mismas que se proponen como sitios prioritarios para la recolección de germoplasma para su conservación *ex situ*. La diversidad ecogeográfica y fenotípica de tejocote presentan una asociación que puede ser útil en la planeación de estrategias de conservación y en la identificación de germoplasma con características adaptativas sobresalientes, sin antes realizar evaluaciones morfológicas o agronómicas.

Palabras clave: diversidad fenotípica, patrones espaciales, conservación, tejocote.

MAPPING OF MORPHOLOGICAL AND ECOGEOGRAPHICAL DIVERSITY OF THE GENUS *Crataegus* L., BASED ON SEED AND ENDOCARP TRAITS

Abstract

Agricultural diversity is essential to meet human needs and it is the basis for production and food security. Diversity maps allow the areas where the greatest variability is concentrated to be identified quickly and easily, becoming an effective tool for making conservation decisions. In Mexico, the hawthorn (*Crataegus* L.) still considered as a collection fruit, it represents a high potential for industrial use and for fresh consumption. Approximately 15 species are recognized in the temperate regions of the country, however, due to lack of taxonomic clarity and high existing variability, its study is complicated. With the objective of carrying out a spatial analysis of the morphological and adaptive (abiotic) variability of the genus *Crataegus* L. in Mexico, the morphological characterization of seeds and endocarps was carried out, as well as the ecogeographic characterization of the collection sites of 57 hawthorn genotypes from different regions of the country. The characteristics related to the size and shape of the endocarp, seminal cavity and seed, as well as the number of endocarps per fruit, were the ones that contributed most to recognize the existing variability. Nine ecogeographic variables with greater importance define the distribution of species of the genus *Crataegus* L. in Mexico. They stand out among them the isothermality, precipitation, solar radiation and percentage of clay in the soil. These variables allowed the identification of three zones where the greatest variability of tejocote adaptive conditions is concentrated in the center, northeast and south of the country, which are proposed as priority sites for the collection of germplasm for *ex situ* conservation. The ecogeographic and phenotypic diversity of hawthorn present an association that may be useful in the planning of conservation strategies and in the identification of germplasm with outstanding adaptive characteristics, without first making morphological or agronomic evaluations.

Keywords: phenotypic diversity, spatial patterns, conservation, hawthorn.

Introducción

La diversidad de las plantas es esencial para la supervivencia y el bienestar de la humanidad (CBD, 2017). La diversidad de plantas cultivadas es crítica para la seguridad alimentaria mundial. Por su parte, los parientes silvestres de los cultivos (CWR, por sus siglas en inglés) desempeñan el papel más importante para satisfacer las necesidades locales de alimentos, combustibles, medicinas y materiales de construcción, también es de especial interés para los programas de fitomejoramiento, para el caso de frutales por ejemplo, como portainjertos para una mejor adaptación a condiciones adversas. Existe un sinnúmero de especies y variedades de plantas con características importantes, que podrían suplir necesidades actuales y futuras, pero su valor está aún por descubrir (Scheldeman & van Zonneveld, 2011; CBD, 2017), aun conociendo que el futuro de los cultivos y de la satisfacción de alimentos, está precisamente en la diversidad.

La diversidad vegetal de México es reconocida a nivel mundial, se ubica en la quinta posición con un registro estimado de 25 mil especies (CONABIO, 2009; Villaseñor, 2016). Segura *et al.* (2018) documentaron que existen 762 especies de frutales comestibles (288 géneros y 87 familias botánicas). Corresponden a árboles frutales cultivados 113 especies, de los cuales 53 son nativas de México y 60 han sido introducidas. También señalaron que existen 649 especies no cultivadas o subutilizadas, 88 de ellas son introducidas y 554 son nativas.

Las especies del género *Crataegus* L. se distribuyen alrededor del mundo en las regiones templadas del hemisferio Norte y en algunas localidades de Perú y Ecuador (Phipps, 1997; Phipps, O'Kennon & Lance, 2003). En México se distribuyen aproximadamente 15 especies de este género (Núñez-Colín & Hernández-Martínez, 2011), se reportan 13 para el centro-norte (Phipps 1997) y dos para el sur del país (Eggleston, 1909). Tejocote es el nombre con el que comúnmente los mexicanos conocen los frutos de las especies de este género, que se considera todavía como un frutal subutilizado y de recolección (Borys & Leszczyńska-Borys, 2001), aun cuando se han reportado plantaciones

comerciales equivalentes a más de 900 hectáreas (SIAP, 2017). Para los mexicanos, el tejocote representa un valor económico y cultural importante el Día de Muertos y época decembrina. Es utilizado para consumo humano como fruto en fresco, en bebidas y dulces artesanales; tiene propiedades medicinales, valor nutracéutico, valor ecológico, como portainjerto y en la industria alimentaria como fuente de pectinas y vitamina C (Nieto-Ángel, 2007). El incremento en plantaciones comerciales y la demanda en EE. UU. pueden aumentar el riesgo de pérdida de la diversidad inter e intraespecífica del tejocote (Betancourt-Olvera *et al.*, 2018).

El estudio de la diversidad del tejocote en México se realiza desde finales del siglo pasado con base en características de estructuras reproductivas y vegetativas (semillas, endocarpios, flores, frutos, hojas, arquitectura del árbol, entre otros.) (Nieto-Ángel, Ortiz, González-Andrés & Borys, 1997; Núñez-Colín *et al.*, 2008a; Nieto-Ángel, Pérez-Ortega, Núñez-Colín, Martínez-Solis & González-Andrés, 2009; Betancourt-Olvera, Nieto-Ángel, Urbano & González-Andrés, 2018).

Las características de endocarpios y semillas del género *Crataegus* L. se han utilizado en la caracterización del germoplasma con diferentes propósitos como la taxonomía y diversidad, ya que muestran alta variabilidad y además tienen baja plasticidad fenotípica (González-Andrés & Ortiz, 1995; Nieto-Ángel *et al.*, 1997; Nieto-Ángel *et al.*, 2009; Núñez-Colín *et al.*, 2009). Los estudios previos de semillas y endocarpios de tejocote reconocen dos fuentes de germoplasma diferentes de especies probablemente domesticadas y de silvestres (Nieto-Ángel *et al.*, 1997; Nieto-Ángel *et al.*, 2009). Por su parte, la caracterización ecogeográfica de sitios de colecta puede ser una alternativa o complementaria de la caracterización genética o fenotípica, debido a las relaciones entre las características genéticas o morfológicas y las condiciones ambientales de los sitios donde las plantas se desarrollan (Steiner, 1999). Puede proporcionar información de las características adaptativas del germoplasma conservado en bancos de germoplasma con utilidad para programas de mejoramiento genético

enfocados a la búsqueda de tolerancia a estrés biótico y abiótico (Parra-Quijano, Iriondo, De la Cruz & Torres, 2011b). El análisis espacial de la diversidad puede mejorar significativamente su comprensión y su monitoreo, ya que los resultados obtenidos pueden proporcionar información crítica de la diversidad presente en determinadas áreas geográficas y utilizarse para evaluar el estado actual de conservación de las especies o priorizar áreas para la conservación (Guarino, Jarvis, Hijmans & Maxted, 2002; Scheldeman & van Zonneveld, 2011).

Los mapas de diversidad permiten identificar de manera sencilla y rápida las zonas o regiones donde se concentra una alta variabilidad, convirtiéndose en una poderosa herramienta para la toma de decisiones en materia de conservación *ex situ* e *in situ* (Parra-Quijano, Torres, Iriondo, López & Molina, 2015). También facilitan la adopción de resultados por parte de quienes promueven el desarrollo e implementación de políticas de conservación (Guarino *et al.*, 2002; Scheldeman & van Zonneveld, 2011).

Por otro lado, la información espacial combinada con datos de caracterización y evaluación, también ha resultado útil en el manejo de bancos de germoplasma, por ejemplo, para definir colecciones núcleo, identificar vacíos en colecciones y determinar la representatividad en colecciones *ex situ* (Parra-Quijano, Iriondo, Torres & Rosa, 2011a; Parra-Quijano *et al.* 2011b; Scheldeman & van Zonneveld, 2011). La utilización de información ambiental para la realización de estimaciones de variabilidad genética y de identificación de genes de interés, así como el uso de información ecogeográfica con SIG son de las principales metodologías utilizadas y que han demostrado su efectividad en casos de estudio.

La presente investigación tuvo como objetivo realizar un análisis espacial de la variabilidad morfológica (semillas y endocarpios) y adaptativa (abiótica) de *Crataegus* spp. en México. Para ello se hizo uso de herramientas SIG que permitieron identificar los patrones espaciales de la diversidad fenotípica y ecogeográfica, lo cual puede apoyar en la optimización de la conservación y uso de los recursos genéticos de tejocote (*Crataegus* spp.) en México.

Materiales y Métodos

Caracterización fenotípica y ecogeográfica

Como material vegetal para la caracterización de semillas y endocarpios se utilizaron frutos de 57 genotipos de tejocote. De éstos, 35 se encuentran establecidas en el Banco de Germoplasma de Tejocote en la Universidad Autónoma Chapingo (BGT-UACH) y el resto fueron recolectados *in situ* en diferentes regiones del país (Cuadro suplementario 1.1). Los genotipos objeto de este estudio representan las principales zonas geográficas de estudio establecidas por Betancourt-Olvera *et al.* (2018) en una evaluación morfológica y molecular de la diversidad género *Crataegus* spp. en México.

Para cada genotipo se recolectó de uno a 2 kg de frutos sanos que ya habían caído del árbol y se obtuvo una muestra al azar de 20 frutos por genotipo. A cada fruto se le extrajeron los endocarpios, se limpiaron y guardaron en bolsas de polietileno hasta su evaluación. Con ayuda de unas tijeras de podar, se partieron por la mitad siguiendo la sutura de abscisión. De igual manera, por cada genotipo se obtuvo una muestra de 20 endocarpios a los cuales se les realizó un corte transversal. A partir de estos cortes se obtuvieron imágenes digitalizadas de ambas caras del endocarpio, las cuales se editaron para iluminar la semilla y la cavidad seminal para facilitar su medición. Finalmente, se midieron 60 variables cuantitativas (Figura 1.1, Cuadro 1.1) con ayuda del programa Image Tool Versión 3.0.

Para la caracterización ecogeográfica se partió de la información sobre sitios de recolección de 56 de los genotipos mencionados en el párrafo anterior, a los cuales se sumaron datos de observación de poblaciones de *Crataegus* sp. en México. Se incluyeron datos de herbarios y de la Global Biodiversity Information Facility (GBIF, 2017). A partir de las matrices básicas de datos se calcularon los estadísticos descriptivos; se realizó el análisis de componentes principales (ACP) y agrupamientos con el método Ward, previamente utilizado en otros estudios de variabilidad en tejocote (Núñez-Colín *et al.*, 2008a; Nieto-Ángel *et al.*, 2009;

Betancourt Olvera *et al.*, 2018) con el programa NTSYSpc 2.1 y la herramienta DIVmaps de CAPFITOGEN 2.0 (Parra-Quijano *et al.*, 2015).

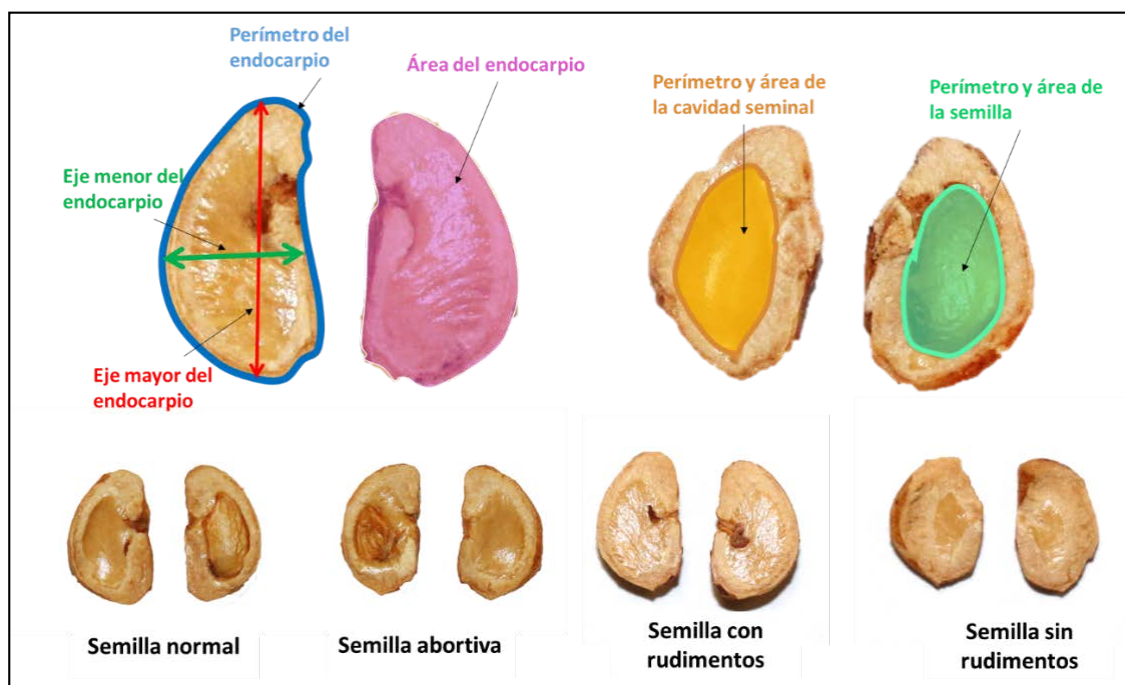


Figura 1.1. Ilustración de 10 variables utilizadas para la caracterización morfológica de 57 genotipos de semillas y endocarpios de tejocote (*Crataegus* spp.). Estas características representan la base para el cálculo del resto de las variables.

Mapeo de la diversidad morfológica y ecogeográfica

Se elaboraron dos tablas de descriptores de pasaporte (FAO, BIOVERSITY 2012), una de los 57 genotipos caracterizados morfológicamente y otra con los datos totales conocidos sobre la distribución del género *Crataegus* L. en México.

Con el fin de determinar la calidad de georreferenciación de los sitios de recolección u observación, en ambas tablas se aplicó la herramienta GEOQUAL de CAPFITOGEN 2.0, descartando de los posteriores análisis espaciales aquellos sitios con una calidad inferior a 60 en una escala de 0 a 100 (Parra-Quijano *et al.* 2015). Posteriormente se utilizó la herramienta SelecVAR (también de CAPFITOGEN 2.0) para la identificación de variables de adaptación abiótica no redundantes de mayor influencia en la distribución de *Crataegus* spp. en México. Éstas fueron seleccionadas a partir de un grupo de 66 variables para

México, agrupadas en tres componentes: bioclimáticas (Hijmans, Cameron, Parra, Jones & Jarvis, 2005), geofísicas (Jarvis, Reuter, Nelson & Guevara, 2008b) y edáficas (FAO/IIASA/ISRIC/ISSCAS/JRC, 2012) (Cuadro suplementario 1.2). La resolución de estas variables (capas SIG) fue de 2.5 arc-minutos (aproximadamente 5 x 5 km en el Ecuador). Las variables más importantes fueron definidas utilizando la Clasificación “Random Forest” (RFC) (Cutler *et al.*, 2007) y eliminando redundancia con análisis de correlación bivariada (BCA) y análisis de componentes principales (PCA).

Finalmente, las tablas de pasaporte y de caracterización morfológica fueron introducidas en la herramienta DIVmapas para generar tres mapas de vecindarios geográficos de la diversidad ecogeográfica y fenotípica en formato raster: 1) Diversidad ecogeográfica del género *Crataegus* L. en México, 2) Diversidad fenotípica de los genotipos caracterizados, y 3) Diversidad ecogeográfica de los genotipos caracterizados. Los mapas tuvieron una resolución de 2.5 arc-minutos (aproximadamente 5 km en el Ecuador) y para la construcción de los vecindarios geográficos se utilizó un radio de influencia de 10 km para el mapa de diversidad ecogeográfica de la distribución total (mapa 1), y 5 km para el mapa de diversidad fenotípica y diversidad ecogeográfica de sólo el material caracterizado morfológicamente (mapas 2 y 3). Con el radio de influencia se define cada vecindario geográfico, se logra proyectando circunferencias desde el centroide de cada celda con presencia de *Crataegus* sp. y celdas adyacentes. Los sitios de recolección o de observación cubiertos por cada circunferencia conforman los vecindarios geográficos. De cada vecindario geográfico se calcula, según sea el caso, las distancias ecogeográficas o fenotípicas promedio entre los sitios de recolección/observación o entre los genotipos, respectivamente. El valor de distancia promedio se adjudica a cada celda desde donde se trazó el vecindario geográfico, logrando así los mapas de diversidad. Los mapas se visualizaron y editaron en DIVAGIS 7.5.0 y ArcMap 10.2.2 (ESRI, 2014). Adicionalmente, DIVmapas generó análisis jerárquicos de agrupamiento (Cluster analysis) para datos ecogeográficos y fenotípicos con el método de mínima varianza de Ward.

Resultados y Discusión

Variabilidad fenotípica y ecogeográfica

El coeficiente de variación de cada característica para el grupo de genotipos estudiados va de 0.05 % (Relación entre el Área de la semilla/Área de la cavidad seminal) a 427.82 % (Relación entre el Porcentaje de endocarpios sin rudimentos por fruto/Porcentaje de endocarpios con semilla normal por fruto) (Cuadro 1.1). Las características con los valores más altos son todas las relacionadas con el tipo de semilla (normal, abortiva, con rudimentos y sin rudimentos). Por el contrario, las características relacionadas con el diámetro Feret (endocarpio, endocarpio transversal, cavidad seminal y semilla), índice de redondez y la relación de aspecto (del corte transversal del endocarpio) son las que presentaron los valores más bajos de variabilidad. De manera general, estos resultados coinciden con los obtenidos por Nieto-Ángel *et al.* (2009), donde los valores más altos de variabilidad se relacionan también con las características del tipo de semilla (presente, ausente o abortiva) y los valores más bajos se relacionan con la forma del endocarpio, de la semilla y la cavidad seminal (índices de redondez y compactación). Las diferencias que se presentan entre los dos estudios se pueden atribuir, principalmente al número de características evaluadas.

Cuadro 1.1. Variables morfológicas evaluadas en semillas y endocarpios de 57 genotipos de tejocote (*Crataegus* spp.).

Núm.	Variable (Código) (Unidades)	Media	CV (%)
1	Peso de endocarpios (PESO) ¹	(g) 0.41	35.30
2	Número de endocarpios (END_20FRU) ²	69.32	13.72
3	Promedio de endocarpios por fruto (PROM_END)	3.47	13.88
4	Porcentaje de endocarpios con semilla normal (%SEM_NOR_END) ³	(%) 63.83	37.05
5	Porcentaje de endocarpios con semilla abortiva (%SEM_ABOR_END) ³	(%) 8.55	92.20
6	Porcentaje de endocarpios con rudimentos (%SEM_CRUD_END) ³	(%) 24.75	83.25
7	Porcentaje de endocarpios sin rudimentos (%SEM_SRUD_END) ³	(%) 2.87	94.07
8	Área del endocarpio (A_END)	(mm ²) 29.39	27.86
9	Perímetro del endocarpio (P_END)	(mm) 21.85	14.98
10	Longitud del eje mayor del endocarpio (MAJ_END)	(mm) 8.07	15.86
11	Longitud del eje menor del endocarpio (MIN_END)	(mm) 4.52	13.80
12	Diámetro Feret del endocarpio (FER_END) ⁴	(mm) 0.75	3.85
13	Índice de circularidad del endocarpio (CIR_END) ⁵	8.25	15.68
14	Relación de aspecto del endocarpio (AR_END) ⁶	1.79	7.58
15	Índice de redondez del endocarpio (ROU_END)	0.56	7.57
16	Área transversal del endocarpio (A_ETR)	(mm ²) 15.13	31.73

Cuadro 1.1. Continuación...

Núm.	Variable (Código) (Unidades)	Media	CV (%)
17	Perímetro transversal del endocarpio (P_ETR)	(mm) 15.35	16.21
18	Longitud del eje mayor transversal del endocarpio (MAJ_ETR)	(mm) 4.92	16.63
19	Longitud del eje menor transversal del endocarpio (MIN_ETR)	(mm) 3.78	16.81
20	Diámetro Feret transversal del endocarpio (FER_ETR) ⁴	(mm) 0.78	3.67
21	Índice de circularidad transversal del endocarpio (CIR_ETR) ⁵	5.33	15.91
22	Relación de aspecto transversal del endocarpio (AR_ETR) ⁶	1.31	4.85
23	Índice de redondez transversal del endocarpio (ROU_ETR) ⁷	0.77	4.37
24	Porcentaje de endocarpios con semilla normal por fruto (%SEM_NOR_F) ⁸	(%) 64.15	36.88
25	Porcentaje de endocarpios con semilla abortiva por fruto (%SEM_ABOR_F) ⁸	(%) 9.17	87.35
26	Porcentaje de endocarpios con rudimentos por fruto (%SEM_CRUD_F) ⁸	(%) 23.97	83.42
27	Porcentaje de endocarpios sin rudimentos por fruto (%SEM_SRUD_F) ⁸	(%) 2.70	98.63
28	Área de la semilla (A_SEM) ⁸	(mm ²) 9.81	22.23
29	Perímetro de la semilla (P_SEM)	(mm) 13.18	11.14
30	Longitud del eje mayor de la semilla (MAJ_SEM)	(mm) 5.06	11.32
31	Longitud del eje menor de la semilla (MIN_SEM)	(mm) 2.43	13.31
32	Diámetro Feret de la semilla (FER_SEM) ⁴	(mm) 0.70	6.09
33	Índice de circularidad de la semilla (CIR_SEM) ⁵	5.20	11.00
34	Relación de aspecto de la semilla (AR_SEM) ⁶	2.11	8.70
35	Índice de redondez de la semilla (ROU_SEM) ⁷	0.48	8.77
36	Área transversal de la semilla (A_STR)	(mm ²) 2.74	25.80
37	Perímetro transversal de la semilla (P_STR)	(mm) 6.47	13.30
38	Longitud del eje mayor transversal de la semilla (MAJ_STR)	(mm) 2.36	14.62
39	Longitud del eje menor transversal de la semilla (MIN_STR)	(mm) 1.45	14.23
40	Diámetro Feret transversal de la semilla (FER_STR) ⁴	(mm) 0.81	6.68
41	Índice de circularidad transversal de la semilla (CIR_STR) ⁵	2.49	14.44
42	Relación de aspecto transversal de la semilla (AR_STR) ⁶	1.65	13.18
43	Índice de redondez transversal de la semilla (ROU_STR) ⁷	0.63	12.47
44	Área de la cavidad seminal (A_CAV)	(mm ²) 9.83	22.19
45	Perímetro de la cavidad seminal (P_CAV)	(mm) 13.20	11.12
46	Longitud del eje mayor de la cavidad seminal (MAJ_CAV)	(mm) 5.07	11.28
47	Longitud del eje menor de la cavidad seminal (MIN_CAV)	(mm) 2.45	13.20
48	Diámetro Feret de la semilla (FER_CAV) ⁴	(mm) 0.72	5.92
49	Índice de circularidad de la semilla (CIR_CAV) ⁵	5.22	10.96
50	Relación de aspecto de la semilla (AR_CAV) ⁶	2.13	8.62
51	Índice de redondez de la semilla (ROU_CAV) ⁷	0.50	8.44
52	Área de la semilla/Área del endocarpio (A_SEM/A_END)	0.35	20.90
53	Área transversal de la semilla/Área transversal del endocarpio (A_STR/A_ETR)	0.20	39.42
54	Área de la cavidad seminal/Área del endocarpio (A_CAV/A_END)	0.35	20.89
55	Área de la semilla/Área de la cavidad seminal (A_SEM/A_CAV)	1.00	0.05
56	Porcentaje de endocarpios con semilla abortiva por fruto/Porcentaje de endocarpios con semilla normal por fruto (%SEM_ABOR_F/%SEM_NOR_F)	0.23	145.63
57	Porcentaje de endocarpios sin rudimentos por fruto/Porcentaje de endocarpios con semilla normal por fruto (%SEM_SRUD_F/%SEM_NOR_F)	0.14	427.82
58	Porcentaje de endocarpios con rudimentos por fruto/Porcentaje de endocarpios con semilla normal por fruto (%SEM_CRUD_F/%SEM_NOR_F)	1.10	331.87
59	Porcentaje de endocarpios con semilla abortiva por fruto/Porcentaje de endocarpios sin rudimentos por fruto (%SEM_ABOR_F/%SEM_SRUD_F)	3.60	142.47
60	Porcentaje de endocarpios con semilla abortiva por fruto/Porcentaje de endocarpios con rudimentos por fruto (%SEM_ABOR_F/%SEM_CRUD_F)	0.74	144.98

¹Promedio del peso de los endocarpios por fruto. ²Promedio del número de endocarpios por fruto. ³Número total de endocarpios con semilla normal, abortiva, con rudimentos o sin rudimentos, multiplicado por 100 y dividido por el número total de endocarpios. ⁴ $[4(\text{área}/\pi)]^{1/2}$. ⁵ $[4\pi(\text{área})]/\text{perímetro}^2$. ⁶Longitud del eje mayor/Longitud del eje menor. ⁷ $[4(\text{área}/\pi) \times \text{longitud del eje mayor}]^2$. ⁸Promedio del porcentaje de endocarpios con semilla normal, abortiva, con rudimentos o sin rudimentos de los 20 frutos. CV. Coeficiente de variación.

El PCA mostró que los primeros tres componentes principales (CP) explicaron el 37, 20 y 16 %, respectivamente, acumulando el 73 % de la variabilidad total de las características morfológicas evaluadas (Cuadro 1.2). Al igual que Nieto-Ángel *et al.* (2009), el CP1 está relacionado con las características de tamaño del endocarpio (área, perímetro, longitud del eje mayor y menor y, diámetro Feret), de la cavidad seminal y de la semilla (diámetro Feret). A diferencia del CP2 que está asociado únicamente con la forma de la cavidad seminal y de la semilla (índice de redondez y relación de aspecto). Finalmente, el CP3 está relacionado con el número de endocarpios (promedio por fruto y total) y con la forma de los endocarpios en los cortes transversales (índices de circularidad y redondez). Es importante denotar que las características relacionadas con la cavidad seminal y semilla arrojan prácticamente los mismos valores de variabilidad, lo que se puede traducir en que son variables complementarias o altamente correlacionadas y para futuros trabajos se pueden omitir aquellas relacionadas con alguna de estas dos características. Se puede ampliar el estudio en aquellas que mostraron la mayor variabilidad, específicamente las relacionadas con el porcentaje de semillas normales, abortivas, con y sin rudimentos, con la inclusión de otras variables que pueden aportar más información acerca de las conductas reproductivas, como la apomixis, comprobada en otras especies de *Crataegus* L. en Norteamérica (Talent y Dickinson, 2007)

Cuadro 1.2. Valores y vectores-características en cuatro componentes principales de 60 características morfológicas en semillas y endocarpios de 57 genotipos de tejocote (*Crataegus* spp.).

Código de variable	CP1*	CP2	CP3	Código de variable	CP1*	CP2	CP3
PESO	-0.19	0.02	-0.08	FER_SEM	-0.2	-0.02	-0.09
END_20FRU	0.05	-0.04	-0.25	AR_SEM	0	0.23	-0.18
PROM_END	0.05	-0.04	-0.25	ROU_SEM	0	-0.23	0.15
%SEM_NOR_END	-0.1	0.18	0.19	A_STR	-0.09	-0.17	0.11
%SEM_ABOR_END	0.04	-0.03	-0.14	P_STR	-0.11	-0.19	0.06
%SEM_CRUD_END	0.09	-0.18	-0.15	MAJ_STR	-0.12	-0.21	0
%SEM_SRUD_END	0.07	-0.13	-0.16	MIN_STR	-0.05	-0.1	0.21
A_END	-0.2	0.03	-0.06	CIR_STR	0.1	0.09	0.21
P_END	-0.21	0.04	-0.07	FER_STR	-0.11	-0.2	0
MAJ_END	-0.2	0.06	-0.08	AR_STR	-0.09	-0.11	-0.22
MIN_END	-0.2	0	-0.03	ROU_STR	0.08	0.12	0.23
CIR_END	0.06	-0.09	0.1	A_CAV	-0.18	-0.12	-0.04
FER_END	-0.2	0.05	-0.07	P_CAV	-0.19	-0.07	-0.08
AR_END	-0.08	0.13	-0.11	MAJ_CAV	-0.19	-0.03	-0.09
ROU_END	0.08	-0.14	0.1	MIN_CAV	-0.16	-0.18	0.02

Cuadro 1.2. Continuación...

Código de variable	CP1*	CP2	CP3	Código de variable	CP1*	CP2	CP3
A_ETR	-0.19	0.05	0.06	CIR_CAV	-0.01	-0.18	0.18
P_ETR	-0.19	0.04	0.07	FER_CAV	-0.2	-0.02	-0.09
MAJ_ETR	-0.19	0.04	0.08	AR_CAV	0	0.23	-0.18
MIN_ETR	-0.18	0.06	0.06	ROU_CAV	0	-0.23	0.15
CIR_ETR	-0.04	0.13	0.01	A_SEM.A_END	0.09	-0.2	0.03
FER_ETR	-0.19	0.04	0.08	A_STR.A_ETR	0.12	-0.18	-0.03
AR_ETR	0	-0.08	0.08	A_CAV.A_END	0.09	-0.2	0.03
ROU_ETR	0.01	0.08	-0.1	A_SEM.A_CAV	-0.16	-0.14	-0.02
%SEM_NOR_F	-0.1	0.18	0.19	%SEM_ABOR_F/%SEM_NOR_F	0.11	-0.09	-0.24
%SEM_ABOR_F	0.04	-0.06	-0.15	%SEM_SRUD_F/%SEM_NOR_F	0.09	-0.07	-0.13
%SEM_CRUD_F	0.1	-0.17	-0.14	%SEM_CRUD_F/%SEM_NOR_F	0.09	-0.08	-0.14
%SEM_SRUD_F	0.07	-0.12	-0.18	%SEM_ABOR_F/%SEM_SRUD_F	-0.03	0	-0.12
A_SEM	-0.18	-0.12	-0.04	%SEM_ABOR_F/%SEM_CRUD_F	-0.06	0.08	-0.11
P_SEM	-0.19	-0.07	-0.08	Eigen valores	3.35	1.83	1.45
MAJ_SEM	-0.19	-0.03	-0.09	Varianza explicada (%)	37.22	20.29	16.14
MIN_SEM	-0.16	-0.18	0.02	Varianza acumulada (%)	37.22	57.5	73.64
CIR_SEM	-0.01	-0.18	0.18				

*Los valores absolutos más altos de cada CP se muestran en negritas.

El diagrama de agrupamiento muestra dos grandes conjuntos. El conjunto A conglomerar los grupos con los endocarpios más pequeños (1, 2 y 3), con respecto de los que se agrupan en el conjunto B (4 y 5). Haciendo un corte a una distancia euclidiana de 0.6 se pueden identificar cinco grupos, éstos no presentan un patrón claro de localidad o de especie (Figura 1.2). El grupo uno contiene los genotipos más pequeños y menos alargados. El dos se caracteriza principalmente porque son los genotipos con el menor número de endocarpios por fruto (3.2) y un mayor porcentaje de semillas normales con respecto de las abortivas. El grupo tres es el segundo con los genotipos más pequeños, más redondos, los que tienen un mayor número de endocarpios por fruto (3.8) y con mayor porcentaje de semillas abortivas con respecto de las normales. El grupo cuatro acumula los genotipos con endocarpios más grandes, los más alargados y menos redondos. Se puede apreciar que la mayoría estos genotipos son procedentes del estado de Puebla, el estado donde se cultiva el 95 % del tejocote producido en México. El quinto grupo es el segundo con los genotipos más grandes y más redondos (Cuadro 1.3). Los grupos formados no muestran un patrón claro de procedencia o de clasificación taxonómica. No obstante, no se descarta la opción de que los grupos 3 y 5 representen especies diferentes a las del resto del estudio (*C. rosei*, *C. mexicana* y *C. gracilior*). Lo anterior sugiere que las características de semillas y endocarpios permiten identificar la variabilidad

de genotipos de tejocote en los diferentes sitios de recolección; sin embargo, no aportan información relevante que soporte las clasificaciones taxonómicas, el principal problema del género *Crataegus* L. en México (Núñez-Colín & Hernández-Martínez, 2011) por un lado; por el otro, debe considerarse que los genotipos se han clasificado como *C. rosei*, *C. mexicana* y *C. gracilior*, estas especies pueden pertenecer a la misma fuente genética y comparten características morfológicas semejantes (Betancourt-Olvera, 2018), por eso se dificulta su agrupamiento bajo este tipo de variables.

Cuadro 1.3. Principales características en semillas y endocarpios de tejocote (*Crataegus* spp.) extraídas del PCA para cada grupo delimitados en el análisis de agrupamientos.

Variable (unidades)/Grupo	1	2	3	4	5	Media
Perímetro del endocarpio (mm)	17.98 ⁺	20.79	18.77	25.32 [*]	23.53	21.85
Área del endocarpio (mm ²)	19.81 ⁺	26.31	22.62	37.92 [*]	33.62	29.39
Longitud del eje mayor del endocarpio (mm)	6.62 ⁺	7.69	6.73	9.45 [*]	8.7	8.07
Diámetro Feret del endocarpio (mm)	6.79 ⁺	7.9	6.85	9.62 [*]	8.91	8.25
índice de redondez de la semilla	0.47	0.48	0.52 [*]	0.46 ⁺	0.52 [*]	0.48
Relación de aspecto de la semilla	2.2	2.1	1.95 ⁺	2.23 [*]	1.98	2.11
Número de endocarpios por fruto	3.5	3.17 ⁺	3.82 [*]	3.55	3.46	3.47
Relación de % de semillas abortivas/ % semillas normales	0.35	0.07 ⁺	0.62 [*]	0.11	0.23	0.23

*Valores más altos, +valores más bajos.

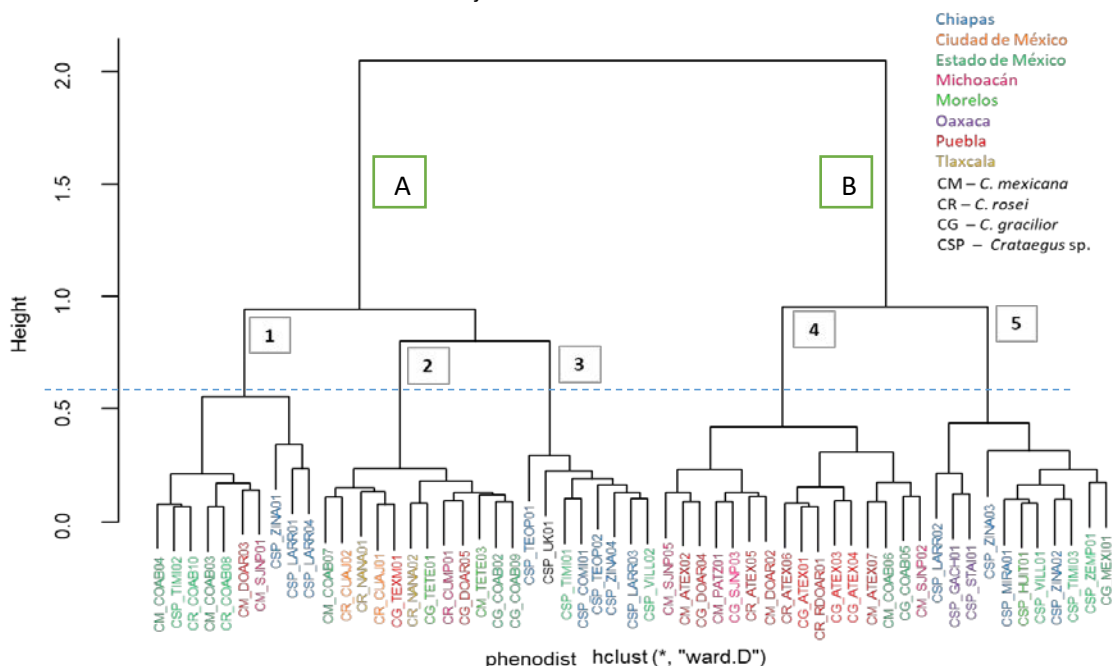


Figura 1.2. Agrupamiento de 57 genotipos de tejocote (*Crataegus* L.) por el método jerárquico de Ward basado en 60 características fenotípicas de semillas y endocarpios.

Por otro lado, se ha documentado el efecto de la selección o no de variables ecogeográficas predictorias en los patrones espaciales de los modelos de distribución de especies (Pliscoff, Luebert, Hilger & Guisan, 2014), concluyendo que un número reducido de variables permite procesos y análisis más rápidos y eficientes, facilitando la interpretación de los resultados. Por lo que se acató la sugerencia de descartar variables que no hacen aportes al análisis o, variables que aportan la misma información que otras (Parra-Quijano *et al.*, 2015). El mapeo de la diversidad ecogeográfica se realizó con base en nueve variables que resultaron más importantes de acuerdo con RFC y con la identificación de variables redundantes con los análisis BC y PCA, bajo la premisa de que las variables con mayor importancia en la clasificación son aquellas de mayor valor de decrecimiento medio de la precisión (Cutler *et al.*, 2007) (Figura 1.3, Cuadro 1.4).

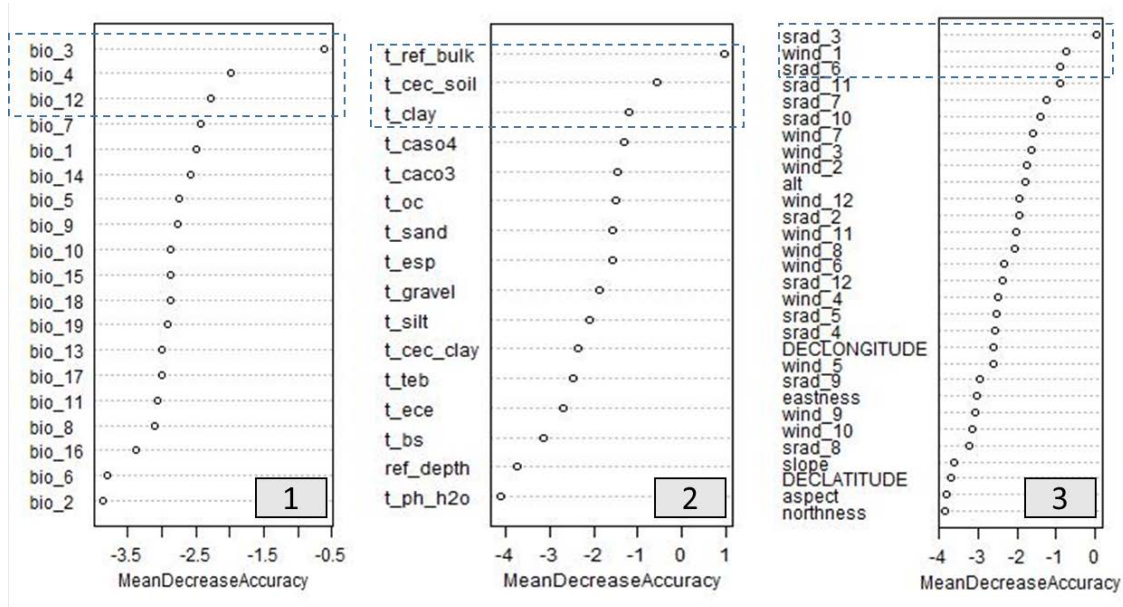


Figura 1.3. Importancia de las variables 1) Bioclimáticas, 2) Edáficas y 3) Geofísicas resultante de la Clasificación “Random Forest” para tejocote (*Crataegus* L.).

En México, las especies del género *Crataegus* L. se distribuyen principalmente en las zonas montañosas de la Sierra Madre Oriental, Sierra Madre Occidental y de la Sierra Madre del Sur, así como en el Eje Neo-Volcánico (Núñez-Colín *et al.*, 2008b), lo que puede explicar que la isothermalidad sea una de las variables

bioclimáticas principales que determinan la distribución de tejocotes, ya que ésta tiene una gran variación térmica y está influenciada principalmente por la altitud (López-Sandoval *et al.*, 2015). También coincide con el estudio sobre caracterización eco-climática realizada por Núñez-Colín *et al.* (2008b) donde se señaló que la precipitación pluvial es el factor principal que definió los grupos de distribución de *Crataegus* spp., y no descarta la influencia que tiene la temperatura en los patrones de distribución.

Cuadro 1.4. Variables ecogeográficas y unidades de medida a partir de las cuales se realizó la caracterización ecogeográfica del género *Crataegus* L.

Variable ecogeográfica [Código] (Unidades)	Media	CV (%)
Bioclimáticas		
Isotermalidad [bio_3] (BIO2/BIO7)*(100)	70.31	4.17
Estacionalidad en la temperatura [bio_4] (desviación estándar*100)	1,566.13	18.05
Precipitación anual [bio_12] (mm)	1,093.75	20.42
Geofísicas		
Radiación solar del mes de marzo [rad_3] (W/m ²)	19,891.86	1.85
Radiación solar del mes de junio [rad_6] (W/m ²)	18,670.34	2.66
Velocidad del viento del mes de enero [win_1](km/h)	2.49	11.43
Edáficas		
Densidad aparente de referencia en suelo superficial [t_ref_bulk] (kg/dm ³)	1.45	13.07
Capacidad de intercambio catiónico en suelo superficial [t_cec_soil] (cmol/kg)	20.16	41.43
Contenido de arcilla en suelo superficial [t_clay] (% peso)	23.27	73.61

En el diagrama de agrupamiento se pueden identificar siete grupos a una distancia euclidiana de 15. Se aprecia un patrón de agrupamiento basado en los sitios de recolección. Los dos primeros grupos aglomeran a todos los genotipos procedentes de Chiapas y de Oaxaca, se caracterizan principalmente por proceder de los sitios con menor radiación, mayor isotermalidad y precipitación, pero difieren en condiciones de suelo.

La principal característica de los grupos tres y cuatro es que los genotipos provienen de suelos donde el porcentaje de arcilla es muy bajo (4 %), lo que indica que son genotipos que crecen y producen en suelos pobres (baja capacidad de retener nutrientes). El grupo cinco integra todos los genotipos de Michoacán, es el grupo con los valores más altos de radiación solar para el mes de marzo y los más bajos de isotermalidad.

Los grupos seis y siete se caracterizan por tener los valores más altos de radiación solar para el mes de junio y los más bajos en precipitación media anual (Figura 1.4, Cuadro 1.5).

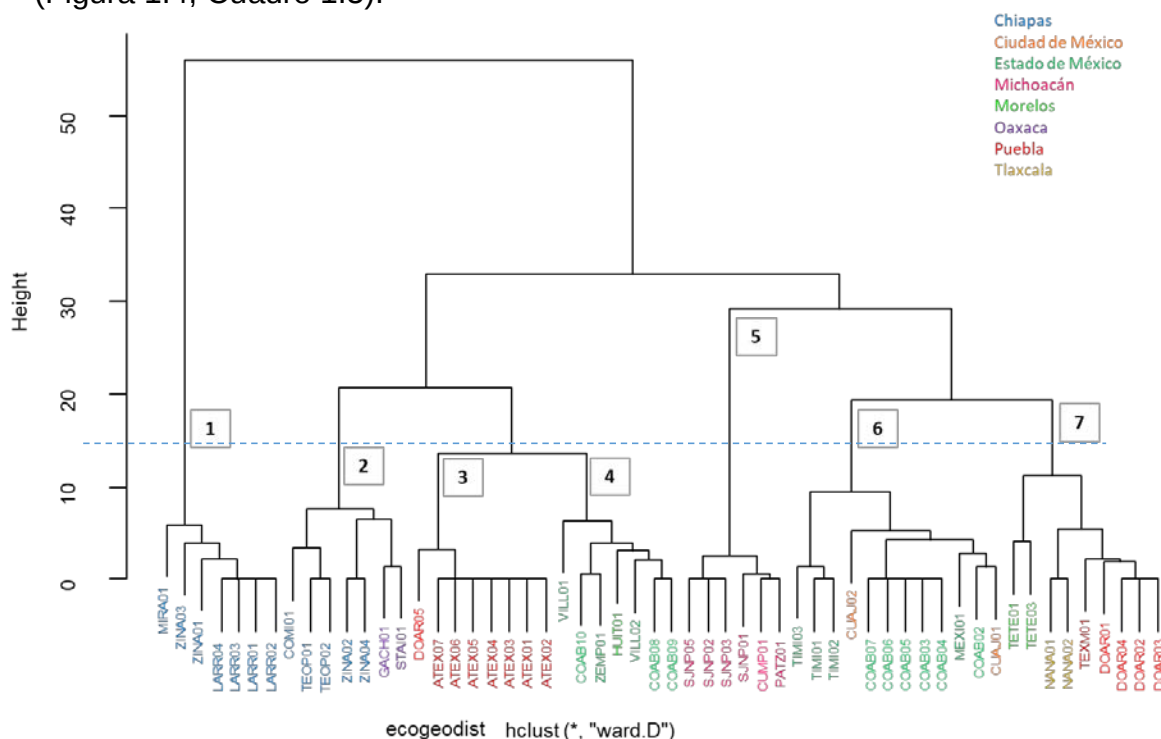


Figura 1.4. Agrupamiento de los genotipos por método Jerárquico de Ward basado en nueve características ecogeográficas de los sitios de recolección de 56 genotipos de tejocote (*Crataegus* L.).

Cuadro 1.5. Promedio de variables para cada grupo formado por el análisis de agrupamiento de 56 genotipos de tejocote (*Crataegus* spp.).

Código de variable/Grupo	1	2	3	4	5	6	7	Media
rad_3	19454.57 ⁺	19533.29	19620.75	20135.57	20261.83 [*]	20252	19835.44	19891.86
rad_6	18207.57	17924.71 ⁺	18924.38	18528	18673.67	19004.33	19047.56 [*]	18670.34
win_1	2.72	2.76 [*]	2.42	2.49	2.37	2.64	2.07 ⁺	2.49
bio_4	1155	1137.14 ⁺	1606.13	1662.43	1890.33 [*]	1712.33	1698	1566.13
bio_3	73.71 [*]	73.14	71.75	68.29	65 ⁺	69	71	70.3
bio_12	1503.14 [*]	1082.86	1023.88	1130.14	1198.67	988.17	888.44 ⁺	1093.75
t_clay	42 [*]	12.57	4 ⁺	4 ⁺	8	37.75	40	23.27
t_cec_soil	31	12.57 ⁺	14	14	38 [*]	18.67	18	20.16
t_ref_bulk	1.28	1.54	1.7	1.7	1.56 [*]	1.29	1.27 ⁺	1.45

^{*}Valores más altos, ⁺valores más bajos.

Mapeo de la diversidad fenotípica y ecogeográfica

Se obtuvo una tabla de 1,093 puntos de presencia de especies del género *Crataegus* L., y como resultado de la integración, curación y sistematización de la información, se registró la distribución de 21 especies diferentes (Cuadro 1.6), aunque la revisión taxonómica más actual del género *Crataegus* L. en México sólo acepta 15 especies (Núñez-Colín & Hernández-Martínez, 2011); 13 reportadas por Phipps (1997) para el centro y norte, y dos especies más para el sur de México documentadas por Eggleston (1909). El resto puede referirse a sinonimias o a clasificaciones todavía no documentadas ni aceptadas, resultado de la falta de estudios sobre la taxonomía de este género, atribuido principalmente a complicaciones reproductivas como la apomixis, niveles de ploidía, pseudogamia y autoincompatibilidad gametofítica (Phipps *et al.*, 2003; Talent y Dickinson, 2005; Talent y Dickinson, 2007; Núñez-Colín & Hernández-Martínez, 2011).

Las especies *Crataegus mexicana*, *C. rosei* y *C. pubescens* (sinonimia de *C. gracilior*; J. B. Phipps) son las más representadas con 52 % de los registros. El 29 % de las observaciones corresponde a aquellos que han sido identificados taxonómicamente hasta el nivel de género, se incluyeron en el estudio ya que proporcionan información relevante en el mapeo de la diversidad ecogeográfica (Cuadro 1.6).

Cuadro 1.6. Número de especies y registros por especie obtenidos de la integración de 1,093 registros de presencia del género *Crataegus* L.

Núm.	Especie	Núm. de registros (%)	Núm.	Especie	Núm. de registros (%)
1	<i>C. mexicana</i> Moç. & Sessé ex DC. ¹	330 (30.2)	11	<i>C. aurescens</i> J. B. Phipps ¹	10 (0.92)
*	<i>Crataegus</i> sp.	322 (29.47)	12	<i>C. uniflora</i> Munchh. ¹	7 (0.65)
2	<i>C. rosei</i> Eggl. ¹	106 (9.7)	13	<i>C. serratissima</i> J. B. Phipps ¹	5 (0.46)
3	<i>C. pubescens</i> (Kunth) Steud [<i>Crataegus gracilior</i> J. B. Phipps] ¹	137 (12.54)	14	<i>C. tracyi</i> Ashe ex Eggl.	4 (0.37)
4	<i>C. baroussana</i> Eggl. ¹	44 (4.03)	15	<i>C. crus-galli</i> L.	4 (0.37)
5	<i>C. greggiana</i> Eggl. ¹	39 (3.57)	16	<i>C. grandifolia</i> J. B. Phipps ¹	5 (0.46)
6	<i>C. cuprina</i> J. B. Phipps ¹	20 (1.83)	17	<i>C. sulfurea</i> J. B. Phipps ¹	3 (0.28)
7	<i>C. tracyi</i> Ashe ex Eggl. ¹	19 (1.74)	18	<i>C. cuprea</i> Sarg.	1 (0.1)

Cuadro 1.6. Continuación...

Núm.	Especie	Núm. de registros (%)	Núm.	Especie	Núm. de registros (%)
8	<i>C. brachyacantha</i> Sarg. & Engelm.	12 (1.1)	19	<i>C. grandiflora</i> J.B. Phipps	1 (0.1)
9	<i>C. parryana</i> Eggl.	11 (1.01)	20	<i>C. johnstonii</i> J.B. Phipps ¹	1 (0.1)
10	<i>C. stipulosa</i> (Kunth) Steud. ¹	11 (1.01)	21	<i>C. nelsoni</i> Eggl. ¹	1 (0.1)

*No se considera una especie, sin embargo se han considerado los registros en la caracterización ecogeográfica.

¹Especies consideradas como aceptadas de acuerdo con la revisión taxonómica realizada por Núñez-Colín & Hernández-Martínez (2011).

Como resultado de la evaluación de la calidad de los datos de georreferenciación se obtuvo un valor promedio de 77 en un rango que parte de 32.5 hasta 100, en una escala de 0 a 100, siendo 100 la mejor calidad posible. De acuerdo con las sugerencias de Parra-Quijano *et al.* (2015), bajo la premisa de que la certeza de ocurrencia de una especie en un sitio específico es determinante para cualquier método que use datos de presencia o ausencia como materia prima (Otegui, Ariño, Encinas & Pando, 2013), se consideró que una entrada está correctamente georreferenciada cuando su valor de calidad fuera mayor a 60, lo cual cumple el 75 % de los datos analizados. Tomando como referencia este umbral, la tabla de datos consta de 814 registros, bajo los cuales se realizaron los análisis de ecogeografía (Figura 1.5).

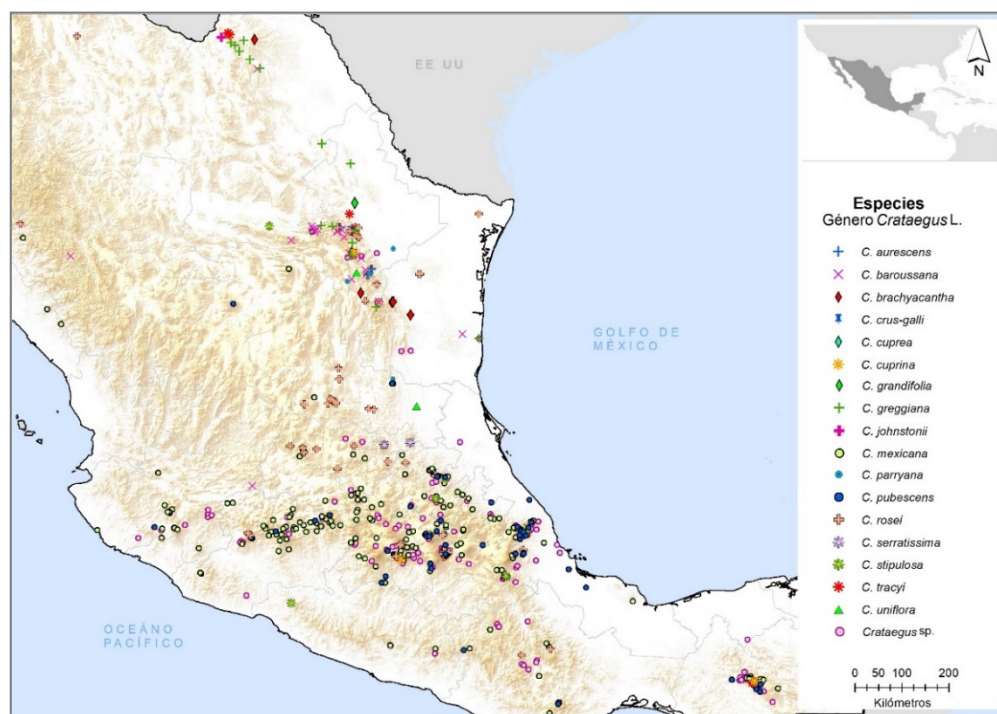


Figura 1.5. Distribución de 814 registros de *Crataegus* spp. con un valor de calidad mayor que 60.

El mapa de diversidad ecogeográfica resultante (mapa1) permite identificar que existen al menos tres puntos calientes (“hotspots”) de diversidad ecogeográfica, es decir, donde se concentra la mayor variabilidad de las características bioclimáticas, edáficas y geofísicas que definen la distribución geográfica de tejocote (Figura 1.6). El primero se ubica en el centro de México, en sitios específicos de la Ciudad de México (Cuajimalpa, Milpa Alta, Álvaro Obregón, Magdalena Contreras, Tlalpan y Tláhuac), Estado de México (Huixquilucan, Naucalpan, Metepec, Lerma, Villa de Allende, Donato Guerra, Atlacomulco y Jocotitlán), Michoacán (Zinapécuaro, Hidalgo, Queréndaro y Contepec), Puebla e Hidalgo. El segundo en el noreste del país, coincidiendo con la región de estudio de Phipps (1997), en los estados de Nuevo León (Santiago, Galeana y Santa Catarina) y Coahuila (Arteaga y Saltillo). El tercero en Chiapas (Tenejapa, Chamula, Zinacantán y Oxchuc). Sobresalen celdas en el estado de Jalisco (Mazamitla y Valle de Juárez). Estas zonas coinciden con las regiones de mayor diversidad identificadas por Núñez-Colín (2009) (índice de diversidad basado en el número de registro de presencia y de especies diferentes) y con las tres regiones ecoclimáticas reportadas por Núñez-Colín *et al.* (2008b), donde también sugiere que son las regiones donde se debe priorizar la recolección de germoplasma, aun cuando su estimador de diversidad pudiera estar subestimado en el sur de México debido a los pocos estudios sobre la taxonomía.

En estos sitios identificados, donde los niveles de diversidad ecogeográfica son máximos, lo que ocurre es una alta heterogeneidad de condiciones ambientales a las cuales las diferentes formas de *Crataegus* spp. se tienen que adaptar. Así como varios autores lo han argumentado (van Zonneveld *et al.*, 2012; Castañeda-Alvarez *et al.*, 2016), si la diversidad genética de tipo funcional es un reflejo de dicha diversidad adaptativa, entonces los puntos calientes de diversidad ecogeográfica serían zonas donde se podría encontrar diversidad genética no sólo en altos niveles, sino también singular.

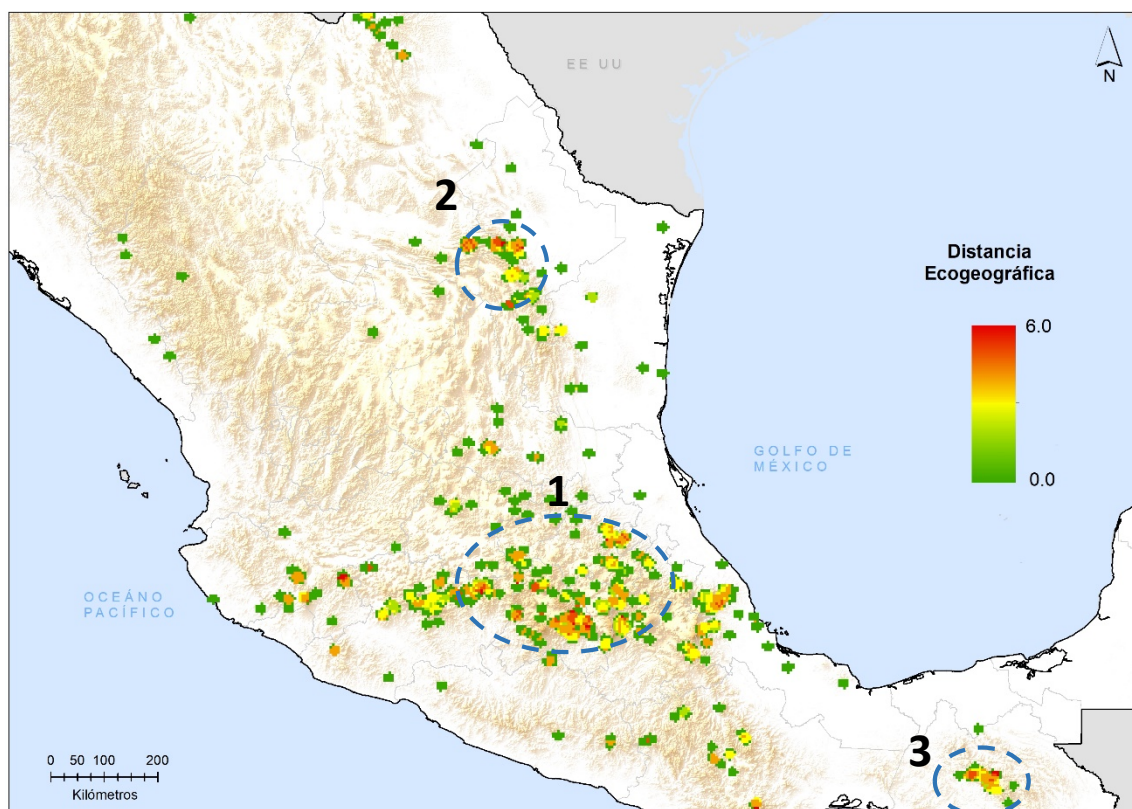


Figura 1.6. Tres puntos calientes de diversidad ecogeográfica (zonas de concentración de mayores valores promedio de distancias ecogeográficas) de *Crataegus* spp. en México, sobre 814 sitios de recolección o presencia con alta calidad de georreferenciación.

Lo anterior puede sugerir los sitios prioritarios para llevar a cabo misiones de recolección, ya que en estos sitios es donde probablemente se ubiquen genotipos con condiciones específicas de adaptación. Nuevas adaptaciones pueden ser clave para el cultivo de tejocote, en programas de mejoramiento enfocados a generar portainjertos y variedades para condiciones adversas y preparadas ante el reto del cambio climático (Guarino *et al.*, 2002; Jarvis, Lane & Hijmans, 2008a).

Finalmente se realizó una comparación de la diversidad fenotípica (semillas y endocarpios) (mapa 2) y la ecogeográfica (mapa 3) para los 57 genotipos de tejocote estudiados (Figura 1.7, Figura 1.8).

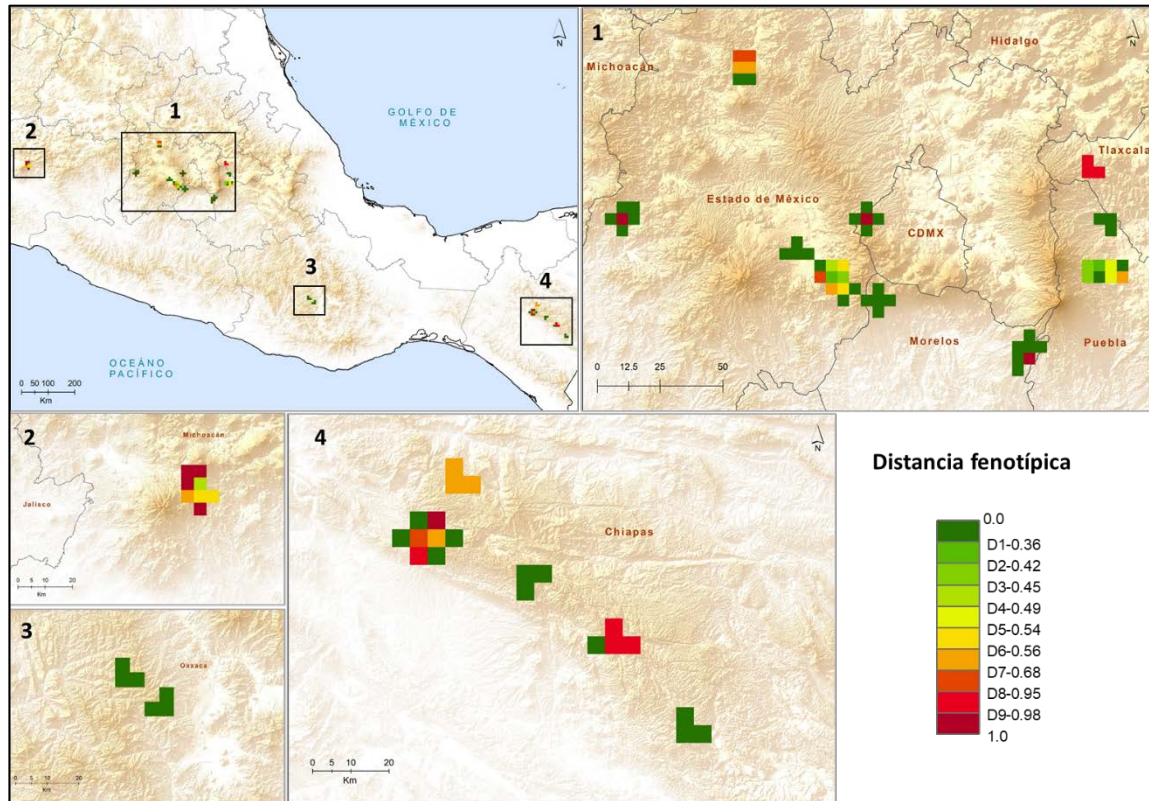


Figura 1.7. Diversidad fenotípica (semillas y endocarpios) de 57 genotipos de tejocote (*Crataegus* spp.) en 1) zona centro [Estado de México, Ciudad de México (CDMX), Puebla, Tlaxcala y Morelos], 2) zona occidente (Michoacán), 3) zona suroeste (Oaxaca) y 4) zona sur (Chiapas). Las celdas delimitadas por el corte del decil 9 (D9) son las que se consideran con la diversidad más alta.

Aunque la comparación de los mapas no ofrece una similitud absoluta entre zonas de alta diversidad, se pueden apreciar coincidencias que merecen ser resaltadas. En la zona 1 (Centro) se da una coincidencia de alta diversidad (realizando el corte en el decil 9), en tres celdas de tres (100 %), específicamente en los municipios de Villa de Allende, Donato Guerra y Huixquilucan en el Estado de México, Cuajimalpa en la Ciudad de México y, Tetela del Volcán y Zacualpan de Amilpas en Morelos. En las zonas 2 (Occidente) y 3 (Suroeste) no se ubicó coincidencia de celdas de alta diversidad. En la zona 4 (Sur) se identificó coincidencia de alta diversidad en una celda de dos (50 %), ubicada entre los municipios Zinacantán y Chamula en Chiapas. En general, coincide el 40 % de celdas de alta diversidad tanto fenotípica como ecogeográfica (cuatro celdas de 10) (Figura 1.9). Por lo tanto, se puede afirmar que la diversidad ecogeográfica y

la fenotípica de tejocote están relacionadas, que la distancia geográfica por sí misma no determina el grado de afinidad de los grupos de genotipos, ya que áreas muy separadas pueden tener niveles parecidos de diversidad, mientras que áreas muy cercanas pueden diferir en niveles de diversidad (Betancourt-Olvera et al., 2018).

Los resultados indican que la ecogeografía es una potente herramienta para utilizarse en la planeación del uso, el manejo y conservación de la diversidad de los recursos fitogenéticos para la alimentación y la agricultura.

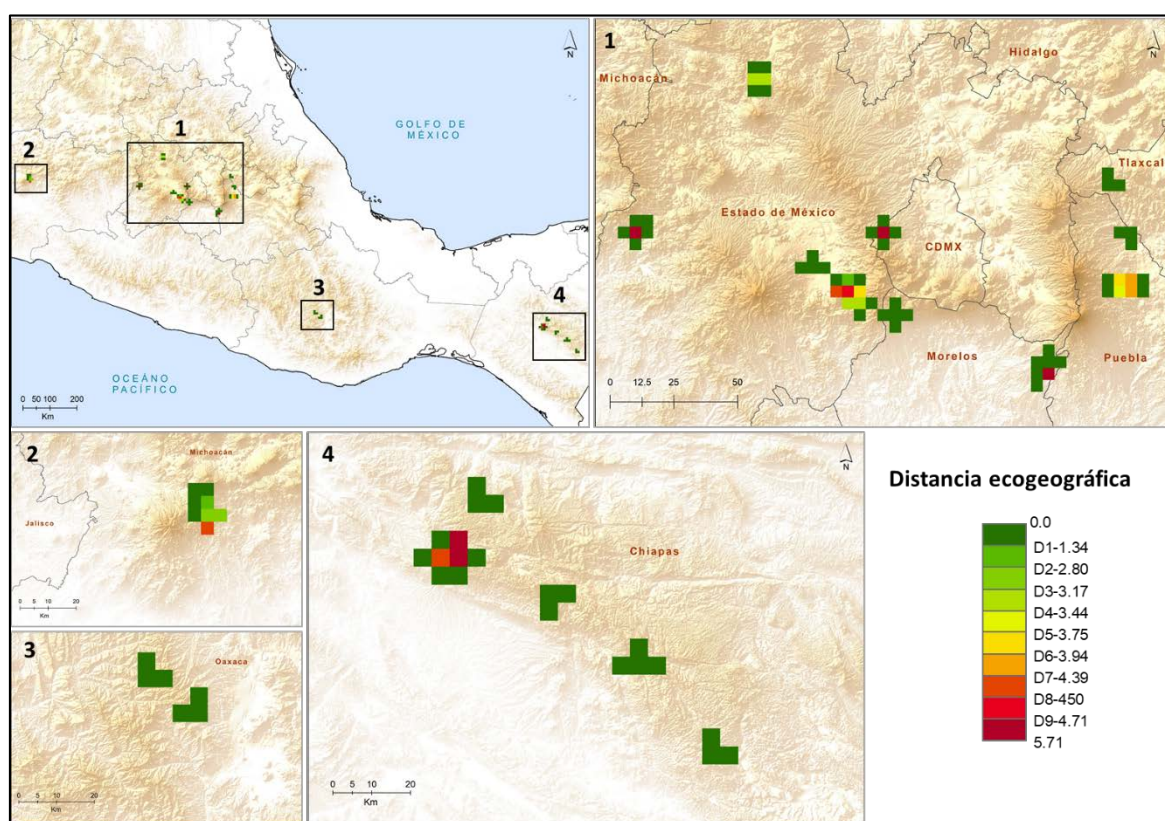


Figura 1.8. Diversidad ecogeográfica (adaptativa abiótica) de 57 genotipos de tejocote (*Crataegus* spp.) en 1) zona centro [Estado de México, Ciudad de México (CDMX), Puebla, Tlaxcala y Morelos], 2) zona occidente (Michoacán), 3) zona suroeste (Oaxaca) y 4) zona sur (Chiapas). Las celdas delimitadas por el corte del decil 9 (D9) son las que se consideran con la diversidad más alta.

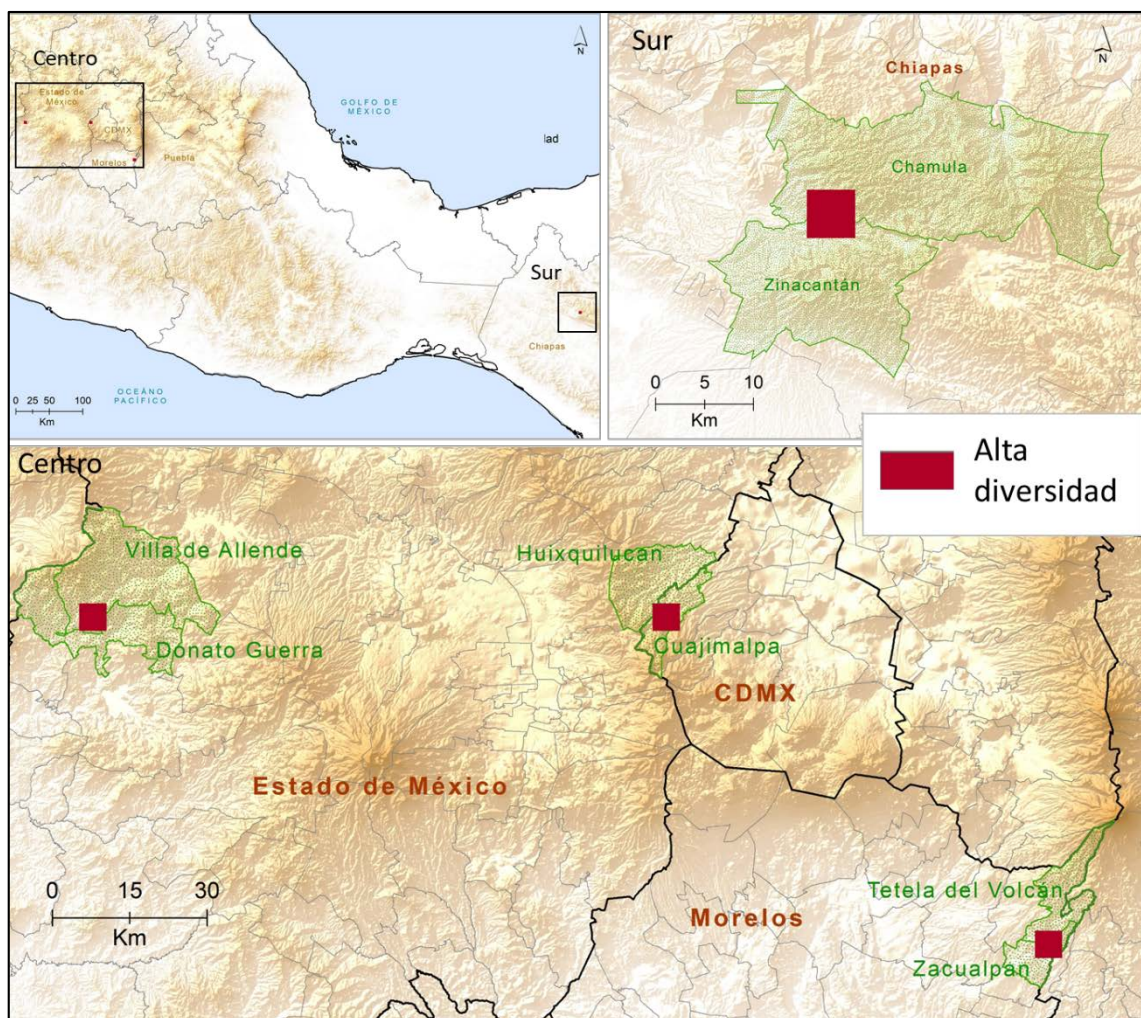


Figura 1.9. Coincidencia de alta diversidad fenotípica (semillas y endocarpios) y ecogeográfica (adaptativa abiótica) de 56 genotipos de *Crataegus* spp. en la zona centro y sur de México. Las celdas de mayor diversidad se ubicaron en el corte del decil 9.

Conclusiones

Las características de semillas y endocarpios permitieron identificar variabilidad entre los genotipos de tejocote (*Crataegus* spp.), pero aun cuando estas características tienen baja plasticidad fenotípica no es posible dar soporte de clasificaciones taxonómicas, ya que la agrupación obtenida no presenta alguna asociación clara entre especies. Las características relacionadas con el tamaño y forma del endocarpio, cavidad seminal y semilla, así como el número de

endocarpios por fruto fueron las más que contribuyeron para reconocer la variabilidad existente.

Nueve variables ecogeográficas con mayor importancia definen la distribución de las especies del género *Crataegus* L. en México, destacan la isothermalidad, precipitación, radiación solar y porcentaje de arcilla en el suelo. Estas variables permitieron identificar tres zonas donde se concentra la mayor variabilidad de condiciones adaptativas de tejocote, mismas que se proponen como prioritarias en las siguientes misiones de recolección, ya que es probable que ahí se encuentren los genotipos con condiciones de adaptación que hagan frente a las nuevas condiciones ocasionadas por el cambio climático, por ejemplo, genotipos con tolerancia a bajas precipitaciones y los expuestos a altos niveles de radiación solar.

La diversidad ecogeográfica del género *Crataegus* L. en México está asociada con la diversidad fenotípica, aunque las características de semillas y endocarpios no permiten identificar la pertenencia taxonómica ni geográfica de los genotipos caracterizados, al no presentar ningún patrón en los análisis de agrupamiento; pero sí proporcionan un patrón espacial de variabilidad relacionado con la variabilidad ecogeográfica. Esto a pesar de que los descriptores fenotípicos utilizados en la caracterización de semillas y endocarpios podrían no tener una relación directa con la adaptación a condiciones ambientales.

Se sugiere realizar estudios de representatividad ecogeográfica y la selección de una colección núcleo, con base en características fenotípicas, para la conservación *ex situ* de tejocote en México. Finalmente, se resalta la importancia de conocer la ubicación específica de los puntos calientes de diversidad, como elemento base para la comprensión de los patrones espaciales, en la formulación de estrategias efectivas y eficientes de conservación de la agrobiodiversidad.

Literatura citada

- Betancourt-Olvera, M., Nieto-Ángel, R., Urbano, B. and González-Andrés, F. (2018). Analysis of the biodiversity of hawthorn (*Crataegus* spp.) from the morphological, molecular, and ethnobotanical approaches, and implications for genetic resource conservation in scenery of increasing cultivation: the case of Mexico. *Genetic Resources and Crop Evolution*, 65(3), 897-916. doi: 10.1007/s10722-017-0583-4
- Borys, M. W. y Leszczyńska-Borys, H. (2001). *El potencial genético frutícola de la República Mexicana*. México: Fundación Salvador Sánchez Colín, CICTAMEX. 99 p.
- Castañeda-Álvarez, N. P., Khoury, C. K., Achicanoy, H. A., Bernau, V., Dempewolf, H., Eastwood, R. J., ... and Müller, J. V. (2016). Global conservation priorities for crop wild relatives. *Nature plants*, 2(4), 16022. doi: 10.1038/nplants.2016.22
- CBD. (2017). Agricultural biological diversity: review of phase I of the programme of work and adoption of a multi-year work programme. COP 5 Decision V/5. Recuperado de: <https://www.cbd.int/decision/cop/default.shtml?id=7147>
- Ceballos-Silva, A. and López-Blanco, J. (2003). Evaluating biophysical variables to identify suitable areas for oat in Central Mexico: A multi-criteria and GIS approach. *Agric. Ecosyst. Environ.*, 95, 371–377. doi: 10.1016/S0167-8809(02)00180-9
- Cutler, D. R., Edwards Jr., T. C., Beard, K. H., Cutler, A., Hess, K. T., Gibson, J. and Lawler, J. J. (2007). Random forests for classification in ecology. *Ecology*, 88(11), 2783-2792. doi: 10.1890/07-0539.1
- Eggleston, W. W. (1909). The *Crataegi* of Mexico and Central America. *Bulletin of the Torrey Botanical Club*, 36, 501-514.
- FAO, BIOVERSITY. (2012). FAO/Bioversity multi-crop Passport descriptors V.2. Recuperado de: http://www.bioversityinternational.org/index.php?id=19&user_bioversitypublications_pi1%5BshowUid%5D=6901
- FAO/IIASA/ISRIC/ISSCAS/JRC. (2012). Harmonized World Soil Database (version 1.2). FAO, Rome, Italy and IIASA, Laxenburg, Austria. Recuperado de: <http://webarchive.iiasa.ac.at/Research/LUC/External-World-soil-database/HTML/>
- GBIF. (2018). Global Biodiversity Information Facility. Recuperado de: <https://www.gbif.org/species/search> (Acceso: Agosto 2016).

- González-Andrés, F. and Ortiz, J.M. (1995). Seed morphology of *Cytisophyllum*, *Cytisus*, *Chamaecytisus* and *Genista* (Fabaceae: Genisteae) species for characterization. *Seed Sci. Technol.*, 23, 289–300.
- Guarino, L., Jarvis, A., Hijmans, R.J. and Maxted, N. (2002). Geographic Information Systems (GIS) and the conservation and use of plant genetic resources. In J. M. M. Engels, R. V. Ramanatha, A. H. D. Brown and M. T. Jacson (Eds.), *Managing plant genetic diversity* (pp. 387-404). Roma, Italia: International Plant Genetic Resources Institute (IPGRI). Recuperado de: http://www.diva-gis.org/docs/gis_pgr_conservation.pdf
- Hijmans, R. J., Cameron, S. E., Parra, J. L., Jones, P. G. and Jarvis, A. (2005). Very high resolution interpolated climate surfaces for global land areas. *Int. J. Climatol.*, 25, 1965-1978. doi: 10.1002/joc.1276
- Jarvis, A., Lane, A., Hijmans, R. J. (2008a). The effect of climate change on crop wild relatives. *Agric Ecosyst Environ*, 126, 13-23. doi: 10.1016/j.agee.2008.01.013
- Jarvis, A., Reuter, H. I., Nelson A. and Guevara E. (2008b). Hole-filled SRTM for the globe Version 4. Recuperado de: <http://srtm.csi.cgiar.org>.
- López-Sandoval, J. A., López-Mata, L., Cruz-Cárdenas, G., Vibrans, H., Vargas, O., y Martínez, M. (2015). Modelado de los factores ambientales que determinan la distribución de especies sinantrópicas de *Physalis*. *Botanical Sciences*, 93(4), 755-764. doi: 10.17129/botsci.192
- Nieto-Ángel, R. (2007). Colección, conservación y caracterización del tejocote (*Crataegus* spp.). En R. Nieto-Ángel (Ed). *Frutales Nativos, un Recurso Fitogenético de México* (pp: 25-107). Estado de México, México: Universidad Autónoma Chapingo.
- Nieto-Ángel, R., Ortiz, J., González-Andrés, F. and Borys, M. W. (1997). Endocarp morphology as an aid for discriminating wild and cultivated Mexican hawthorn. *Fruits*, 52, 317-324.
- Nieto-Ángel, R., Pérez-Ortega, S. A., Núñez-Colín, C. A., Martínez-Solis, J. and González-Andrés, F. (2009). Seed and endocarp traits as markers of the biodiversity of regional sources of germplasm of tejocote (*Crataegus* spp.) from Central and Sothern México. *Scientia Horticulturae*, 14(2), 177-184. doi: 10.1016/j.scienta.2009.01.034
- Núñez-Colín, C. A., Nieto-Ángel, R., Barrientos-Priego, A. F., Sahagún-Castellanos, J., Segura, S. and González-Andrés, F. (2008a). Variability of three regional sources of germplasm of tejocote (*Crataegus* spp.) from central and southern Mexico. *Genetic resources and crop evolution*, 55(8), 1159-1165. doi: 10.1007/s10722-008-9316-z

- Núñez-Colín, C. A., Nieto-Ángel, R., Barrientos-Priego, A. F., Segura, S., Sahagún-Castellanos, J. y González-Andrés, F. (2008b). Distribución y caracterización eco-climática del género *Crataegus* L. (Rosaceae, Subfam. Maloideae) en México. *Revista Chapingo Serie Horticultura*, 14(2), 177-184.
- Núñez-Colín, C. A. (2009). Áreas prioritarias para coleccionar germoplasma de (*Crataegus* L.) en México con base en la diversidad y riqueza de especies. *Agricultura Técnica en México*, 35(3), 333-338.
- Núñez-Colín, C. A., Sahagún-Castellanos, J., González-Andrés, F., Barrientos-Priego, A. F., Segura, S. and Nieto-Ángel, R. (2009). Identification of morphometric traits for screening of tejocote (*Crataegus* spp.) germplasm for better yield potential. *Fruits*, 64, 35-44.
- Núñez-Colín, C. A. y Hernández-Martínez, M. Á. (2011). La problemática en la taxonomía de los recursos genéticos de tejocote (*Crataegus* spp.) en México. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 2(1), 141-153.
- Otegui, J., Ariño, A. H., Encinas, M. A. and Pando, F. (2013). Assessing the primary data hosted by the Spanish node of the Global Biodiversity Information Facility (GBIF). *PLoS One*, 8(1), e55144. doi: 10.1371/journal.pone.0055144
- Parra-Quijano, M., Iriando, J. M., Torres, E. and Rosa, L. D. L. (2011a). Evaluation and validation of ecogeographical core collections using phenotypic data. *Crop Science*, 51(2), 694-703. doi: 10.2135/cropsci2010.05.0273
- Parra-Quijano, M., Iriando, J. M., De la Cruz, M. and Torres, E. (2011b). Strategies for the development of core collections based on ecogeographical data. *Crop Sci.*, 51(2), 656–666. doi: 10.2135/cropsci2010.04.0191
- Parra-Quijano, M., Torres, E., Iriando, J. M., López, F. and Molina, P. A. (2015). *CAPFITOGEN tools. User manual version 2.0*. International Treaty on Plant Genetic Resources for Food and Agriculture. FAO. Rome. 251 pp. Recuperado de: <http://www.capfitogen.net/en/>
- Phipps, J.B. (1997). *Monograph of Northern Mexican Crataegus (Rosaceae subfam. Maloideae)* (No. 15). BRIT Press.
- Phipps, J. B., O'Kennon, R. J. and Lance, R. W. (2003). Hawthorns and medlars. *Timber Press*, Portland, USA. 139 p.
- Pliscoff, P., Luebert, F., Hilger, H. H. and Guisan, A. (2014). Effects of alternative sets of climatic predictors on species distribution models and associated estimates of extinction risk: A test with plants in an arid environment. *Ecological Modelling*, 288, 166-177. doi: 10.1016/j.ecolmodel.2014.06.003

- Scheldeman, Xavier and van Zonneveld, Maarten. (2010). *Training Manual on Spatial Analysis of Plant Diversity and Distribution*. Bioversity International, Rome, Italy. 179 pp.
- Segura, S., Fresnedo, J., Mathuriau, C., López, J., Andrés, J. and A. Muratalla. (2018) accepted. The fruit-edible species in Mexico. *Genetic Resources and Crop Evolution*.
- SIAP. (2017). Sistema de Información Agroalimentaria y Pesquera. Recuperado de: <http://www.siap.gob.mx/cierre-de-la-produccion-agricola-por-cultivo/> (Acceso: Enero 2017).
- Steiner, J. J. (1999). Exploring the relationship of plant genotype and phenotype to ecogeography. *Linking genetic resources and geography: Emerging strategies for conserving and using crop biodiversity*, (linkinggeneticr), 39-50.
- Talent, N. and Dickinson, T. A. (2005). Polyploidy in *Crataegus* and *Mespilus* (Rosaceae, Maloideae): evolutionary inference from flow cytometry of nuclear DNA amounts. *Botany*, 83(10), 1268-1304.
- Talent, N. and Dickinson, T. A. (2007). Apomixis and hybridization in Rosaceae subtribe Pyrineae Dumort.: a new tool promises new insights. In E. Hörandl, U. Grossniklaus, P. J. Van Dijk and T. Sharbel (Eds). *Apomixis: evolution, mechanisms and perspectives* (301-316. pp.). Vienna, Austria: International Association for Plant Taxonomy and Koeltz Scientific Books.
- van Zonneveld, M., Scheldeman, X., Escribano, P., Viruel, M.A., Van Damme, P., et al. (2012). Mapping Genetic Diversity of Cherimoya (*Annona cherimola* Mill.): Application of Spatial Analysis for Conservation and Use of Plant Genetic Resources. *PLoS ONE* 7(1): e29845. doi:10.1371/journal.pone.0029845

Cuadro suplementario 1.1. Clasificación taxonómica y estado de origen de los 57 genotipos de tejocote (*Crataegus* spp.) utilizados para la caracterización de semillas y endocarpios.

Núm.	Clave	Especie	Localidad	Núm.	Clave	Especie	Localidad
1	CUAJ01*	<i>C. rosei</i>	CDMX	30	ZEMP01	<i>Crataegus</i> sp.	EdoMx
2	CUAJ02*	<i>C. rosei</i>	CDMX	31	CUMP01*	<i>C. rosei</i>	Mich
3	COMI01	<i>Crataegus</i> sp.	Chi	32	PATZ01*	<i>C. mexicana</i>	Mich
4	LARR01	<i>Crataegus</i> sp.	Chi	33	SJNP01*	<i>C. mexicana</i>	Mich
5	LARR02	<i>Crataegus</i> sp.	Chi	34	SJNP02*	<i>C. mexicana</i>	Mich
6	LARR03	<i>Crataegus</i> sp.	Chi	35	SJNP03*	<i>C. gracilior</i>	Mich
7	LARR04	<i>Crataegus</i> sp.	Chi	36	SJNP05*	<i>C. mexicana</i>	Mich
8	MIRA01	<i>Crataegus</i> sp.	Chi	37	HUIT01	<i>Crataegus</i> sp.	Mor
9	TEOP01	<i>Crataegus</i> sp.	Chi	38	TETE01*	<i>C. gracilior</i>	Mor
10	TEOP02	<i>Crataegus</i> sp.	Chi	39	TETE03*	<i>C. mexicana</i>	Mor
11	ZINA01	<i>Crataegus</i> sp.	Chi	40	GACH01	<i>Crataegus</i> sp.	Oax
12	ZINA02	<i>Crataegus</i> sp.	Chi	41	STAI01	<i>Crataegus</i> sp.	Oax
13	ZINA03	<i>Crataegus</i> sp.	Chi	42	ATEX01*	<i>C. gracilior</i>	Pue
14	ZINA04	<i>Crataegus</i> sp.	Chi	43	ATEX02*	<i>C. mexicana</i>	Pue
15	COAB02*	<i>C. gracilior</i>	EdoMx	44	ATEX03*	<i>C. gracilior</i>	Pue
16	COAB03*	<i>C. mexicana</i>	EdoMx	45	ATEX04*	<i>C. gracilior</i>	Pue
17	COAB04*	<i>C. mexicana</i>	EdoMx	46	ATEX05*	<i>C. rosei</i>	Pue
18	COAB05*	<i>C. gracilior</i>	EdoMx	47	ATEX06*	<i>C. rosei</i>	Pue
19	COAB06*	<i>C. mexicana</i>	EdoMx	48	ATEX07*	<i>C. mexicana</i>	Pue
20	COAB07*	<i>C. mexicana</i>	EdoMx	49	DOAR01*	<i>C. rosei</i>	Pue
21	COAB08*	<i>C. rosei</i>	EdoMx	50	DOAR02*	<i>C. mexicana</i>	Pue
22	COAB09*	<i>C. gracilior</i>	EdoMx	51	DOAR03*	<i>C. mexicana</i>	Pue
23	COAB10*	<i>C. rosei</i>	EdoMx	52	DOAR04*	<i>C. gracilior</i>	Pue
24	MEXI01*	<i>C. gracilior</i>	EdoMx	53	DOAR05*	<i>C. gracilior</i>	Pue
25	TIMI01	<i>Crataegus</i> sp.	EdoMx	54	TEXM01*	<i>C. gracilior</i>	Pue
26	TIMI02	<i>Crataegus</i> sp.	EdoMx	55	NANA01*	<i>C. rosei</i>	Tlax
27	TIMI03	<i>Crataegus</i> sp.	EdoMx	56	NANA02*	<i>C. rosei</i>	Tlax
28	VILL01	<i>Crataegus</i> sp.	EdoMx	57	UK01	<i>Crataegus</i> sp.	UK
29	VILL02	<i>Crataegus</i> sp.	EdoMx				

*Accesiones establecidas en el Banco de Germoplasma de la UACH. Ch (Chiapas), CDMX (Ciudad de México), EdoMx (Estado de México), Mich (Michoacán), Mor (Morelos), Oax (Oaxaca), Pue (Puebla), UK (Birmingham, Reino Unido).

Cuadro suplementario 1.2. Variables ecogeográficas utilizadas en la caracterización ecogeográfica de tejocote (*Crataegus* spp.). Los tres grupos de variables se encuentran dentro de la herramienta SelecVar de CAPFITOGEN 2.0 (Parra-Quijano *et al.*, 2015).

Código	Variable	Unidades
Bioclimáticas		
bio_1	Temperatura media anual	°C
bio_2	Rango medio de temperaturas diurnas	°C
bio_3	Isotermalidad (BIOCLIM2/BIOCLIM7)(*100)	
bio_4	Estacionalidad en la temperatura (desviación estándar*100)	
bio_5	Máxima temperatura del mes más cálido	°C
bio_6	Mínima temperatura del mes más frío	°C
bio_7	Rango de temperatura anual (BIOCLIM5-BIOCLIM6)	°C
bio_8	Temperatura media del cuarto más húmedo (3 meses más lluviosos)	°C
bio_9	Temperatura media del cuarto más seco (3 meses más secos)	°C
bio_10	Temperatura media del mes más cálido (3 meses más cálidos)	°C
bio_11	Temperatura media del cuarto más frío (3 meses más fríos)	°C
bio_12	Precipitación anual	mm
bio_13	Precipitación del mes más húmedo	mm
bio_14	Precipitación del mes más seco	mm
bio_15	Estacionalidad en la precipitación (coeficiente de variación)	mm

Cuadro suplementario 1.2. Continuación...

Código	Variable	Unidades
bio_16	Precipitación del cuarto más húmedo (3 meses más lluviosos)	mm
bio_17	Precipitación del cuarto más seco (3 meses más secos)	mm
bio_18	Precipitación del cuarto más cálido (3 más cálidos)	mm
bio_19	Precipitación del cuarto más frío (3 más fríos)	mm
Edáficas		
ref_depth	Profundidad referencia de la unidad de suelo	m
t_gravel	Contenido de grava en suelo superficial	%vol.
t_sand	Contenido de arena en suelo superficial	% peso
t_silt	Contenido de limo en suelo superficial	% peso
t_clay	Contenido de arcilla en suelo superficial	% peso
t_ref_bulk	Densidad aparente de referencia en suelo superficial	kg/dm ³
t_oc	Contenido de carbón orgánico en suelo superficial	% peso
t_ph_h2o	pH en suelo superficial en solución suelo-agua	-log(H ⁺)
t_cec_clay	Capacidad de intercambio catiónico de arcilla en suelo superficial	cmol/kg
t_cec_soil	Capacidad de intercambio catiónico en suelo superficial (general)	cmol/kg
t_bs	Saturación de bases en suelo superficial.	%
t_teb	Bases intercambiables totales en suelo superficial	cmol/kg
t_caco3	Carbonato de calcio en suelo superficial	% peso
t_caso4	Yesos en suelo superficial	%vol
t_esp	Sodicidad en suelo superficial	%
t_ece	Salinidad en suelo superficial	dS/m
s_gravel	Contenido de grava en subsuelo	%vol
s_sand	Contenido de arena en subsuelo	% peso
s_silt	Contenido de limo en subsuelo	% peso
s_clay	Contenido de arcilla en subsuelo	% peso
s_ref_bulk	Densidad aparente de referencia en subsuelo	kg/dm ³
s_oc	Contenido de carbón orgánico en subsuelo	% peso
s_ph_h2o	pH en subsuelo en solución suelo-agua	-log(H ⁺)
s_cec_clay	Capacidad de intercambio catiónico de arcilla en subsuelo	cmol/kg
s_cec_soil	Capacidad de intercambio catiónico en subsuelo (general)	cmol/kg
s_bs	Saturación de bases en subsuelo.	%
s_teb	Bases intercambiables totales en subsuelo	cmol/kg
s_caco3	Carbonato de calcio en subsuelo	% peso
s_caso4	Yesos en subsuelo	% peso
s_esp	Sodicidad en subsuelo	%
s_ece	Salinidad en subsuelo	dS/m
Geofísicas		
alt	Elevación. Metros sobre el nivel del mar	msnm
slope	Pendiente (en grados) de la superficie del terreno	°
aspect	Orientación (en grados) de la superficie del terreno	°
northness	Norticidad. 1 si la orientación tiende al norte, -1 al sur	
eastness	Esticidad. 1 si la orientación tiende al este, -1 oeste	
POINT_X	Longitud	°
POINT_Y	Latitud	°
srad_1	Radiación solar del mes de enero	W/m ²
srad_2	Radiación solar del mes de febrero	W/m ²
srad_3	Radiación solar del mes de marzo	W/m ²
srad_4	Radiación solar del mes de abril	W/m ²
srad_5	Radiación solar del mes de mayo	W/m ²
srad_6	Radiación solar del mes de junio	W/m ²
srad_7	Radiación solar del mes de julio	W/m ²
srad_8	Radiación solar del mes de agosto	W/m ²
srad_9	Radiación solar del mes de septiembre	W/m ²
srad_10	Radiación solar del mes de octubre	W/m ²
srad_11	Radiación solar del mes de noviembre	W/m ²
srad_12	Radiación solar del mes de diciembre	W/m ²
wind_1	Velocidad del viento del mes de enero	km/h

Cuadro suplementario 1.2. Continuación...

Código	Variable	Unidades
wind_2	Velocidad del viento del mes de febrero	km/h
wind_3	Velocidad del viento del mes de marzo	km/h
wind_4	Velocidad del viento del mes de abril	km/h
wind_5	Velocidad del viento del mes de mayo	km/h
wind_6	Velocidad del viento del mes de junio	km/h
wind_7	Velocidad del viento del mes de julio	km/h
wind_8	Velocidad del viento del mes de agosto	km/h
wind_9	Velocidad del viento del mes de septiembre	km/h
wind_10	Velocidad del viento del mes de octubre	km/h
wind_11	Velocidad del viento del mes de noviembre	km/h
wind_12	Velocidad del viento del mes de diciembre	km/h

CAPÍTULO III

PRIORIZACIÓN DE ÁREAS PARA LA CONSERVACIÓN *IN SITU* DE LA DIVERSIDAD DE TEJOCOTE (*Crataegus* spp.) EN MÉXICO

Resumen

La conservación de la diversidad de las plantas es de importancia crítica debido a los beneficios directos que la humanidad obtiene de la explotación de cultivos agrícolas y de sus potenciales usos. La alternativa de conservación más común para los recursos fitogenéticos para alimentación y agricultura ha sido la *ex situ*, usualmente en bancos de germoplasma, mientras la conservación *in situ*, principalmente en áreas protegidas, se ha dejado más para la conservación de formas silvestres. Por ello se ha llamado la atención sobre la necesidad de realizar acciones complementarias *ex situ* e *in situ*, incluyendo la conservación en finca como una estrategia dinámica que permita la evolución natural del germoplasma conservado. Debido a los altos costos que implica, así como a las limitaciones de recursos tanto económicos como humanos, la conservación *in situ* debe centrarse en áreas donde se obtengan los mayores beneficios y los esfuerzos invertidos deriven en mejores impactos. Por ello, el objetivo de este estudio fue identificar áreas prioritarias para la conservación *in situ* de la diversidad de tejocote silvestre (*Crataegus* spp.) y cultivado (*Crataegus mexicana*) a través de un Análisis Espacial Multicriterio. Por medio de encuestas a expertos se obtuvo que 22 criterios son importantes para la conservación de tejocote silvestre y 23 criterios para el cultivado. El cálculo de los pesos de los criterios se realizó por el Proceso Analítico Jerárquico y por encuestas a expertos. Los resultados arrojaron que riqueza de especies, diversidad fenotípica y ecogeográfica, así como áreas no consideradas como protegidas fueron los criterios de mayor importancia para la definición de áreas prioritarias para la conservación *in situ* de tejocote silvestre, las cuales se ubicaron particularmente en Chiapas, Estado de México y Morelos. La determinación de áreas prioritarias para la conservación *in situ* de tejocote cultivado fue dada por criterios como el número de variedades cultivadas, número de usos, diversidad fenotípica, diversidad ecogeográfica y áreas con agricultura temporal. Estas áreas se localizaron principalmente en el estado de Puebla. Del presente estudio surge como propuesta una lista de áreas prioritarias para la conservación *in situ* de tejocote, tanto cultivado como silvestre, la cantidad de dichas áreas a incluir en un futuro programa de conservación dependería de la disponibilidad de recursos económicos.

Palabras clave: Análisis Espacial Multicriterio, áreas prioritarias, tejocote silvestre, tejocote cultivado, *Crataegus mexicana*

PRIORITIZATION OF AREAS FOR THE *IN SITU* CONSERVATION OF THE DIVERSITY OF HAWTHORN (*Crataegus* spp.) IN MEXICO

Abstract

The conservation of the diversity of plants is of critical importance due to the direct benefits that humanity derives from the exploitation of agricultural crops and their potential uses. Cultivated and domesticated plants are conserved mainly *ex situ* in genebanks, and the wild ones are conserved *in situ* in protected areas, both strategies are complementary, suggesting that all plants can be conserved outside and within their habitats. Due to the high costs involved, as well as the limitations of both economic and human resources, *in situ* conservation should focus on areas where the greatest benefits are obtained, and the efforts invested lead to better impacts. Therefore, the objective of this study was to identify priority areas for *in situ* conservation of the diversity of wild (*Crataegus* spp.) and cultivated hawthorn (*Crataegus mexicana*) by a Multicriterial Spatial Analysis. By means of surveys to experts it was obtained that 22 criteria are important for the conservation of wild hawthorn and 23 criteria for the cultivated one. The weights of the criteria were calculated by the Analytic Hierarchy Process and expert surveys. The results showed that species richness, phenotypic and ecogeographic diversity were the most important criteria for the definition of priority areas for *in situ* conservation of wild hawthorn, which were located particularly in Chiapas, State of Mexico and Morelos. The determination of priority areas for the *in situ* conservation of cultivated tejocote was given by the number of varieties cultivated, number of uses, phenotypic diversity, ecogeographic diversity and areas with rainfed agriculture. The selection of these areas depends to a great extent on the resources that could be destined for their conservation.

Keywords: Spatial Multi-criteria Analysis, priority areas, wild hawthorn, cultivated hawthorn, *Crataegus mexicana*, MCA.

Introducción

Se ha resaltado que la biodiversidad contribuye a la productividad, sostenibilidad y estabilidad de los sistemas agrícolas, también se ha manifestado la preocupación por su acelerada pérdida, e incluso se ha señalado una extinción importante de especies por las consecuencias del cambio climático y de uso suelo (Lobo & Medina, 2009). Por ello, es importante el diseño de estrategias y programas para su conservación y manejo (Bellon *et al.*, 2009; Koleff *et al.*, 2009). Maxted, Guarino, Myer & Chiwona (2002) señalaron que la conservación de la diversidad de plantas es de importancia crítica debido a los beneficios directos que la humanidad obtiene de la explotación de cultivos agrícolas y hortícolas mejorados, así como por el potencial del desarrollo de nuevas medicinas y otros productos, y por el papel que juegan los taxones vegetales en el funcionamiento de los ecosistemas naturales.

La conservación de especies de plantas domesticadas y cultivadas se ha realizado principalmente de manera *ex situ* en bancos de germoplasma, en menor proporción en fincas de los agricultores de manera *in situ*, y las silvestres en reservas naturales primordialmente (Lobo & Medina 2009; FAO, 2010). Ambas estrategias no son exclusivas sino complementarias (Maxted, Ford-Lloyd & Hawkes, 1997).

Debido a los altos costos que implica la conservación de grandes superficies, así como a las limitaciones de recursos tanto económicos como humanos, la conservación *in situ* debe centrarse en áreas donde se obtengan los mayores beneficios y los esfuerzos invertidos deriven en mejores impactos (Geneletti, Orsi, Lanni & Newton, 2011; Chávez, González & Hernández, 2015). Para garantizar una conservación eficaz se deben conocer y dar prioridad a los lugares donde se debe actuar en primera instancia. Para ello, una herramienta valiosa para orientar y optimizar los esfuerzos del estudio, conservación y aprovechamiento sustentable de los recursos naturales es la identificación de áreas prioritarias para esos fines (Ceballos *et al.*, 2009; Koleff *et al.*, 2009; Chávez *et al.*, 2015).

La discriminación de áreas prioritarias para la conservación implica resolver un problema de optimización, donde las áreas seleccionadas deben ser las más viables en términos económicos, de recursos humanos y de infraestructura para establecer los programas y estrategias requeridas para su permanencia y manejo (Arriaga *et al.*, 2009). El objetivo de la planificación de conservación sistemática es proporcionar un marco estructurado, científicamente defendible y efectivo para la protección de la biodiversidad (Regan, Davis, Andelman, Widyanata & Freese, 2007). Los proyectos de planeación espacial y la asignación de zonas para la conservación deben considerar los aspectos sociales, económicos, culturales, ecológicos, geográficos y biológicos (biodiversidad, grupos de especies, tipos de hábitat y clases ambientales) (Geneletti, 2004; Moffett & Sarkar, 2006; Bottero, Comino, Duriavig, Ferretti & Pomarico, 2013).

En México se han desarrollado diferentes aproximaciones y metodologías para la identificación de áreas prioritarias para la conservación de la diversidad biológica con diferentes enfoques. Estas metodologías van desde modelos computarizados y métodos de optimización hasta métodos específicos y modelos estadísticos espaciales (Ceballos *et al.*, 2009; Koleff & Urquiza, 2011; March, Carvajal, Vidal, San Román & Ruiz, 2009; Chávez *et al.*, 2015). También se han puesto en marcha acciones de conservación *in situ* específicamente en maíz (CONANP, 2016), pero la selección de los sitios de conservación no se basó en una planeación sistemática espacial.

La complejidad del medio natural por la intervención de múltiples variables de carácter interactivo y su respuesta a la acción humana, ha encontrado en el Análisis Multi-Criterio (MCA, por sus siglas en inglés) un modelo teórico de gran operatividad (Santos, 1997; Moffett & Sarkar, 2006). El MCA como herramienta útil en la toma de decisiones, permite seleccionar, analizar y combinar un sinnúmero de criterios e indicadores para generar alternativas de solución jerarquizadas, de acuerdo con el objetivo planteado. Una modalidad del MCA es la incorporación de la opinión de expertos o personas interesadas en el tema, quienes asignan pesos o ponderaciones a los criterios que indicarán la

importancia relativa entre los mismos, lo que introduce subjetividad al método (Dykstra, 1984). Las técnicas de MCA se han utilizado en múltiples estudios relacionados con la conservación de la biodiversidad y la definición de áreas aptas, además facilita la toma de decisiones sobre donde enfocar esfuerzos de conservación *in situ*, donde se puede combinar información de índole agronómica, ecológica, socio-cultural, económica, etc. La combinación de las técnicas espaciales de MCA y álgebra de mapas constituyen la metodología más completa, eficiente y económica para aplicarse a escalas regional y local para la identificación de áreas prioritarias (Chávez *et al*, 2015). Por su parte, la conjunción entre los Sistemas de Información Geográfica (GIS) y el MCA ha resultado altamente fructífera en el tratamiento y resolución de problemas medioambientales y territoriales (Santos, 1997).

El uso de MCA para la conservación de biodiversidad marina o animal ha sido común (Brown *et al.*, 2001; Villa, Tunesi & Agardy, 2002; Wood & Dragicevic, 2007; Castellini *et al.*, 2012). En algunos estudios, los MCA se han usado sobre casos multi-específicos donde se han involucrado algunas especies vegetales (van der Horst & Gimona, 2005; Sarkar *et al.*, 2006). Sin embargo, no hay reporte alguno de la utilización de MCA para el caso de agrobiodiversidad, excepto una tesis doctoral donde se realizó la determinación de áreas prioritarias de conservación de maíz en la zona de la Sierra de Ecuador (zona andina con una altitud mayor a los 1600 msnm) (Tapia, 2015). Hasta el presente, no hay reporte de la aplicación de MCA sobre agrobiodiversidad en México.

Por otro lado, el género *Crataegus* L. se distribuye en diferentes regiones templadas del mundo, se han descrito de 140 a 200 especies de las cuales aproximadamente dos terceras partes se encuentran en Norteamérica y el resto en Euro-Asia (Phipps, O'Kennon & Lance, 2003). En México se han reportado aproximadamente 15 especies (Phipps, 1997; Núñez-Colín & Hernández-Martínez, 2011), de manera común se conocen como “tejocote”, término que deriva del náhuatl *texocotl* que significa “fruta dura” (Cabrera, 1992). Se distribuyen principalmente de forma silvestre, en las zonas montañosas de la

Sierra Madre Oriental, Sierra Madre Occidental y de la Sierra Madre del Sur, así como en el Eje Neovolcánico (Núñez-Colín, 2009). Para los mexicanos el tejocote representa un valor económico y cultural importante en la época decembrina y Día de Muertos. Es consumido como fruto en fresco, en bebidas y dulces artesanales, tiene propiedades medicinales, valor nutrimental, ecológico, como portainjerto y en la industria alimentaria como fuente de pectinas y vitamina C (Nieto-Ángel, 2007).

A pesar de considerarse un frutal subutilizado y de recolección (Nieto-Ángel, 2007), se han documentado plantaciones comerciales en el estado de Puebla con más de 800 ha para el año 2016, principalmente de *C. mexicana* (SIAP, 2018). Los estudios de variabilidad de tejocote han permitido el registro de cinco variedades de uso común como iniciativa de la protección legal de la diversidad de tejocote existente en México (SNICS, 2012). No obstante, estos “cultivares” se han introducido como nuevas variedades en las plantaciones ya que presentan características deseables por los productores. Actualmente, se mantienen aproximadamente 160 accesiones de 11 especies en el Banco de Germoplasma de Tejocote de la Universidad Autónoma Chapingo, como estrategia de conservación *ex situ* del género *Crataegus* L., ya que la superficie con nuevas plantaciones y la actividad comercial del tejocote están incrementando, por lo que su diversidad se encuentra en riesgo de reducción (Betancourt-Olvera, Nieto-Ángel, Urbano & González-Andrés, 2018).

En este sentido, el objetivo de este trabajo fue identificar áreas prioritarias para la conservación *in situ* de la diversidad de tejocote (*Crataegus* spp.), a través de la metodología MCA como herramienta para orientar y optimizar esfuerzos en el diseño de políticas públicas, para la inversión en la implementación de estrategias de manejo y conservación de los recursos genéticos de tejocote.

Materiales y métodos

Se realizó un Análisis Multi-Criterio de tipo espacial para 1) *C. mexicana* como especie cultivada, documentada en plantaciones de tejocote en México, específicamente ubicadas en el estado de Puebla (en adelante se refiere a este análisis como “Cultivados”). 2) Todas las especies de *Crataegus* L., excepto *C. mexicana* cultivada (En adelante se denominan “Silvestres”).

Área de estudio

El área de estudio para ambos casos fue definida con base en la distribución geográfica conocida de las especies consideradas, con un área “buffer” o de amortiguamiento de 20 km a partir de cada punto de presencia. Casi 280 mil km², o lo que es lo mismo 10,955 celdas con una resolución de 2.5 arc-min (5 x 5 km en el Ecuador) para silvestres y con 150 mil km² (6,007 celdas) para *C. mexicana*, que representan el 13 % y el 8 % del territorio nacional, respectivamente (Figura 2.1).

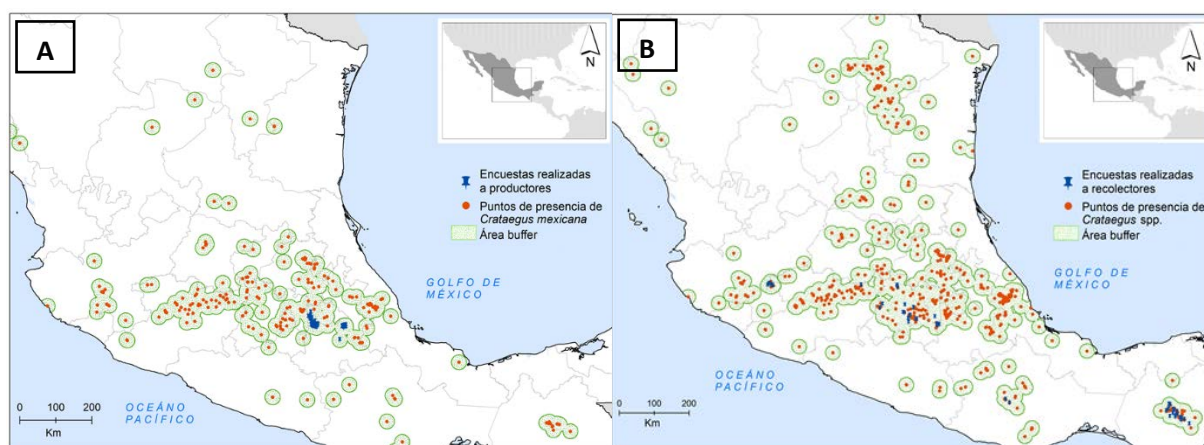


Figura 2.1. A. Área de estudio, distribución geográfica y sitios donde se aplicó la encuesta a productores de tejocote cultivado (*C. mexicana*). **B.** Área de estudio, distribución geográfica y sitios donde se aplicó la encuesta a recolectores de tejocote silvestre (*Crataegus* spp.).

Recopilación y mapeo de criterios

Con apoyo de los integrantes de la Red Tejocote (Ramírez *et al.*, 2017) se elaboró un listado de los criterios que deben considerarse en la definición de áreas para la conservación *in situ* de tejocotes silvestres y *C. mexicana*, lográndose recopilar 28 y 34 criterios, respectivamente. Los criterios fueron clasificados como biológicos, sociales, económicos, ecológicos y culturales (Cuadro suplementario 2.1). La información de los criterios culturales se obtuvo de encuestas aplicadas en el año 2016 a productores (56 encuestas) y recolectores (48 encuestas) de tejocote (Figura 2.1). Para el resto de los criterios se recopiló información de diferentes fuentes, a partir de la cual se generaron los mapas ráster utilizando como máscara un mapa de las celdas donde se ha registrado la ocurrencia de *Crataegus* spp. (cultivado y silvestre) y las áreas de amortiguamiento adyacentes. De esta manera se configuró un SIG con los mapas recortados de criterios en formato ráster que contenían la información original de las fuentes de donde provenían los criterios (Cuadro suplementario 2.1). Dichos mapas ráster tenían una misma cobertura geográfica, resolución y sistema de coordenadas (WGS-84) de tal manera que podrían ser sobrepuestos espacialmente y ser objeto de operaciones matemáticas.

Selección de criterios y reclasificación de escalas

Para identificar cuáles criterios serían importantes y de qué manera influirían en la definición de áreas para la conservación de tejocote, se elaboró y aplicó una encuesta en línea a expertos en el estudio, conservación, manejo y uso de los recursos genéticos de *Crataegus* spp., de frutales y de la agrobiodiversidad en general (Silvestres: <http://goo.gl/VdRFBW> y Cultivados: <https://goo.gl/CDfp7y>). El grupo de expertos estuvo formado por académicos, productores y autoridades gubernamentales que coordinan acciones de conservación de la biodiversidad y de recursos fitogenéticos. La estructura de la encuesta solicitaba que por cada criterio el experto decidiera si era o no importante para la conservación *in situ* de *Crataegus* spp. Si la respuesta sobre la importancia del criterio era negativa, la encuesta se dirigía al siguiente criterio. Si la respuesta era positiva, se le pedía

que calificara la importancia del criterio en una escala de 1 a 10, siendo 1 la menor y 10 la mayor importancia. Finalmente se solicitó a los expertos que indicaran para cada criterio considerado como importante, cuál estado sería el favorable para la conservación. Por ejemplo, para el criterio “Riqueza de especies” se tienen dos estados, alta o baja riqueza, entonces el experto debía indicar cuál de los dos es el más apropiado, según su conocimiento, para realizar conservación *in situ*.

Posteriormente, se realizó un filtro inicial de criterios donde fueron eliminados aquellos que obtuvieron más del 50 % de respuestas de los expertos como “Criterio no importante”, y los que tuvieron un empate entre los dos posibles estados considerados como favorables para la conservación.

Los valores de los mapas de los criterios originales no eliminados fueron reclasificados con base en la información de los expertos sobre el estado favorable para la conservación, usando una escala de 1 a 100, donde al estado favorable se le asignaban valores altos (cerca o iguales a 100). Para esta transformación se utilizó la información de la fuente original, donde la distribución de estados o posibles respuestas de criterio, ya sean cualitativos o cuantitativos, se convirtieron en nuevos valores finales, todos numéricos y crecientes en el sentido favorable para la conservación. Por ejemplo, el criterio cualitativo “Presencia indígena” tenía cuatro estados (sin población, baja, media y fuerte), entonces a cada estado se le asignó un valor en la escala de 0 a 100, donde 0 corresponde a “sin población”, 25 a “baja”, 75 a “media” y 100 a “alta”, esto bajo la premisa de que un nivel alto de población indígena es favorable para la conservación *in situ* de tejocote. El criterio cuantitativo “Porcentaje de la población en condición de pobreza” presentó valores de 8 a 97. CONABIO (2014b) sugiere agrupar estos porcentajes en cinco intervalos. En este caso, los valores de “8 a 51” corresponden a 20, “52 a 64” a 40, “65 a 76” a 60, “77 a 85” a 80 y “86 a 97” corresponden a 100. Para los criterios bimodales (con dos posibles respuestas o estados), la reclasificación se limitó a 0 y 100 o viceversa, dependiente del estado favorable para la conservación de cada criterio.

Cálculo de pesos y conjuntos de criterios de alta importancia

En un MCA los criterios se tienden a unificar mediante una suma. La forma más sencilla de sumar es asumiendo que cada criterio-mapa tiene el mismo peso. Se puede incrementar la complejidad mediante el uso de sumas ponderadas, asignando mayor o menor peso a los criterios que se suman. En el presente estudio, el cálculo de pesos se realizó por dos métodos: 1) Sistema Expertos (EXP), usando la importancia que asignaron los expertos a cada criterio en una escala de 1 a 10. Para ello, una vez concentradas las calificaciones de las encuestas, se construyó una matriz normalizada (dividiendo cada calificación entre la suma de calificaciones para cada criterio), se obtuvo el promedio ponderado y finalmente, se calculó el peso para cada criterio. 2) Proceso Analítico Jerárquico (AHP), basado en comparaciones pareadas de los criterios para estructurar un proceso de toma de decisiones en un escenario afectado por múltiples factores. En las comparaciones pareadas realizadas para este estudio participaron dos coordinadores de la Red Tejocote (Ramírez *et al.*, 2017) bajo la escala de Saaty (Saaty, 2003). La matriz obtenida se normalizó y se obtuvieron las ponderaciones de los pesos para cada criterio.

Se determinaron dos conjuntos de criterios, calculando el percentil 50 de la distribución de puntuaciones de importancia promedio. Aquellos criterios con puntuación promedio de importancia dada por expertos y que se encontraban por encima del valor percentil 50, conformaron el conjunto de criterios de alta importancia (CAI-EXP). Con el mismo procedimiento, pero usando las puntuaciones de importancia promedio obtenidas por AHP, se generó el otro conjunto de criterios de alta importancia (CAI-AHP).

Suma de criterios y mapas de áreas prioritarias

Con la finalidad de comparar diferentes escenarios para la identificación de áreas prioritarias se definieron siete combinaciones de mapas respuesta de priorización basados en el conjunto de criterios involucrados y en la estrategia de comparación: 1. Todos los criterios con el mismo peso (E_1), donde todos los

criterios son igualmente importantes (suma simple). 2. Todos los criterios con pesos asignados por expertos (E₂). 3. Todos los criterios con pesos asignados por AHP (E₃). 4. CAI-EXP con el mismo peso (E₄). 5. CAI-EXP con los pesos asignados por expertos (E₅). 6. CAI-AHP con el mismo peso (E₆). 7. CAI-AHP con los pesos asignados por AHP (E₇) (Figura 2.2).

La combinación de los mapas criterio para obtener el mapa de prioridad, se realizó con la siguiente fórmula:

$$P_j = \sum_{i=1}^n W_i X_j$$

Donde, P_j representa valor de prioridad de la celda j , W_i representa el peso del criterio i , X_j representa el valor reclasificado de cada criterio para la celda j , y n representa el número total de criterios.

Identificación de áreas prioritarias y recomendaciones

Los valores de los mapas finales obtenidos por las diferentes opciones de sumatoria de criterios se reclasificaron en una escala de 0 a 100, intervalo para expresar la prioridad de conservación (valores cercanos a 0 para baja prioridad y cercanos a 100 para alta prioridad). Se consideraron como prioritarias las áreas con valores comprendidos entre 85 y 100. Este intervalo fue utilizado anteriormente por Tobón, Koleff, Urquiza-Haas & Méndez (2016) donde aplicaron una metodología semejante a este trabajo en el contexto de la planeación sistemática de la restauración. Se identificaron las áreas obtenidas para cada escenario, se compararon y se hicieron las recomendaciones para tomadores de decisiones sobre conservación de la agrobiodiversidad en México.

Todas las acciones de rasterización y edición de mapas se realizaron con operaciones básicas de SIG (buffering, reclass, rescale, map algebra, etc.) en ArcGIS 10.2.2. (ESRI, 2014).

El proceso para la definición de áreas prioritarias para la conservación de tejocote se resume en cinco etapas generales (Figura 2.2).

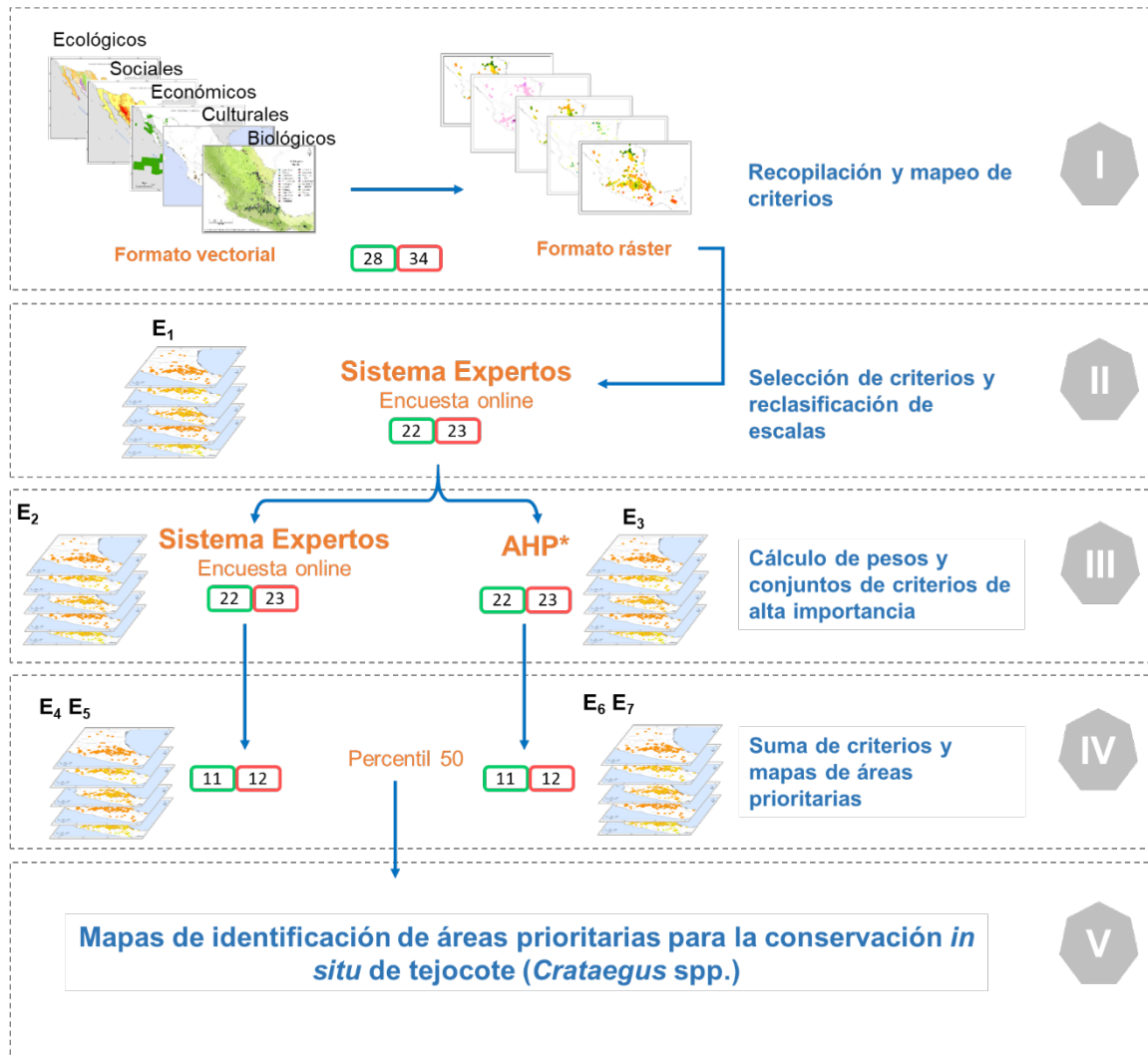


Figura 2.2. Proceso general para la identificación de áreas prioritarias para la conservación *in situ* de tejocote silvestre (*Crataegus* spp.) y cultivado (*C. mexicana*) en México. Los recuadros verde y rojo indican el número de criterios considerados en cada etapa tanto para silvestres y para cultivados en cada etapa del proceso, respectivamente. E₁, E₂, E₃, E₄, E₅, E₆ y E₇ representan diferentes sumatorias de mapas y escenarios de comparación.

Resultados y discusión

Se obtuvieron 17 respuestas de la encuesta en línea, correspondientes a 12 académicos, dos autoridades gubernamentales, dos productores y un

comerciante de productos de tejocote. Aunque puede parecer un número reducido, esto coincide con el número de expertos reunidos (19) para realizar la propuesta de prioridades de restauración de ecosistemas en México (Tobón *et al.*, 2016).

Criterios importantes para la conservación *in situ* de tejocote

Con las respuestas de los expertos se seleccionaron 22 criterios importantes (80 % del total) para la conservación *in situ* de tejocote silvestre, por tener más del 50 % de respuestas de los expertos como “Criterio importante” y se determinó para cada uno su estado favorable para la conservación (Cuadro 2.1). Los tres criterios más importantes resultaron ser del tipo biológico (riqueza de especies, diversidad fenotípica y ecogeográfica), exactamente los mismos obtenidos por AHP. Esto es congruente con Bonn & Gaston (2005) y Margules *et al.* (2002) que señalaron que las áreas prioritarias para la conservación no sólo deben estar representados por los grupos de especies, sino también por la diversidad ambiental para capturar la diversidad de especies que ocurren correlacionadas con características ambientales específicas. Se resalta también la riqueza de especies como uno de los criterios más empleados en la planeación de la conservación sistemática, ya que es uno de los indicadores de fácil estimación e interpretación, aunque este parámetro por sí solo no indica adecuadamente las prioridades de conservación (Koleff & Urquiza-Haas, 2011). Por el contrario, los criterios con los pesos más bajos asignados por expertos fueron áreas con matorrales y pastizales submontanos, densidad de población y porcentaje de la población ocupada en la actividad agropecuaria. Para AHP fueron el número de nombres comunes y su recolección para venta (Cuadro 2.1).

Para tejocote cultivado se seleccionaron 23 criterios (70 % del total propuesto) por tener más del 50 % de respuestas de los expertos como “Criterio importante” (Cuadro 2.2). Los tres criterios más importantes con base en la asignación de pesos por expertos fueron número de variedades cultivadas, número de usos y diversidad fenotípica. Al respecto, Bonneuila *et al.* (2012) afirmaron que la riqueza de variedades en conjunto con otros indicadores como la homogeneidad

espacial y diversidad inter e intra varietal puede dar una aproximación de la diversidad de cultivos, y que puede ser de particular interés para la elaboración de instrumentos enfocados en la prevención de la erosión genética.

Cuadro 2.1. Estado favorable, valores finales y peso de los criterios importantes para la identificación de áreas prioritarias para la conservación *in situ* de especies de tejocotes silvestres (*Crataegus* spp.), obtenidos por expertos (EXP) y por proceso analítico jerárquico (AHP).

Núm.	Criterio	Estado favorable	Valores finales en mapa	Peso	
Biológicos				EXP*	AHP*
1	Riqueza de especies	Alta	0,20,40,60,80,100	0.066	0.123
2	Diversidad fenotípica	Alta	0,20,40,60,80,100	0.064	0.118
3	Diversidad ecogeográfica	Alta	0,20,40,60,80,100	0.059	0.107
Socio-económicos					
4	Porcentaje de la población con carencia por acceso a la alimentación	Alto	0,25, 50,75,100	0.055	0.020
5	Porcentaje de la población en condición de pobreza	Alto porcentaje	0,20,40,60,80,100	0.035	0.034
6	Densidad de población	Baja	0,25, 50,75,100	0.029	0.029
7	Nivel de presencia indígena	Alta	0,33,66,100	0.039	0.029
8	Tipología municipal	Rural	0,100	0.038	0.092
9	Porcentaje de la población ocupada en la actividad agropecuaria	Alto porcentaje	0,25, 50,75,100	0.020	0.013
Ecológicos					
10	Áreas Naturales Protegidas (ANPs)	Área no ubicada en ANP	0,100	0.058	0.100
11	Nivel de protección de Áreas Naturales Protegidas	Bajo nivel de conservación	0,25, 50,75,100	0.050	0.021
12	Sitios prioritarios terrestres para la conservación de la biodiversidad	Sitios con alta prioridad	0,33,66,100	0.046	0.028
13	Áreas elegibles para la conservación de la biodiversidad	Áreas elegibles	0,100	0.036	0.011
14	Áreas con bosques templados	Áreas con bosques templados	0,100	0.043	0.040
15	Áreas con matorrales y pastizales submontanos	Áreas con mat. y past. submontanos	0,100	0.030	0.029
Culturales					
16	Pérdida por falta de conocimientos sobre usos, falta de consumo y/o falta de cultivo	Sí existe pérdida	0,100	0.057	0.013
17	Tipos silvestres diferentes de tejocote	Alto número	0,20,40,60,80,100	0.056	0.099
18	Pérdida de tipos silvestres diferentes de tejocote	Sí existe pérdida	0,100	0.056	0.040
19	Recolección de tejocotes silvestres para autoconsumo	Se recolecta para autoconsumo	0,100	0.046	0.019
20	Recolección de tejocotes silvestres para venta	Se recolecta para venta	0,100	0.040	0.008
21	Usos de los tejocotes silvestres	Alto número de usos	0,25, 50,75,100	0.045	0.019
22	Nombres comunes del tejocote silvestre	Alto número de nombres comunes	0,50,100	0.030	0.007

*En negritas se resaltan los criterios de alta importancia (CAI), determinados a partir del umbral obtenido por el cálculo del percentil 50. 4.55 para expertos y 2.92 para AHP.

Los criterios con los pesos más bajos fueron: sitios con alta prioridad de conservación de la biodiversidad, número de usos y porcentaje de población en pobreza. El primero podría indicar sitios de alta biodiversidad silvestre y su nivel de riesgo (Urquiza-Haas, Kolb, Koleff, Lira-Noriega & Alarcón 2009), los cuales probablemente no están relacionados directamente con *C. mexicana* como especie cultivada. Respecto al criterio de pobreza, Adams *et al.* (2004) discuten dos ideas contrastantes mencionando que puede ser erradicada con programas de conservación de biodiversidad y por otro lado, que estos programas pueden fallar en zonas con un alto índice de pobreza.

Por otra parte, de acuerdo con los pesos asignados por AHP para cultivados, los criterios más importantes fueron: riqueza de especies, diversidad ecogeográfica y áreas con agricultura temporal. El primero es el criterio con mayor peso, probablemente puede representar un sesgo debido a que las comparaciones pareadas del AHP se realizaron sólo con dos expertos, esto se puede subsanar en estudios posteriores si en las comparaciones pareadas se realiza entre al menos tres expertos. Los criterios menos importantes fueron la edad estimada de las plantas establecidas, cultivo de tejocote para venta y nombres comunes del tejocote cultivado, todos de carácter cultural.

Cuadro 2.2. Estado favorable, valores finales y peso de los criterios importantes para la identificación de áreas prioritarias para la conservación *in situ* de tejocote cultivado (*C. mexicana*) obtenidos por expertos (EXP) y por proceso analítico jerárquico (AHP).

Núm.	Criterio	Estado favorable	Escala	Pesos	
Biológicos				EXP*	AHP*
1	Diversidad fenotípica	Alta	0,20,40,60,80,100	0.059	0.102
2	Diversidad ecogeográfica	Alta	0,25, 50,75,100	0.056	0.104
3	Riqueza de especies	Alta	0,20,40,60,80,100	0.034	0.109
Socio-económicos					
4	Porcentaje de la población ocupada en la actividad agropecuaria	Alto porcentaje	0,20,40,60,80,100	0.040	0.095
5	Porcentaje de la población con carencia por acceso a la alimentación	Alto porcentaje	0,20,40,60,80,100	0.041	0.017
6	Porcentaje de adultos mayores	Bajo porcentaje	0,20,40,60,80,100	0.033	0.025
7	Porcentaje de la población en condición de pobreza	Alto porcentaje	0,20,40,60,80,100	0.025	0.034
8	Tipología municipal	Rural	0, 100	0.044	0.082
Ecológicos					
9	Áreas Naturales Protegidas (ANPs)	Área no ubicada en ANP	0, 100	0.031	0.015
10	Sitios prioritarios terrestres para la conservación de la biodiversidad	Sitios con alta prioridad	0,33,66,100	0.030	0.013

Cuadro 2.2. Continuación...

Núm.	Criterio	Estado favorable	Escala	Pesos
11	Áreas de agricultura temporal	Áreas con agricultura temporal	0,100	0.037 0.103
Culturales				
12	Variedades cultivadas de tejocote	Alto número	0,25, 50,75,100	0.068 0.077
13	Usos del tejocote cultivado	Alto número	0,20,40,60,80,100	0.057 0.023
14	Pérdida de variedades cultivadas de tejocote por bajo precio de la producción y cambio por otros frutales	No existe pérdida	0,100	0.055 0.036
15	Sustitución de variedades criollas por nuevas variedades de tejocote	No existe sustitución de variedades criollas	0,100	0.054 0.018
16	Tipo de variedades cultivadas	Mayoritariamente variedades tradicionales (de mata)	0,50,100	0.050 0.026
17	Cultivo de tejocote para venta	No se cultiva para venta	0,100	0.050 0.012
18	Especies asociadas con el cultivo de tejocote	Alto número	0,33,66,100	0.046 0.035
19	Flujo de semilla/planta	Sí se realiza intercambio	0,100	0.046 0.014
20	Asociación de tejocote con otros cultivos	Asociación con otros cultivos	0,100	0.044 0.019
21	Cultivo de tejocote para autoconsumo	Se cultiva para autoconsumo	0,100	0.043 0.022
22	Edad estimada de las plantas establecidas	Edad alta	0,20,40,60,80,100	0.032 0.007
23	Nombres comunes del tejocote cultivado	Alto número	0,100	0.027 0.010

*En negritas se resaltan los criterios de alta importancia (CAI), determinados a partir del umbral obtenido por el cálculo del percentil 50. 4.40 para expertos y 2.49 para AHP.

Criterios de alta importancia para la conservación *in situ* de tejocote

Tanto para CAI-EXP como para CAI-AHP se determinaron 11 criterios de alta importancia para la conservación *in situ* de los tejocotes silvestres, sumando una importancia de 61.35 y 81.06, respectivamente (Cuadro 2.1). El 36 % de CAI-EXP son criterios culturales, referentes al número de tipos de tejocotes silvestres que se recolectan, la pérdida de éstos y su uso para autoconsumo, seguidos por los biológicos y ecológicos (ambos con 27 %). Lo contrario para CAI-AHP donde los menos importantes son los culturales (18 %), mientras que los criterios biológicos, ecológicos y socio-económicos están representados de manera equitativa (27 %). Ambos CAI coinciden en un 55 %, siendo comunes los siguientes criterios: riqueza de especies, diversidad fenotípica y ecogeográfica, alto número de tipos silvestres recolectados, sitios donde se ha reportado pérdida y Áreas Naturales Protegidas, esto último bajo la consideración de que en estas áreas existe un nivel de protección de la biodiversidad, aun cuando Koleff & Urquiza-Haas (2011) resaltan que muchas de las áreas protegidas fueron elegidas por su belleza escénica o de forma oportunista, sin una evaluación que dirigiera las prioridades, sin asegurar *a priori* una adecuada representación de la

biodiversidad, especialmente la más vulnerable o en riesgo. Es importante mencionar que CAI-EXP a diferencia de CAI-AHP, descartó criterios como la presencia de población indígena, la tipología del municipio y áreas con bosques templados o, matorrales y pastizales submontanos, a pesar de que estos dos últimos hacen referencia a la vegetación relacionada con los climas donde principalmente se distribuyen las especies del género *Crataegus* spp. (Phipps, 1997; Núñez-Colín *et al.*, 2008). El aspecto indígena también resulta contrastante con estudios como el de López & Palomino (2008) donde mencionan que la población indígena es un importante componente de los programas de conservación y ecoturismo, ya que además de preservar sus depositarios de una enorme diversidad biológica, paisajística y natural, también les permite una reapropiación y re-uso de los recursos naturales básicos para su existencia.

Para tejocotes cultivados se definieron 12 criterios de alta importancia en la conservación *in situ* tanto para CAI-EXP y CAI-AHP, con 62.79 y 82.9 de importancia acumulada, respectivamente (Cuadro 2.2). Los conjuntos coinciden en 63.6 % de los criterios, entre los que sobresalen número y tipo de variedades cultivadas, diversidad fenotípica y ecogeográfica y tipología municipal. En CAI-EXP se evidencia la intervención de los criterios culturales ya que representan el 75 %, mientras que los excluidos son los ecológicos. Entre los criterios exclusivos de este conjunto resaltan número de usos, sustitución por nuevas variedades y flujo de semilla. Éste último visto como un proceso dinámico en el que se selecciona e introduce variabilidad mediante el libre intercambio de materiales entre comunidades, teniendo como ventaja la adaptación a ambientes marginales y a estreses biótico y abiótico, con una conservación vinculada a su utilización y a su proceso evolutivo (Lobo & Medina, 2009). En CAI-AHP los criterios socioeconómicos y culturales (ambos con el 30 %) son los mejor representados. Este conjunto tiene como criterios exclusivos riqueza de especies, porcentajes de población ocupada en la actividad agrícola, de adultos mayores y en condición de pobreza y, áreas de agricultura temporal.

Mapas de identificación de áreas prioritarias para la conservación *in situ* de tejocote

Las sumatorias de criterio-mapa resultaron en siete escenarios diferentes de áreas prioritarias para la conservación de tejocote.

Para silvestres, los escenarios E₁ y E₆ muestran diferencias en su patrón de distribución de áreas prioritarias, pero reducen su ubicación específica al estado Chiapas. El primero muestra sólo dos celdas de alta prioridad en San Cristóbal de las Casas y Huixtán, mientras que el segundo dispersa siete celdas en cinco municipios, éste es el escenario que abarca mayor superficie de áreas prioritarias (175 km²). De manera más específica, pero congruente con lo propuesto por Núñez-Colín (2009), que señaló que la región montañosa de Chiapas correspondía a una de las zonas prioritarias para la conservación de la diversidad del género *Crataegus* L. Los escenarios E₄ y E₅ tienen prácticamente el mismo patrón de distribución, ambos considerando 50 km² y ubican las áreas prioritarias en tres municipios del Estado de México (Xalatlaco, Tianguistenco, Ocuilán). Lo que sugiere que CAI-EXP con los mismos pesos y CAI-EXP con los pesos ponderados por expertos proporcionan información similar en la definición de áreas prioritarias. E₇ es el segundo en superficie (125 km²) y ubica las áreas prioritarias en dos estados, Chiapas y Estado de México. Finalmente, E₂ es el único que concentra las áreas prioritarias en tres estados, Chiapas, Morelos y Estado de México (Figura 2.3, Cuadro 2.3).

Aunque todas las celdas con alta prioridad se sitúan en áreas consideradas por Núñez-Colín (2009) como prioritarias para la recolección y conservación de la diversidad de *Crataegus* spp., probablemente esta ubicación también refleje un ligero sesgo por la información aportada por las encuestas y por la diversidad fenotípica de las accesiones caracterizadas, ya que éste criterio-mapa se obtuvo a partir de la información disponible para 140 accesiones conservadas en el Banco de Germoplasma de la Universidad Autónoma Chapingo (Betancourt-Olvera *et al.*, 2018).

Los escenarios de las áreas prioritarias para la conservación de *C. mexicana* muestran que los primeros cinco (E₁, E₂, E₃, E₄, E₅) concentran las celdas con prioridad únicamente en el estado de Puebla (Figura 2.4, Cuadro 2.3). De éstos, E₁ y E₂ mantienen un patrón de distribución similar e incluso las áreas prioritarias son las mismas. E₃ distribuye seis celdas prioritarias en 13 municipios. E₄ representa la menor superficie (25 km²) en Calpan, Nealtican y San Nicolás de Los Ranchos. El escenario E₆ ubica las áreas prioritarias en Puebla y Chiapas, con una superficie de 375 km², la más alta de todos los escenarios, incluso comparado con las áreas para silvestres. Finalmente, E₇ con una superficie de 325 km² concentra las áreas prioritarias en Puebla, Chiapas y Veracruz, aun cuando no se ha documentado que en Chiapas y Veracruz se cultive el tejocote, ya que Puebla es el único estado donde se ha registrado y constatado que existen plantaciones, específicamente en los municipios de Soltepec, Chiantzingo y Calpan que representan más del 50 % de la superficie reportada para este estado (SIAP, 2018). Así mismo, en Puebla se han realizado acciones de conservación *in situ* a través del mejoramiento participativo con productores, buscando principalmente rendimiento y calidad de fruto (Ramírez-Galindo *et al.*, 2016), acción promovida en el Plan de Acción Mundial para la conservación *in situ* de los RFAA (FAO, 2011).

Es importante resaltar que los escenarios E₃, E₅ y E₆ se incluyen los conjuntos de criterios de AHP, donde resultó que “riqueza de especies” fue el criterio con mayor importancia, lo cual puede explicar que estos escenarios no sólo incrementen su superficie, sino que las zonas prioritarias se extiendan a otros sitios donde probablemente la riqueza de especies es alta, como Chiapas y Veracruz. No obstante, en estos sitios puede encontrarse una valiosa fuente genética de *C. mexicana* para programas de mejoramiento genético, útil en la generación de variedades de tejocote con características de valor para los productores.

Tal como lo mencionaron Magos *et al.* (2008), las especies silvestres relacionadas con los cultivos y las especies de recolección también ameritan

acciones de conservación, ya que corresponden a un conjunto importante de recursos genéticos por su potencial de utilización.

Es conveniente señalar que los resultados dependieron del peso que los expertos le otorgaron a cada uno de los criterios y se incrementó la complejidad con las diferentes sumatorias, dado que no todos los criterios tienen la misma influencia en la conservación de tejocote. Para evitar sesgos de opiniones, se recomienda considerar un alto número de expertos de diferentes sectores.

Actualmente, con las encuestas en línea se facilita tener alcance a los expertos de todo el mundo y el tiempo dedicado a responderlas se reduce a minutos. De lo contrario, las comparaciones pareadas del AHP demandan horas y los especialistas no siempre disponen de ese tiempo o capacidad de paciencia.

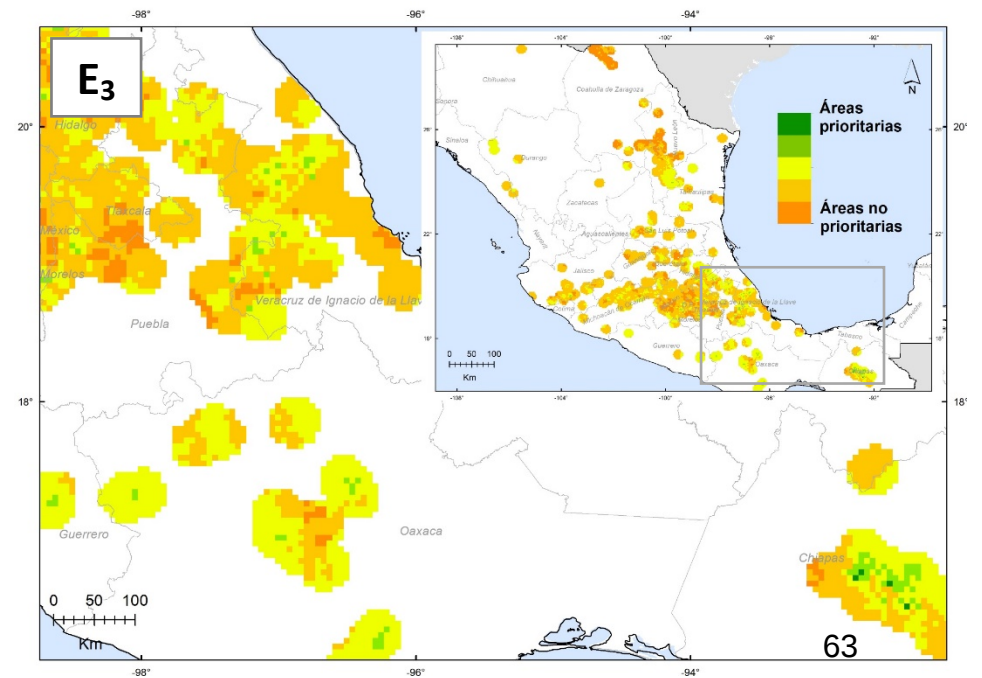
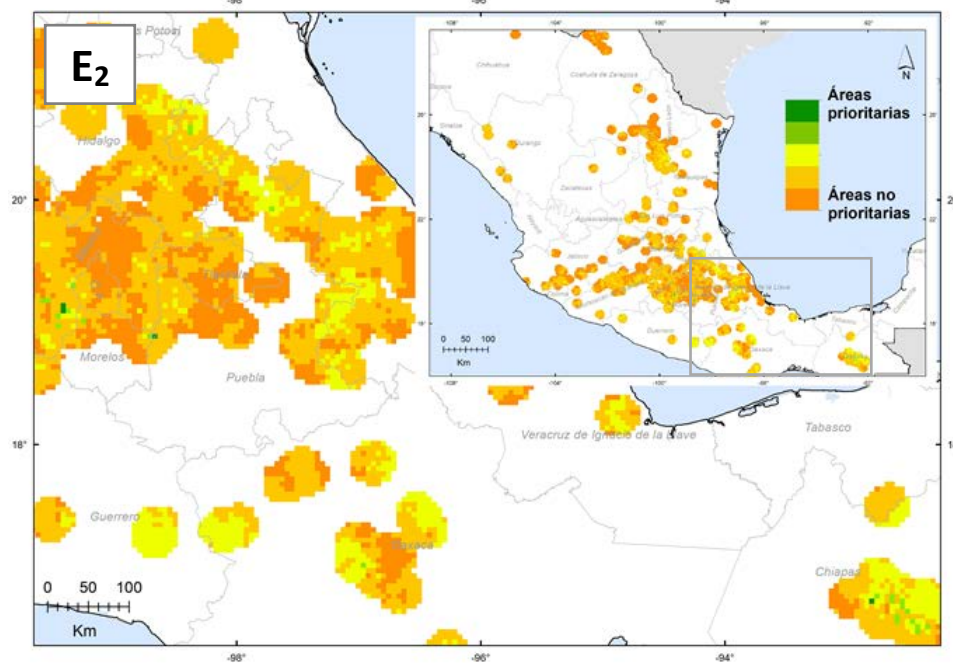
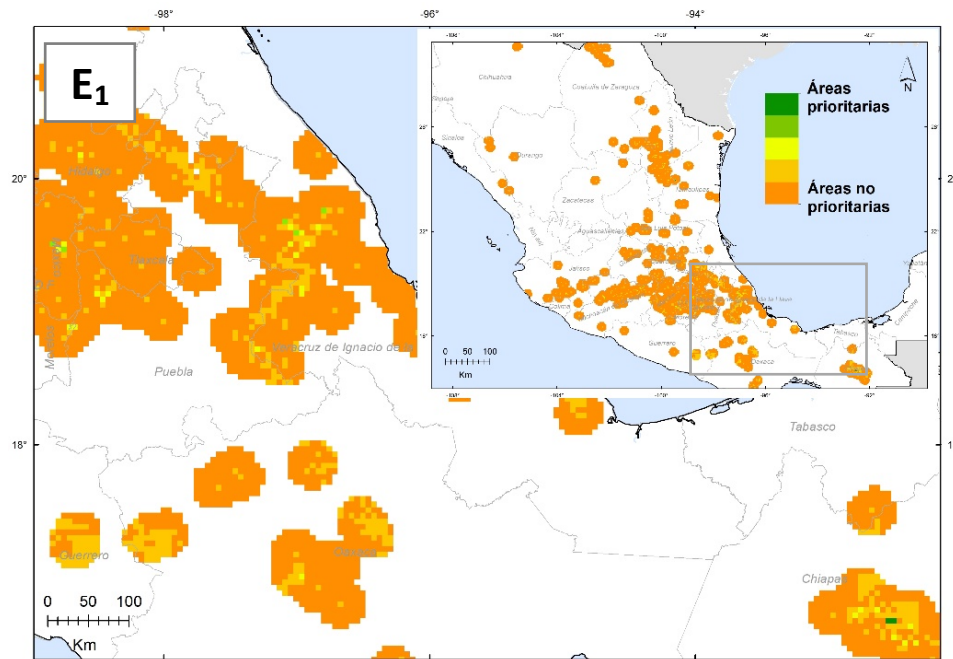
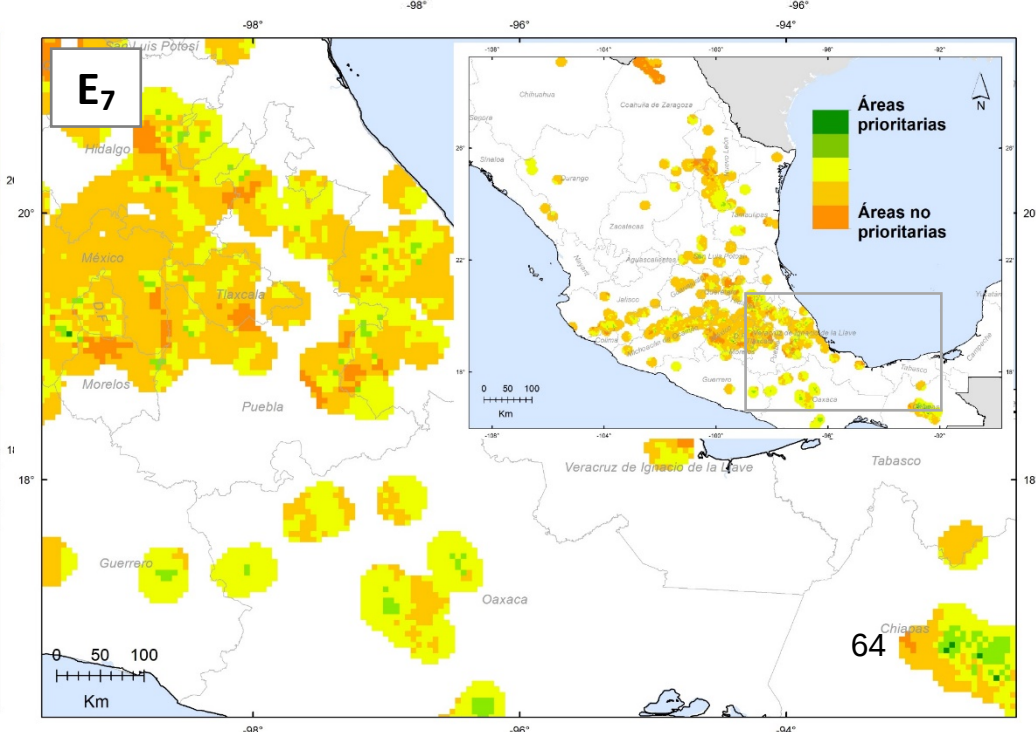
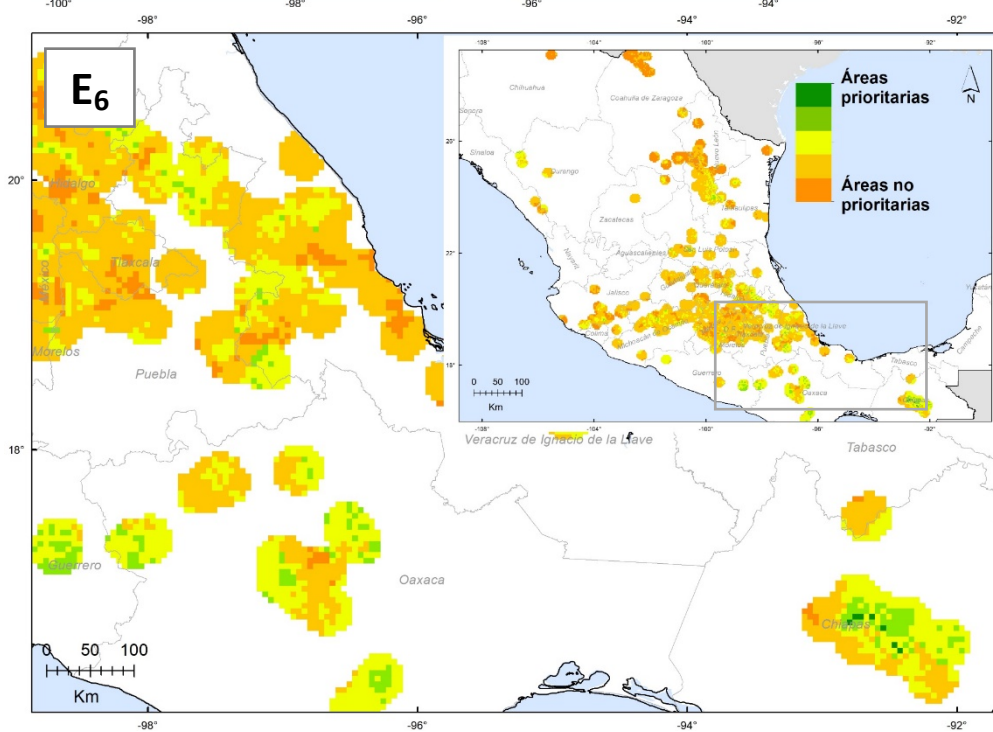
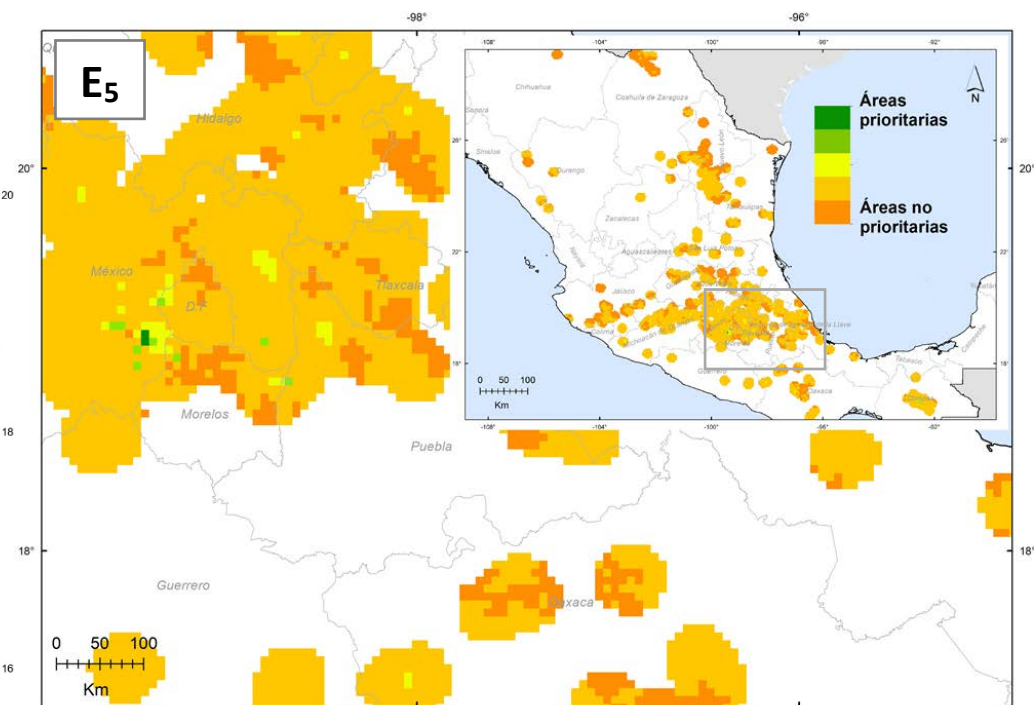
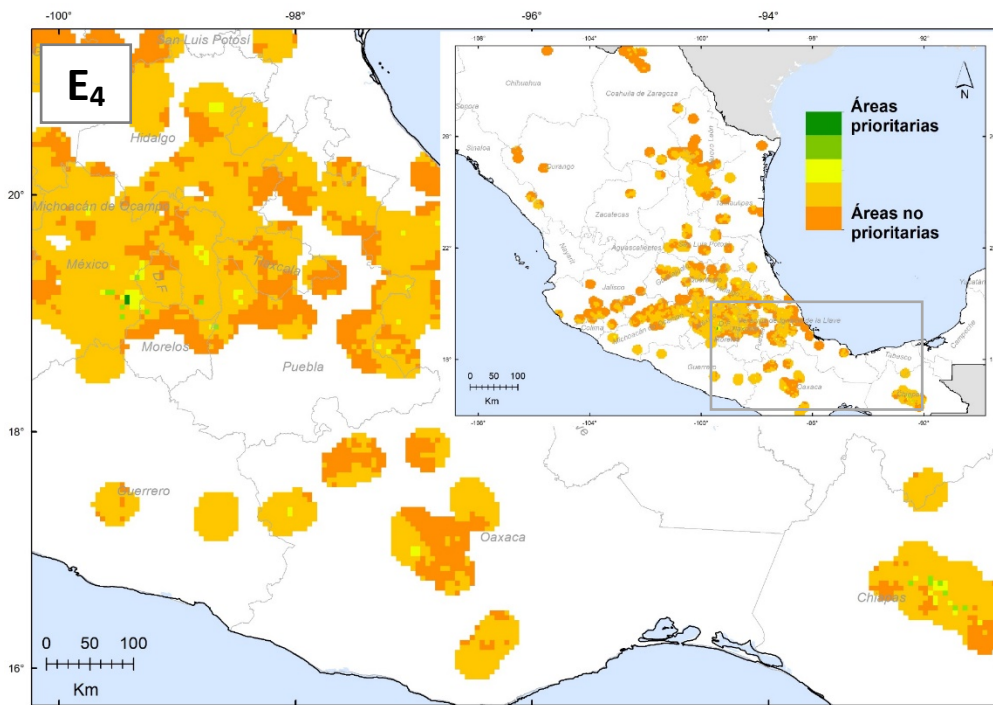


Figura 2.3. Escenarios de áreas prioritarias para la conservación *in situ* de tejocote silvestre (*Crataegus* spp.), con base en siete diferentes combinaciones criterios-mapa. **E₁.** Todos los criterios con el mismo peso. **E₂.** Todos los criterios con los pesos asignados por expertos. **E₃.** Todos los criterios con los pesos asignados por AHP. **E₄.** CAI-EXP con el mismo peso **E₅.** CAI-EXP con los pesos asignados por expertos. **E₆.** CAI-AHP con el mismo peso. **E₇.** CAI-AHP con los pesos asignados por AHP.



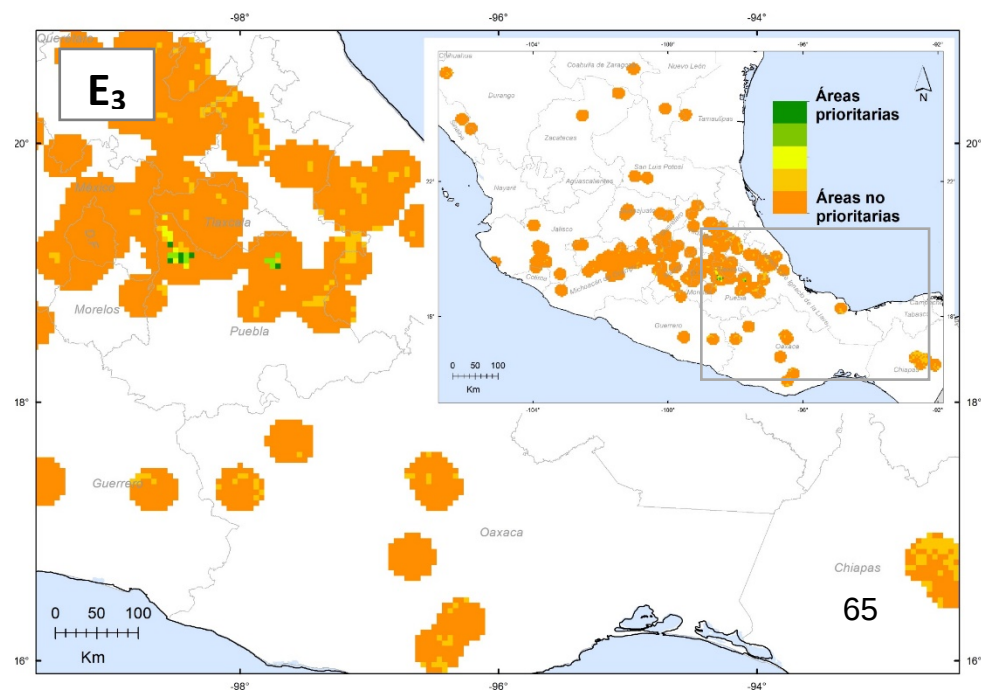
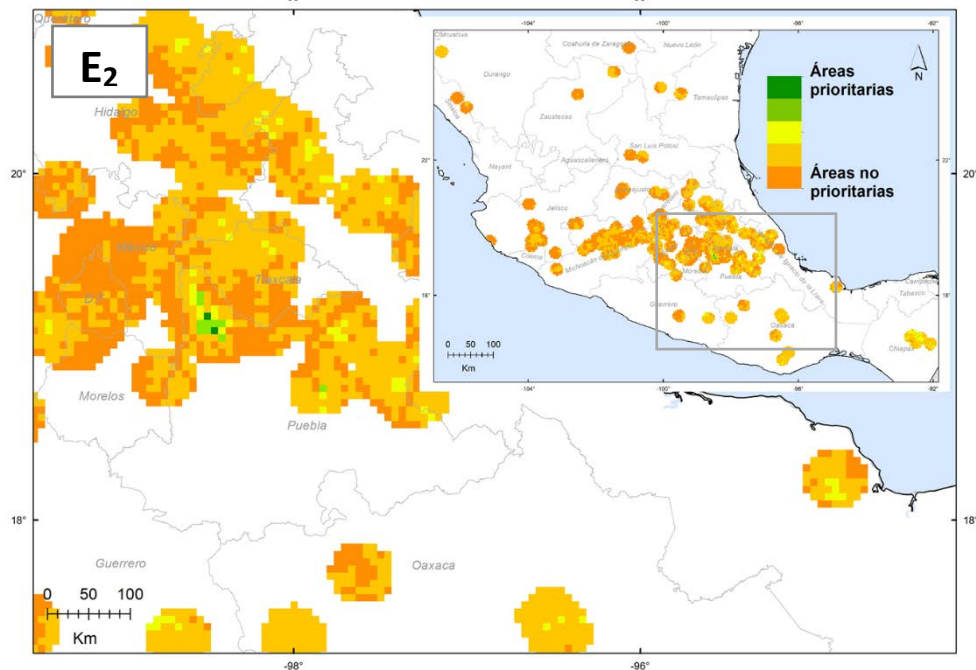
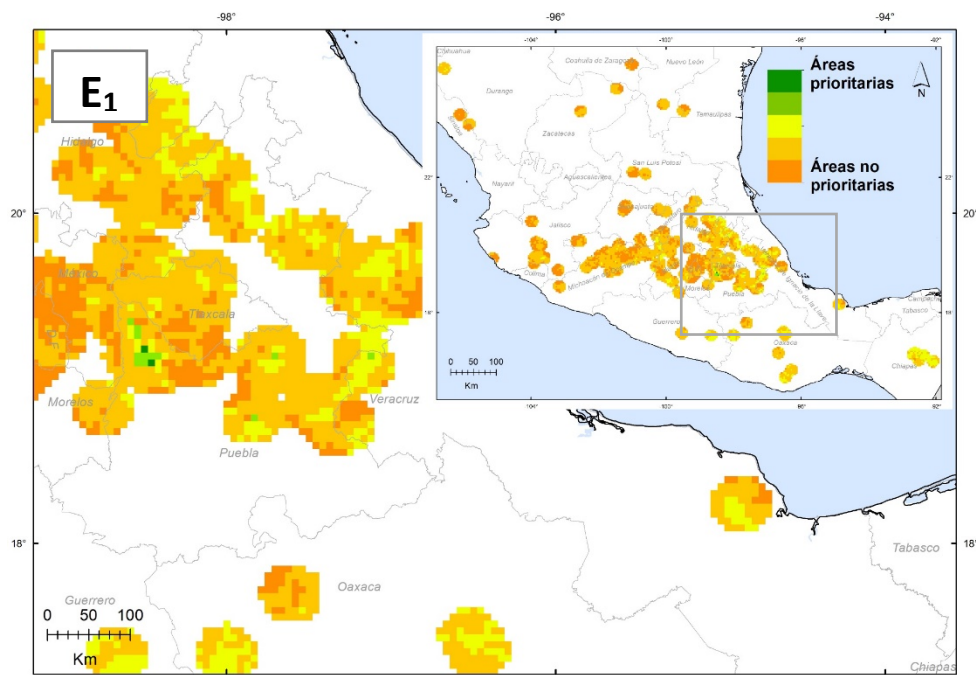
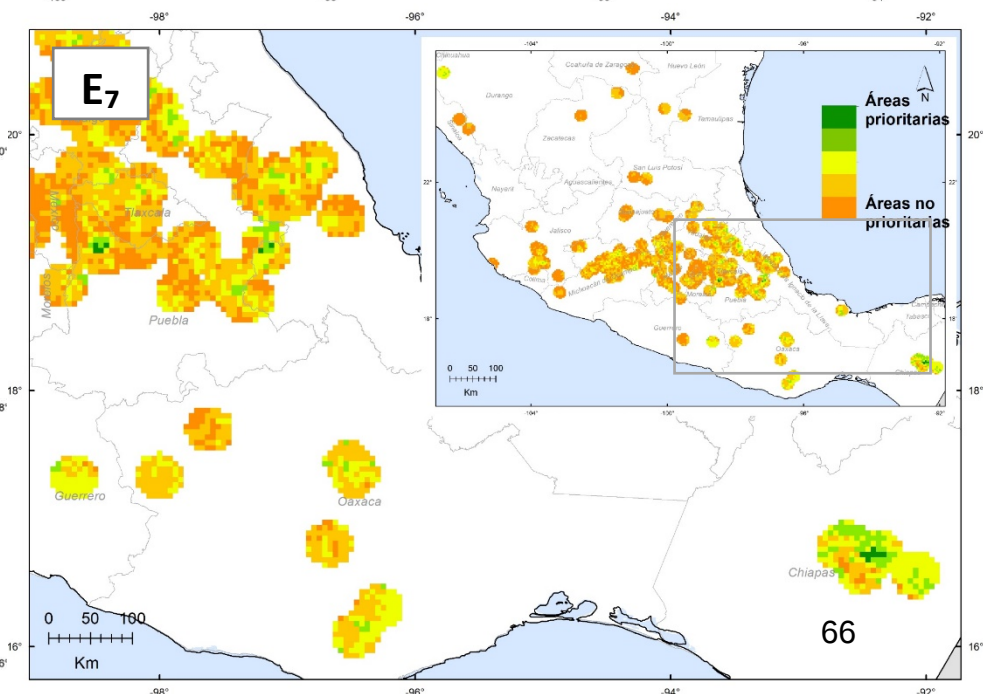
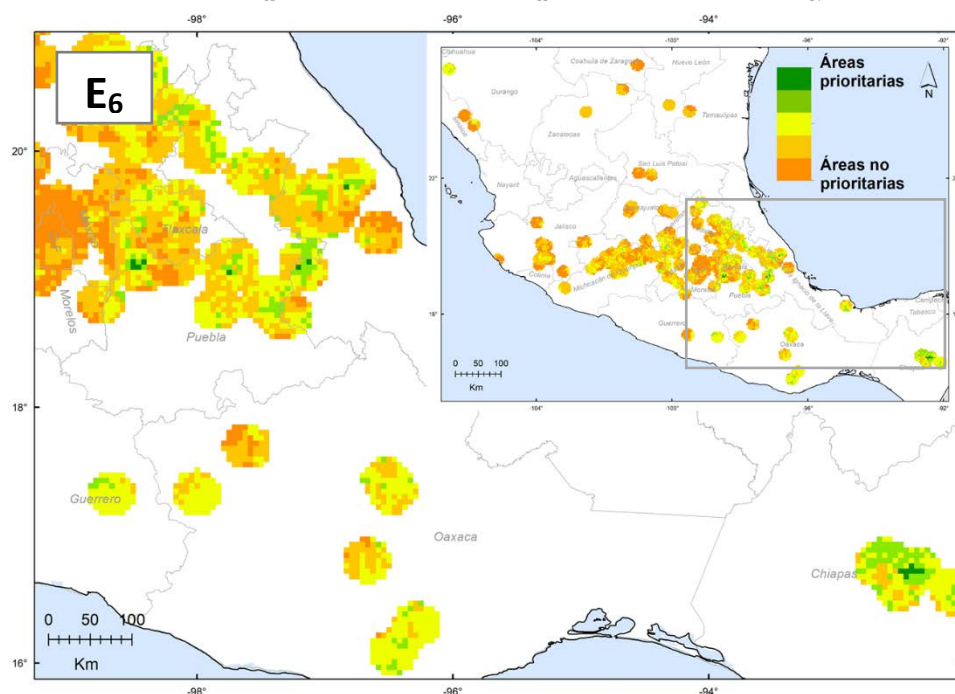
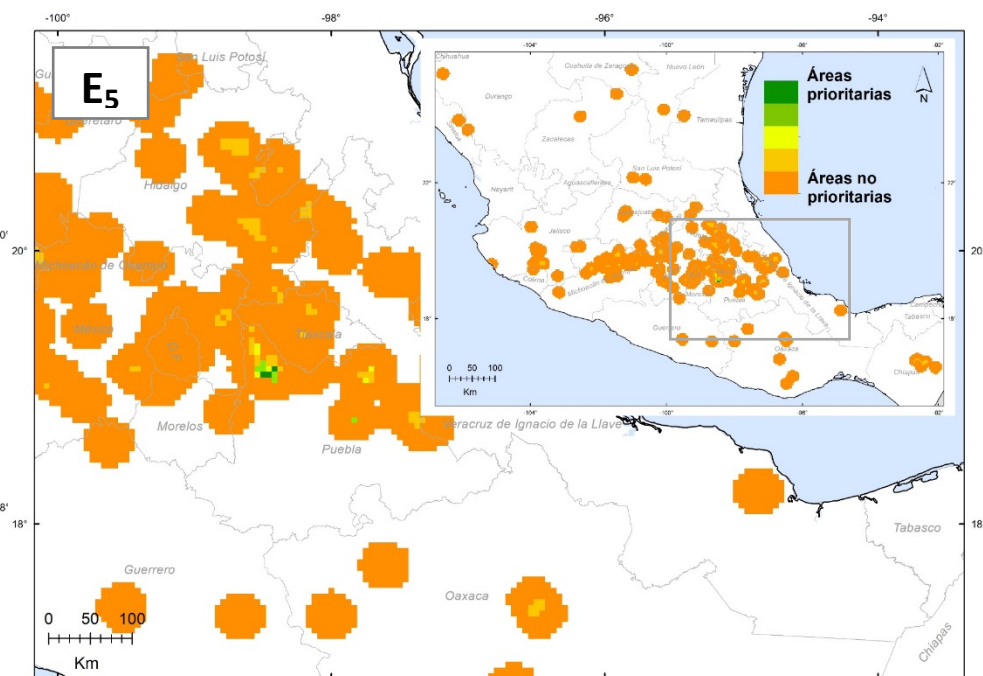
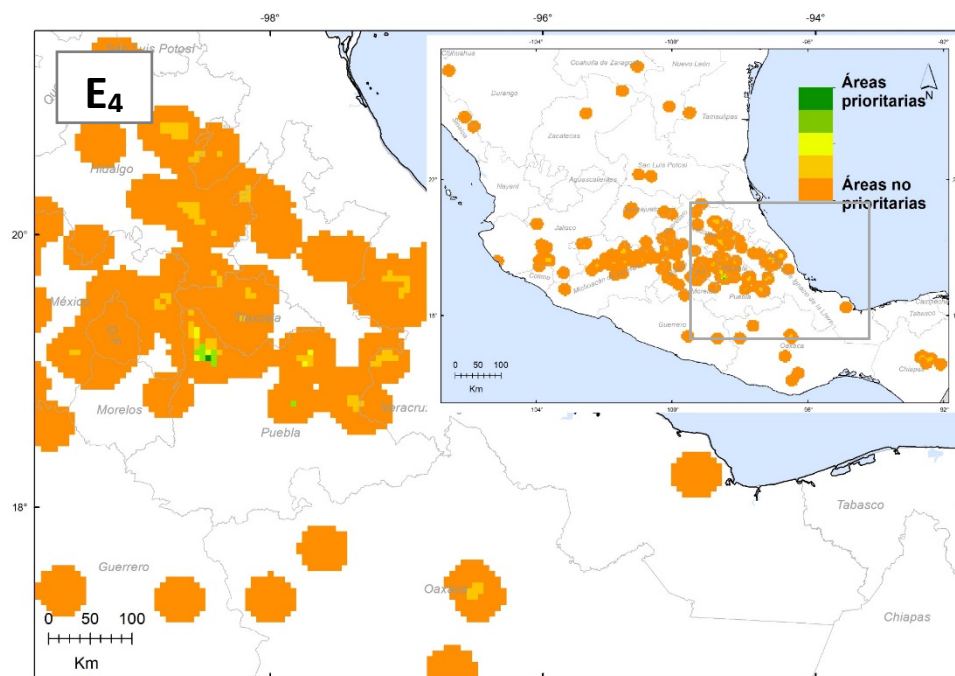


Figura 2.4. Escenarios de áreas prioritarias para la conservación *in situ* de tejocote cultivado (*C. mexicana*), con base en siete diferentes combinaciones criterios-mapa. **E₁**. Todos los criterios con el mismo peso. **E₂**. Todos los criterios con los pesos asignados por expertos. **E₃**. Todos los criterios con los pesos asignados por AHP. **E₄**. CAI-EXP con el mismo peso **F₅**. CAI-EXP con los pesos asignados por expertos. **E₆**. CAI-AHP con el mismo peso. **E₇**. CAI-AHP con los pesos asignados por AHP.



Cuadro 2.3. Ubicación y superficie de las áreas prioritarias para la conservación de tejocote silvestre (*Crataegus* spp.) y cultivado (*C. mexicana*) con base en siete sumatorias de criterios (escenarios).

Escenarios	Superficie (km ²)	Estados y municipios
Silvestres		
E ₁	50	Chiapas: San Cristóbal de las Casas, Huixtán.
E ₂	100	Estado de México: Xalatlaco, Tianguistenco, Ocuilán, Tochimilco, Atzitzihuacán. Morelos: Tetela del Volcán. Chiapas: Zinacantán
E ₃	100	Chiapas: Zinacantán, Amatenango del Valle, San Cristóbal de las Casas.
E ₄	50	Estado de México: Xalatlaco, Tianguistenco, Ocuilán
E ₅	50	Estado de México: Ocuilán, Tianguistenco, Xalatlaco
E ₆	175	Chiapas: Chamula, Zinacantán, San Cristóbal de las Casas, Teopisca, Amatenango del Valle
E ₇	125	Estado de México: Ocuilán, Tianguistenco. Chiapas: Zinacantán, Chamula, San Cristóbal de las Casas, Amatenango del Valle.
Cultivados		
E ₁	50	Puebla: Chiautzingo, Huejotzingo, Nealtican
E ₂	50	Puebla: Chiautzingo, Huejotzingo, Nealtican
E ₃	150	Puebla: San Felipe Teotlalcingo, Chiautzingo, Huejotzingo, Domingo Arenas, Tlaltenago, Juan C. Bonilla, Calpan, Nealtican, San Nicolás de Los Ranchos, San Salvador El Verde, Acatzingo, General Felipe Álvarez, Soltepec
E ₄	25	Puebla: Calpan, Nealtican, San Nicolás de Los Ranchos.
E ₅	75	Puebla: Huejotzingo, Domingo Arenas, Calpan, San Nicolás de Los Ranchos.
E ₆	375	Chiapas: Huixtán; Veracruz: Chiconquiaco, Acatlán, Landero y Coss, Calcahualco. Puebla: Acatzingo, Soltepec, Huejotzingo, Domingo Arenas, Calpan, San Nicolás de Los Ranchos, Nealtican.
E ₇	325	Chiapas: Hixtán, Tenejapa, San Cristóbal de las Casas. Puebla: Huejotzingo, Calpan, Domingo Arenas, San Nicolás de Los Ranchos. Veracruz: Calcahualco, Alpatláhuac.

E₁. Criterios seleccionados con el mismo peso. E₂. Criterios seleccionados con los pesos asignados por expertos. F₃. Criterios seleccionados con los pesos asignados por AHP. E₄. Criterios priorizados por expertos, con el mismo peso. F₅. Criterios priorizados con los pesos asignados por expertos. E₆. Criterios priorizados por AHP, con el mismo peso. E₇. Criterios priorizados con los pesos asignados por AHP.

Recomendaciones para tomadores de decisiones

Tomando como base los resultados de CAI, se puede recomendar a los tomadores de decisiones sobre la conservación de la agrobiodiversidad en México, que las nuevas áreas prioritarias para la conservación *in situ* de tejocote silvestre (*Crataegus* spp.) deben situarse en áreas con alta riqueza de especies, alta diversidad fenotípica y ecogeográfica; en municipios rurales con alto porcentaje de población en pobreza y con presencia indígena, deben asociarse con vegetación como bosques templados o con matorrales y pastizales submontanos, preferentemente fuera de Áreas Naturales Protegidas o con bajo nivel de conservación, donde se recolecta un mayor número de tejocotes

silvestres, principalmente para autoconsumo y donde se ha registrado la amenaza de pérdida de estos tejocotes.

Por su parte, las nuevas áreas prioritarias para la conservación de tejocote cultivado (*C. mexicana*) deben ser sitios donde se cultive un alto número de variedades de tejocote mayoritariamente tradicionales, no debe existir pérdida de estas variedades y deben estar asociadas con un alto número de cultivos diferentes. Se deben ubicar en municipios rurales, específicamente en sitios con agricultura temporal donde un alto porcentaje de la población se dedique a actividades agrícolas y que se encuentre en condición de pobreza. Preferentemente en zonas con alta diversidad fenotípica y ecogeográfica.

Si bien los diferentes escenarios ofrecen opciones similares de áreas prioritarias, cada uno de ellos muestra celdas exclusivas. Finalmente, la selección de la estrategia para determinar áreas prioritarias para la implementación de programas o proyectos de conservación *in situ* de una o varias especies objetivo (en este caso *Crataegus* spp.), dependerá de los tomadores de decisiones y de los recursos económicos disponibles para este objetivo.

Conclusiones

Riqueza de especies, diversidad fenotípica y ecogeográfica fueron los criterios de mayor importancia para la definición de áreas prioritarias para la conservación *in situ* de tejocote silvestre (*Crataegus* spp.), las cuales se ubicaron particularmente en Chiapas, Estado de México, y Morelos en menor proporción.

La determinación de áreas prioritarias para la conservación *in situ* de tejocote cultivado (*C. mexicana*) fue dada por el número de variedades cultivadas, número de usos, diversidad fenotípica, diversidad ecogeográfica y áreas con agricultura temporal. Estas áreas se situaron específicamente en el estado de Puebla donde actualmente se produce más del 90 % de tejocote en México, y en menor proporción en Veracruz y Chiapas donde posiblemente se encuentra la reserva genética de esta especie.

Las áreas prioritarias fueron definidas por diferentes conjuntos y sumas de criterios, sin embargo, todos coinciden en áreas específicas y algunos mantienen áreas exclusivas. La selección de las áreas prioritarias para la conservación *in situ* de tejocote depende en gran medida de la estrategia utilizada para determinar dichas áreas, de los tomadores de decisiones y de los recursos que pudieran destinarse para este objetivo.

Este trabajo representa un primer paso en una secuencia de acciones que lleven a una conservación eficaz y eficiente de los recursos fitogenéticos de una especie de importancia para los mexicanos, que debe ser seguido de la implementación de proyectos y programas de conservación *in situ* idealmente adaptados a las condiciones de cada sitio. De esta manera se introduce una herramienta para el diseño de estrategias de conservación de tejocote y otros recursos fitogenéticos de alta importancia en México, como complemento de la conservación *ex situ* que se realiza en bancos de germoplasma. Este tipo de instrumentos para la toma de decisiones dará soporte a la construcción de políticas públicas para la conservación de la agrobiodiversidad en México.

Literatura citada

- Adams, W. M., Aveling, R., Brockington, D., Dickson, B., Elliott, J., Hutton, J. and Wolmer, W. (2004). Biodiversity conservation and the eradication of poverty. *Science*, 306(5699), 1146-1149. doi. 10.1126/science.1097920
- Arriaga, C. L., *et al.* (2009). Regiones prioritarias y planeación para la conservación de la biodiversidad. En CONABIO (Ed.), *Capital natural de México, vol. II: Estado de conservación y tendencias de cambio* (pp. 433-457). México: Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad.
- Bellon, M. R., Barrientos-Priego, A. F., Colunga-García Marín, P., Perales, H., Reyes Agüero, J. A., Rosales Serna, R. y Zizumbo-Villarreal, D. (2009). Diversidad y conservación de recursos genéticos en plantas cultivadas. En CONABIO (Ed.), *Capital natural de México, vol. II: Estado de conservación y tendencias de cambio* (pp. 355-382). México: Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad.
- Betancourt-Olvera, M., Nieto-Ángel, R., Urbano, B. and González-Andrés, F. (2018). Analysis of the biodiversity of hawthorn (*Crataegus* spp.) from the

- morphological, molecular, and ethnobotanical approaches, and implications for genetic resource conservation in scenery of increasing cultivation: the case of Mexico. *Genetic Resources and Crop Evolution*, 65(3), 897-916. doi: 10.1007/s10722-017-0583-4
- Bonn, A., and Gaston, K. J. (2005). Capturing biodiversity: selecting priority areas for conservation using different criteria. *Biodiversity & Conservation*, 14(5), 1083-1100. doi: 10.1007/s10531-004-8410-6
- Bonneuila, C., Goffauxc, R., Bonninc, I., Montalentd, P., Hamond, C., Balfouriere, F. and Goldringerd, I. (2012). A new integrative indicator to assess crop genetic diversity. *Ecological Indicators*, 23, 280-289. doi: 10.1016/j.ecolind.2012.04.002
- Bottero, M., Comino, E., Duriavig, M., Ferretti, V., and Pomarico, S. (2013). The application of a Multicriteria Spatial Decision Support System (MCSDDS) for the assessment of biodiversity conservation in the Province of Varese (Italy). *Land Use Policy*, 30(1), 730-738. doi: 10.1016/j.landusepol.2012.05.015
- Brown, K., Adger, W. N., Tompkins, E., Bacon, P., Shim, D. and Young, K. (2001). Trade-off analysis for marine protected area management. *Ecological Economics*, 37(3), 417-434. doi: 10.1016/S0921-8009(00)00293-7
- Cabrera, L. (1992). Diccionario de aztequismos (Vol. 8). Colofón. Distrito Federal, México.
- Castellini, C., Boggia, A., Cortina, C., Dal Bosco, A., Paolotti, L., Novelli, E. and Mugnai, C. (2012). A multicriteria approach for measuring the sustainability of different poultry production systems. *Journal of Cleaner Production*, 37, 192-201. doi: 10.1016/j.jclepro.2012.07.006
- Ceballos, G., et al. (2009). Zonas críticas y de alto riesgo para la conservación de la biodiversidad de México. En CONABIO (Ed.), *Capital natural de México, vol. II: Estado de conservación y tendencias de cambio* (pp. 575-600). México: Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad.
- Chávez G., H., González, G. M. J. and Hernández, de la R. P. (2015). Metodologías para identificar áreas prioritarias para conservación de ecosistemas naturales. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 6(27), 8-23.
- CONABIO (2015). Tipología municipal por asentamiento humano 2014, escala: 1:250000. Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad. México, D.F.

- CONABIO. (2012a). Características sociodemográficas de México por municipio, 2010, escala: 1:250000. Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad. México, D.F.
- CONABIO. (2012b). Distribución de la población en México por municipio 2010, escala: 1:250000. Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad. México, D.F.
- CONABIO. (2012c). Actividades económicas en México por municipio 2010, escala: 1:250000. Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad. México, D.F.
- CONABIO. (2014a). Población con carencia por acceso a la alimentación por municipio 2010, escala: 1:250000. Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad. México, D.F.
- CONABIO. (2014b). Población en condición de pobreza por municipio 2010, escala: 1:250000. Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad. México, D.F.
- CONABIO. (2014c). Presencia de la población indígena por municipio 2010, escala: 1:250000. Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad. México, D.F.
- CONABIO. (2014d). Índice de desarrollo humano por municipio 2010, escala: 1:250000. Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad. Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo México (PNUD). México, D.F.
- CONABIO. (2014e). Áreas elegibles para la conservación en México 2014, escala: 1:250000. Comisión Nacional Forestal. México.
- CONABIO, CONANP, TNC y PRONATURA. (2007). Sitios prioritarios terrestres para la conservación de la biodiversidad. Escala 1:1000000. D.F., México.
- CONANP. (2016). *Programa de Conservación de Maíz Criollo en México*. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. México.
- CONANP. (2017). Áreas Naturales Protegidas Federales de la República Mexicana. Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas. Ciudad de México.
- Dykstra, D. P. (1984). *Mathematical programming for natural resource management*. McGraw-Hill Book Company. New York, NY, USA. 309 p.
- ESRI. (2014). ArcGIS Desktop: Release 10.2.2. Environmental Systems Research Institute. Redlands, CA. Recuperado de: <http://www.esri.com/software/arcgis/arcgis-for-desktop>

- FAO. (2011). *Second Global Plan of Action for Plant Genetic Resources for Food and Agriculture*. Rome, Italy. 322 p. Recuperado de: <http://www.fao.org/docrep/015/i2624e/i2624e00.pdf>
- Geneletti, D. (2004). A GIS-based decision support system to identify nature conservation priorities in an alpine valley. *Land Use Policy*, 21(2), 149-160. doi: 10.1016/j.landusepol.2003.09.005
- Geneletti, D., F. Orsi, E. Lanni y A. C. Newton. (2011). Identificación de áreas prioritarias para la restauración de bosques secos. En A. C. Newton y N. Tejedor (Eds.). *Principios y práctica de la restauración del paisaje forestal: Estudios de caso en las zonas secas de América Latina* (pp. 289-326). Gland, Suiza: Unión Internacional para la Conservación de la Naturaleza, Fundación Internacional para la Restauración de Ecosistemas.
- INEGI. (2009). Uso del suelo y vegetación, escala 1:250000, serie IV (continuo nacional). Instituto Nacional de Estadística y Geografía. México.
- Koleff, P. y Urquiza, H. T. (Coords.) (2011). *Planeación para la conservación de la biodiversidad terrestre en México: Retos en un país megadiverso*. Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad-Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas. México, D.F., México. 250 p.
- Koleff, P., Tambutti, M., March, I. J., Esquivel, R., Cantú, C. y Lira, N. A. (2009). Identificación de prioridades y análisis de vacíos y omisiones en la conservación de la biodiversidad de México. En CONABIO (Ed.), *Capital natural de México, vol. II: Estado de conservación y tendencias de cambio* (pp. 651-718). México: Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad.
- Lobo, A. M. y Medina, C. C. I. (2009). Conservación de recursos genéticos de la agrobiodiversidad como apoyo al desarrollo de sistemas de producción sostenibles. *Corpoica. Ciencia y Tecnología Agropecuaria*, 10(1), 33-42.
- López, P. G. y Palomino, V. B. (2008). Políticas públicas y ecoturismo en comunidades indígenas de México. *Teoría y Praxis*, (5), 33-50.
- March, I. J., Carvajal, M. A., Vidal, R. M., San Román, J. E. y Ruiz, G. (2009). Planificación y desarrollo de estrategias para la conservación de la biodiversidad. En CONABIO (Ed.), *Capital natural de México, vol. II: Estado de conservación y tendencias de cambio* (pp. 545-573). México: Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad.
- Margules, C. R., Pressey, R. L. and Williams, P. H. (2002). Representing biodiversity: data and procedures for identifying priority areas for conservation. *Journal of biosciences*, 27(4), 309-326. doi: 10.1007/BF02704962

- Maxted, N., Ford-Lloyd, B. V. and Hawkes, J. G. (1997). Complementary conservation strategies. En N. Maxted, B. V. Ford-Lloyd and J. G. Hawkes (eds.), *Plant Genetic Conservation: The In situ Approach* (pp. 15-40). London: Chapman & Hall.
- Maxted, N., Guarino, L., Myer, L. and Chwona E. A. (2002). Towards a methodology for on-farm conservation of plant genetic resources. *Genetic Resources and Crop Evolution*, 49(1), 31-46. doi: 10.1023/A:101389640
- Maxted, N., Ford-Lloyd, B. V., Jury, S., Kell, S. and Scholten, M. (2006). Towards a definition of a crop wild relative. *Biodiversity and Conservation* 15(8): 2673–2685. doi: 10.1007/s10531-005-5409-6
- Moffett, A. and Sarkar, S. (2006). Incorporating multiple criteria into the design of conservation area networks: a minireview with recommendations. *Diversity and Distributions*, 12(2), 125-137. doi: 10.1111/j.1366-9516.2005.00202.x
- Nieto-Ángel, R. (2007). Colección, conservación y caracterización del tejocote (*Crataegus* spp.). En R. Nieto-Ángel (Ed). *Frutales Nativos, un Recurso Fitogenético de México* (pp: 25-107). Estado de México, México: Universidad Autónoma Chapingo.
- Núñez-Colín, C. A., Nieto-Ángel, R., Barrientos-Priego, A. F., Segura, S., Sahagún-Castellanos, J. y González-Andrés, F. (2008). Distribución y caracterización eco-climática del género *Crataegus* L. (Rosaceae, Subfam. Maloideae) en México. *Revista Chapingo Serie Horticultura*, 14(2), 177-184.
- Núñez-Colín, C. A. y Hernández-Martínez, M. Á. (2011). La problemática en la taxonomía de los recursos genéticos de tejocote (*Crataegus* spp.) en México. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 2(1), 141-153.
- Núñez-Colín, C. A. (2009). Áreas prioritarias para coleccionar germoplasma de (*Crataegus* L.) en México con base en la diversidad y riqueza de especies. *Agricultura Técnica en México*, 35 (3), 333-338.
- Parra-Quijano, M., Torres, E., Iriando, J. M., López, F. and Molina, P.A. (2015). *CAPFITOGEN tools. User manual version 2.0*. International Treaty on Plant Genetic Resources for Food and Agriculture. FAO. Rome. 251 pp. Recuperado de: <http://www.capfitogen.net/en/>
- Phipps, J.B. (1997). *Monograph of Northern Mexican Crataegus (Rosaceae subfam. Maloideae)* (No. 15). BRIT Press.
- Phipps, J. B., O'Kennon, R. J. and Lance, R. W. (2003). Hawthorns and medlars. *Timber Press*, Portland, USA. 139 p.

- Ramírez-Galindo, J., Cruz-Castillo, J. G., Gallegos-Vázquez, C., Espíndola-Barquera, M. de la C., Nieto-Ángel, R., Avendaño-Arrazate, C. H., Domínguez-Álvarez, J. L., Villegas-Monter, A., Ávila-Reséndiz, C., Arreola-Ávila, J., Armella-Villalpando, M. A., Hernández-Fuentes, L. M., Padilla-Ramírez, J. S., Betancourt-Olvera, M., Moreno Martínez, J. L., y Méndez-Valverde, A. R. (2016). *Conservación y aprovechamiento Sostenible de Frutales Nativos de México*. Servicio Nacional de Inspección y Certificación de Semillas y Universidad Autónoma Chapingo. México. 156 p.
- Regan, H. M., Davis, F. W., Andelman, S. J., Widyanata, A. and Freese, M. (2007). Comprehensive criteria for biodiversity evaluation in conservation planning. *Biodiversity and Conservation*, 16(9), 2715-2728. doi: 10.1007/s10531-006-9100-3
- Saaty, R. W. (2003). Decision making in complex environments: *The Analytic Hierarchy Process (AHP) for decision making and The Analytic Network Process (ANP) for Decision Making with Dependence and Feedback*. RWS Publications, Pittsburgh.
- Santos, P. J. (1997). El planteamiento teórico multiobjetivo/multicriterio y su aplicación a la resolución de problemas medioambientales y territoriales, mediante los SIG raster. *Espacio Tiempo y Forma. Serie VI, Geografía*, 0(10). doi: 10.5944/etfvi.10.1997.2547
- Sarkar, S., Pressey, R. L., Faith, D. P., Margules, C. R., Fuller, T., Stoms, D. M. and Andelman, S. (2006). Biodiversity conservation planning tools: present status and challenges for the future. *Annual Review of Environment and Resources*, 31. doi: 10.1146/annurev.energy.31.042606.085844
- SIAP. (2018). Sistema de Información Agroalimentaria y Pesquera. Recuperado de: <http://www.siap.gob.mx/cierre-de-la-produccion-agricola-por-cultivo/> (Acceso: Enero 2017).
- SNICS. (2012). *Catálogo Nacional de Variedades Vegetales 29*. Servicio Nacional de Inspección y Certificación de Semillas, SAGARPA, México.
- Tapia, B. C. G. (2015). Identificación de áreas prioritarias para la conservación de razas de maíz en la Sierra de Ecuador (Tesis de Doctorado en Ciencias). Universidad Politécnica de Madrid, España. 184 p.
- Tobón, W., Koleff, P., Urquiza-Haas, T. y Méndez, G. G. (2016). Propuesta metodológica para identificar prioridades de restauración en México. *Experiencias mexicanas en la restauración de los ecosistemas*, 31.

- Urquiza-Haas, T., Kolb, M., Koleff, P., Lira-Noriega, A. and Alarcón, J. (2009). Methodological approach to identify Mexico's terrestrial priority sites for conservation. *The Gap Analysis Program in Brief*, 61, 60 p.
- van der Horst, D. and Gimona, A. (2005). Where new farm woodlands support biodiversity action plans: a spatial multi-criteria analysis. *Biological Conservation*, 123(4), 421-432. doi: 10.1016/j.biocon.2004.11.020
- Villa, F., Tunesi, L. and Agardy, T. (2002). Zoning Marine Protected Areas through Spatial Multiple-Criteria Analysis: the Case of the Asinara Island National Marine Reserve of Italy. *Conservation Biology*, 16(2), 515-526. doi: 10.1046/j.1523-1739.2002.00425.x
- Wood, L. J. and Dragicevic, S. (2007). GIS-based multicriteria evaluation and fuzzy sets to identify priority sites for marine protection. *Biodiversity and Conservation*, 16(9), 2539-2558. doi: 10.1007/s10531-006-9035-8

Cuadro suplementario 2.1. Descripción y método de rasterización de los criterios que fueron sometidos al proceso de selección y priorización, para la identificación de áreas prioritarias para la conservación de *Crataegus* spp.

Criterio	Descripción	Fuente de información o capa original	Tipo de capa original/ Método de rasterización
Biológicos			
Riqueza de especies (RICH)	Número de especies diferentes que ocurren en un área específica.	Elaborado con DIVAGIS 7.0 (van y 2011)	Raster/NA
Diversidad fenotípica (DIVFEN)	Nivel de variación de características morfológicas que ocurre en un área específica.	Betancourt-Olvera <i>et al.</i> , 2018	Raster/NA
Diversidad ecogeográfica	Nivel de variación de condiciones ambientales contrastantes (adaptaciones diferentes) por unidad de área.	Elaborado con DIVmaps (Parra-Quijano <i>et al.</i> , 2015)	Raster/NA
Socio-económicos			
Porcentaje de la población con carencia por acceso a la alimentación	(Número de personas con carencia por acceso a la alimentación/Población total del municipio)*100	CONABIO, 2014a	Vectorial (Polígono)/ MAXIMUM AREA
Porcentaje de la población en condición de pobreza	(Número de personas en pobreza/Población total del municipio)*100	CONABIO, 2014b	Vectorial (Polígono)/ MAXIMUM AREA
Grado de marginación	Nivel de carencias que padece la población por falta de acceso a la educación, la residencia en viviendas inadecuadas, la percepción de ingresos monetarios insuficientes y las relaciones con la residencia en localidades pequeñas.		
Grado de rezago social	Relación de cuatro variables por municipio [1) rezago educativo; 2) acceso a los servicios de salud; 3) acceso a los servicios básicos, de calidad y espacios en la vivienda, y 4) activos en el hogar]		
Relación de población masculina y femenina	(Población masculina a nivel municipal/Población femenina a nivel municipal)		Vectorial (Polígono)/ MAXIMUM AREA
Porcentaje de adultos mayores	(Personas con rango de edad de 40 a 64 años a nivel municipal/Población total del municipio)*100	CONABIO, 2012a	Vectorial (Polígono)/ MAXIMUM AREA
Densidad de población	Indica el número de personas por unidad de superficie.	CONABIO, 2012b	Vectorial (Polígono)/ MAXIMUM AREA

Cuadro suplementario 2.1. Continuación...

Criterio	Descripción	Fuente de información o capa original	Tipo de capa original/ Método de rasterización
Nivel de presencia indígena	Proporción de población indígena por municipio.	CONABIO, 2014c	Vectorial (Polígono)/ MAXIMUM AREA
Valor del índice de desarrollo humano	Nivel de capacidades y libertades para tener una calidad de vida aceptable.	CONABIO, 2014d	Vectorial (Polígono)/ MAXIMUM AREA
Porcentaje de migración acumulada	(Personas que nacieron en otra entidad y que reside en el municipio/Población total del municipio)*100		Vectorial (Polígono)/ MAXIMUM AREA
Tipología municipal	Representa el tipo de municipio que deriva de la relación entre el número de habitantes por unidad de área. Puede ser municipio rural o urbano.	CONABIO, 2015	Vectorial (Polígono)/ MAXIMUM AREA
Porcentaje de la población ocupada en la actividad agropecuaria	(Población ocupada en la actividad agropecuaria a nivel municipal/Población total ocupada a nivel municipal)*100	CONABIO, 2012c	Vectorial (Polígono)/ MAXIMUM AREA
Ecológicos			
Áreas Naturales Protegidas (ANPs)	Áreas establecidas para proteger la biodiversidad nacional.	CONANP, 2017	Vectorial (Polígono)/ MAXIMUM AREA
Nivel de protección de ANPs	Grado de protección que ejerce un área protegida sobre los recursos naturales que ocurren en ella.	CONANP, 2017	Vectorial (Polígono)/ MAXIMUM AREA
Sitios prioritarios terrestres para la conservación de la biodiversidad	Áreas que de acuerdo a sus índices de biodiversidad representan extrema o baja prioridad para su conservación.	CONABIO <i>et al.</i> , 2008	Vectorial (Polígono)/ MAXIMUM AREA
Áreas elegibles para la conservación de la biodiversidad	Áreas con pago por servicios ambientales para proteger la biodiversidad.	CONABIO, 2014e	Vectorial (Polígono)/ MAXIMUM AREA
Áreas de agricultura temporal	Áreas donde la agricultura es considerada temporal por la disponibilidad de agua de lluvia durante el ciclo agrícola.	INEGI, 2009	Vectorial (Polígono)/ MAXIMUM AREA

Cuadro suplementario 2.1. Continuación...

Criterio	Descripción	Fuente de información o capa original	Tipo de capa original/ Método de rasterización
Áreas con bosques templados	Áreas con comunidades vegetales dominadas por árboles altos mayormente pinos y encinos acompañados por otras varias especies que habitan en zonas montañosas con clima templado a frío.	INEGI, 2009	Vectorial (Polígono)/ MAXIMUM AREA
Áreas con matorrales y pastizales submontanos	Áreas con comunidades vegetales que son producto del desmonte de terrenos boscosos.	INEGI, 2009	Vectorial (Polígono)/ MAXIMUM AREA
Culturales para silvestres			
Nombres comunes del tejocote silvestre	Número de nombres comunes que se adjudican al "tejocote" en un área específica.	Cuestionario 2016	Vectorial (Puntos)/ MAXIMUM
Tipos silvestres diferentes de tejocote	Número de tipos silvestres diferentes de tejocote que el agricultor identifica en áreas específicas.	Cuestionario 2016	Vectorial (Puntos)/ MAXIMUM
Pérdida de tipos silvestres diferentes de tejocote	De acuerdo a la percepción del agricultor, existe o no disminución de los tipos silvestres de tejocote que él reconoce en áreas específicas.	Cuestionario 2016	Vectorial (Puntos)/ MOST FREQUENT
Pérdida de tipos silvestres de tejocote por falta de conocimientos sobre usos, falta de consumo y/o falta de cultivo	La principal causa de pérdida de tipos silvestres de tejocote es la falta de conocimientos sobre sus usos, de consumo y de cultivo en áreas específicas	Cuestionario 2016	Vectorial (Puntos)/ MOST FREQUENT
Recolección de tejocotes silvestres para autoconsumo	La razón principal por la cual se recolectan los tejocotes silvestres es el autoconsumo en áreas específicas	Cuestionario 2016	Vectorial (Puntos)/ MOST FREQUENT
Recolección de tejocotes silvestres para venta	La razón principal por la cual en áreas específicas se recolectan los tejocotes silvestres es la venta.	Cuestionario 2016	Vectorial (Puntos)/ MOST FREQUENT
Usos de los tejocotes silvestres	Número de usos diferentes que se conocen del tejocote silvestre en un área específica (no necesariamente hace referencia a los usos que se le dan ahí).	Cuestionario 2016	Vectorial (Puntos)/ MAXIMUM
Nombres comunes del tejocote cultivado	Número de nombres comunes que se adjudican al "tejocote" en un área específica.	Cuestionario 2016	Vectorial (Puntos)/ MAXIMUM
Culturales para cultivados			
Variedades cultivadas de tejocote	Número de variedades cultivadas de tejocote en áreas específicas.	Cuestionario 2016	Vectorial (Puntos)/MAXIMUM
Pérdida de variedades cultivadas de tejocote	De acuerdo a la percepción del agricultor, existe o no disminución de los variedades cultivadas de tejocote que él reconoce en áreas específicas.	Cuestionario 2016	Vectorial (Puntos)/ MOST FREQUENT

Cuadro suplementario 2.1. Continuación...

Criterio	Descripción	Fuente de información o capa original	Tipo de capa original/ Método de rasterización
Pérdida de variedades cultivadas de tejocote por bajo precio de la producción y cambio por otros frutales	Pérdida de variedades cultivadas de tejocote por bajo precio de la producción y cambio por otros frutales	Cuestionario 2016	Vectorial (Puntos)/ MOST FREQUENT
Sustitución de variedades criollas por nuevas variedades de tejocote	Existe sustitución de variedades criollas por nuevas variedades de tejocote en áreas específicas.	Cuestionario 2016	Vectorial (Puntos)/ MOST FREQUENT
Cultivo de tejocote para autoconsumo	La razón principal por la cual en áreas específicas se cultiva el tejocote es el autoconsumo.	Cuestionario 2016	Vectorial (Puntos)/ MOST FREQUENT
Cultivo de tejocote para venta	La razón principal por la cual en áreas específicas se cultiva el tejocote es para venta.	Cuestionario 2016	Vectorial (Puntos)/ MOST FREQUENT
Usos del tejocote cultivado	Número de usos diferentes que se conocen del tejocote cultivado en un área específica (no necesariamente hace referencia a los usos que se le dan ahí).	Cuestionario 2016	Vectorial (Puntos)/ MAXIMUM
Número de plantas establecidas	Número de plantas de tejocote establecidas por unidad productiva.	Cuestionario 2016	Vectorial (Puntos)/ MEAN
Edad estimada de las plantas establecidas	Edad estimada de las plantas establecidas por unidad productiva.	Cuestionario 2016	Vectorial (Puntos)/ MEAN
Asociación de tejocote con otros cultivos	Plantaciones únicamente de tejocote o asociadas con otros frutales en las unidades productivas.	Cuestionario 2016	Vectorial (Puntos)/ MOST FREQUENT
Especies asociadas con el cultivo de tejocote	Número de especies asociadas con el cultivo de tejocote en las unidades productivas.	Cuestionario 2016	Vectorial (Puntos)/ MAXIMUM
Tipo de variedades cultivadas	Tipo de variedades de tejocote cultivadas en áreas específicas de acuerdo a su origen, pueden ser tradicionales (de mata) o seleccionadas.	Cuestionario 2016	Vectorial (Puntos)/ MOST FREQUENT