



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA
DE MÉXICO**

FACULTAD DE CIENCIAS

**Modelo de distribución potencial aplicado a
especies del género agave (Asparagaceae) para la
toma de decisiones en la industria mezcalera**

T E S I S

**QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:
B I Ó L O G A**

P R E S E N T A:
Laura Fernanda Castillo-Sánchez

DIRECTOR DE TESIS:

M. en C. Jorge Alberto Escutia Sánchez



Ciudad Universitaria, Cd. Mx., 2022



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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

Agradecimientos formales

A la empresa que brindo su apoyo y confianza esperando que lo escrito en esta tesis sea de su utilidad.

Al Centro de Ciencias de la Complejidad (C3) por albergar y apoyar este proyecto.

A Consúltanos MX por generar el vínculo Empresa – Academia que permitió realizar este proyecto.

A la Facultad de Ciencias de la Universidad Nacional Autónoma de México por formarme en mi carrera universitaria.

A mi director de tesis, a mis asesores, a mis sinodales y colegas por ayudarme con la revisión de este proyecto tan ambicioso.

Agradecimientos personales

Espere bastante tiempo para escribir esta parte de la tesis y espero compartan mi emoción cuando comiencen a leer este texto. Después de algunos temas de tesis fallidos, tres asesores diferentes y muchas lágrimas y esfuerzo, se logró.

Arriba el ánimo abuelita que esta tesis es para ti, por todo el amor y tiempo que me has dado, eres esa luz que ilumina mis días grises.

A mis papás, Juanita gracias por confiar en mis habilidades y escucharme, aunque no entendieras de que estaba hablando; a Josecito por siempre echarme porras y hacerme darme cuenta que en definitiva no quería estudiar medicina.

A mis hermanos, Itzel gracias por la paciencia y los cocos, eres mi mejor amiga; Xavi, gracias por ayudarme a comerte mis problemas, tu sonrisa hace palpar mi corazón.

A mi familia, por soportarme en las fiestas mientras redactaba y por apoyarme en mis momentos oscuros. Abeles y Elsas, este logro también es para ustedes.

A mi familia de carrera, Salvis, Hugo, Alo, gracias por ayudarme y guiarme en el camino.

A mis amigos por las risas y las enseñanzas.

A todos mis colegas y compañeros de clase, gracias por enseñarme a ser una mejor bióloga.

Al ADMV por estar siempre conmigo, en las buenas y en las malas. Fuiste y eres un pilar para este proyecto.

Índice

I.	Resumen.....	5
II.	Introducción.....	7
I.	El género <i>Agave</i>	7
a)	Taxonomía.....	7
b)	Morfología.....	8
II.	Denominaciones de origen en México.....	15
a)	Denominación de Origen Mezcal.....	17
b)	Mezcal.....	19
c)	Impactos ambientales.....	21
III.	Nicho ecológico.....	21
a)	Tipos de nichos.....	23
b)	Modelos de distribución potencial del género <i>Agave</i>	25
III.	Definición del problema y justificación.....	28
IV.	Objetivos e hipótesis.....	30
I.	General.....	30
II.	Particulares.....	30
III.	Hipótesis.....	30
V.	Metodología.....	31
I.	Revisión técnica, taxonómica y biológica de las especies de agave.....	31
II.	Mapas de distribución potencial.....	35
III.	Diseño de estrategia.....	37
VI.	Resultados.....	39
I.	Revisión técnica, taxonómica y biológica de las especies de agave.....	39
II.	Mapas de distribución potencial.....	46
III.	Diseño de estrategia.....	67
VII.	Discusión.....	79
I.	Revisión técnica, taxonómica y biológica de las especies de agave.....	79
II.	Mapas de distribución potencial.....	89
III.	Diseño de estrategia.....	96
VIII.	Conclusión.....	100
IX.	Bibliografía.....	101
	Anexo 1: Variables del modelo de distribución potencial.....	113
	Anexo 2: Ficha técnica de <i>Agave angustifolia</i>	114
	Anexo 3: Ficha técnica de <i>Agave cupreata</i>	117
	Anexo 4: Ficha técnica de <i>Agave marmorata</i>	119
	Anexo 5: Área accesible de las especies de <i>Agave</i> estudiadas.....	121
	Anexo 6: Guion entrevista.....	123

I. Resumen

El género *Agave* (Familia Asparagaceae), también conocidos como magueyes o mezcales, son plantas que tienen una gran importancia económica, ambiental y cultural en México; se han utilizado de diversas formas. Actualmente, el modo más común de su uso, cultivo y selección de especies es por la producción de bebidas destiladas y otros derivados. El mezcal es una bebida destilada con Denominación de Origen, de acuerdo con la NOM-070-SCFI-2016, todas las especies del género pueden ser utilizadas para la producción de esta bebida espirituosa. *Agave angustifolia* es la especie más utilizada para su producción, generando así modalidades productivas intensivas. Además, de la recolección de especies silvestres también utilizadas para la producción de mezcal, ambas modalidades tienen costos ambientales y podrían provocar la desaparición de poblaciones silvestres. Los modelos de distribución potencial pueden ser utilizados para prospección, investigación y planificación de los sistemas productivos y de las poblaciones silvestres de los agaves. Es por esto que esta investigación tiene como objetivo elaborar mapas de distribución potencial con datos de libre acceso de tres especies de *Agave* utilizadas en la producción de mezcal en áreas con Denominación de Origen Mezcal para la toma de decisiones en la industria mezcalera. Las especies seleccionadas fueron: *A. angustifolia*, *A. cupreata* y *A. marmorata*. Se realizó una revisión técnica (en la cual se recabó información sobre el estado del arte en línea de las especies), taxonómica y biológica de las estas, proceso que permitió corroborar la sistemática y taxonomía de las especies, necesaria para la elaboración de los mapas de distribución potencial. Además, se generaron infografías y fichas técnicas de cada especie. Para la elaboración de los modelos de distribución potencial, se utilizaron los registros de presencia de tres herbarios digitales de acceso libre, mapas del Geoportal de CONABIO y 58 variables. Los softwares utilizados fueron QGIS 3.4, ILWIS 3.7, R Studio y MaxEnt. Los registros de las especies, obtenidos por medio de herbarios digitales de acceso libre, fueron depurados bajo tres criterios, posteriormente, se les aplicaron dos pruebas

estadísticas. Al igual que los registros, las variables pasaron por un tratamiento y se les aplicó una prueba estadística para la selección de las variables que no tuvieran autocorrelación. Los modelos obtenidos se validaron con el área bajo la curva y con una prueba binomial. Los mapas obtenidos se recortaron a la Denominación de Origen Mezcal, identificando áreas con idoneidad ambiental para cada especie. Así mismo, la distribución potencial fue superpuesta con las vías de comunicación, la hidrografía y con Open Street Map, (proyecto colaborativo que permite crear mapas libres y editables, las contribuciones añaden datos sobre caminos, senderos, estaciones, etc.). Por último, para el diseño de la estrategia de toma de decisiones, se realizó una búsqueda sistemática de información, que permitió generar un cuadro comparativo, designar un panel de expertos e identificar las problemáticas y sus posibles soluciones, utilizando los mapas y la información obtenida para la realización de las infografías. Se considera como una recomendación final el que se debe considerar la producción de mezcal y sus implicaciones con la misma importancia que se le brinda a la producción de tequila y café en México, como consecuencia, se podrían generar cambios importantes en el mercado y seguramente en las poblaciones de las especies vegetales utilizadas en la industria, además, contar con una estrategia que permita generar una trazabilidad sustentable en todos los aspectos de la cadena de valor sustentabilidad y vincular estos procesos con la academia-empresa-gobierno beneficiara la estructura actual de la industria mezcalera.

II. Introducción

I. El género *Agave*

a) Taxonomía

La subfamilia Agavoideae pertenece a la familia Asparagaceae, la cual es endémica del continente americano, abarcando desde el sur de Canadá hasta Sudamérica, incluyendo las islas del Caribe (García-Mendoza y Galván, 1995; García-Mendoza *et al.*, 2019). Dentro de la subfamilia Agavoideae, el género *Agave* es el género que cuenta con un mayor número de especies registradas (García-Mendoza, 2002; García-Mendoza *et al.*, 2019). Aproximadamente cuenta con 210 especies, siendo México, Estados Unidos de América, Cuba y Guatemala los países que se registran con mayor diversidad. En México se distribuyen 159 especies de las cuales 129 son endémicas del país (García-Mendoza, 2007; Villaseñor, 2016; García-Mendoza *et al.*, 2019).

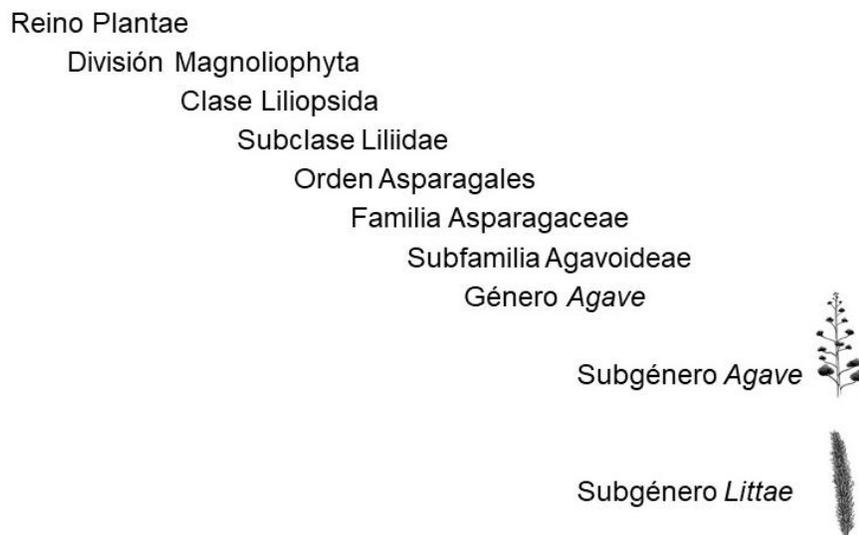


Figura 1. Taxonomía del género *Agave*.

Elaborado con base en Gentry, 1982 y García-Mendoza *et al.*, 2019.

El género *Agave* se divide en dos subgéneros correspondiente con su estructura floral: *Littaea* y *Agave* (Figura 1). Distinguidos por presentar una estructura floral espigada o paniculada, respectivamente (Gentry, 1982; Eguiarte *et al.*, 2000; García-Mendoza, 2007; Gil-Vega *et al.*, 2007). Gentry (1982) describió 12 grupos de especies para el subgénero *Agave* y ocho para el subgénero *Littaea* (Figura 2).

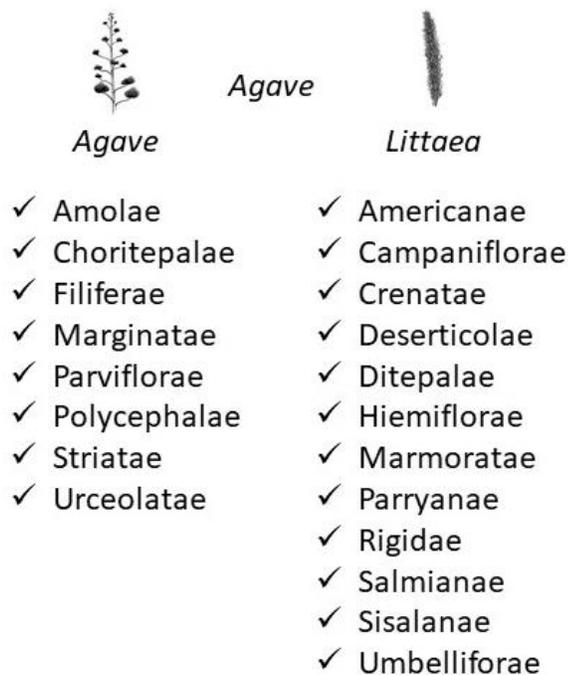


Figura 2. Grupos de los subgéneros *Agave* y *Littaea*.

Elaborado con base en Gentry, 1982

b) Morfología

La descripción morfológica del género *Agave* descrita a continuación se realizó con base en los siguientes autores: Gentry (1982), García-Mendoza y Lot (1994), Eguiarte y colaboradores (2000), García-Mendoza (2007, 2011), Gil-Vega y colaboradores (2007), Esparza-Ibarra y colaboradores (2015) y García-Mendoza y colaboradores (2019).

Los agaves, son plantas hermafroditas y monocotiledóneas que se caracterizan por ser perennes y rosetófilas, acaules o caulescentes, simples o coloniales (Figura 3). Con tallos gruesos, cortos y con raíces fibrosas. Las hojas se encuentran dispuestas en espiral sobre el tallo, pueden ser densas o laxas, lineares, lanceoladas, espatuladas u ovadas (Figura 4), el número de hojas depende de la especie, ya que pueden tener de cinco a 10 o 150 a 200; el ápice cuenta con una espina terminal o este puede encontrarse ligeramente endurecido pudiendo medir desde algunos milímetros hasta cinco centímetros, con colores desde verdes oscuros hasta rojizos. Los márgenes ocasionalmente presentan mamilas, además, poseen una gran diversidad morfológica ya que estos pueden ser dentados, denticulados, córneos o filíferos, rígidos, lisos, estriados o escabrosos, generalmente glabras.



Figura 3. Características del género Agave.

Elaboración propia, imágenes obtenidas del Banco de imágenes de CONABIO

La inflorescencia surge del meristemo apical, siendo espiciformes o paniculadas con numerosas umbelas, ocasionalmente con bulbilos, sobre un pedúnculo semileñoso, bracteado y bracteolado. Las flores son pediceladas o sésiles, erectas, succulentas, constreñidas sobre el ovario, estas pueden llegar a ser verdosas, amarillentas, blanquecinas o purpúreas; con seis tépalos, en dos verticilos, similares, imbricados, libres o fusionados en un perigonio tubular, hipocrateriforme, infundibuliforme o campanulado, con el ápice recto o recurvado; con tres nectarios; seis estambres, libres o insertos en el tubo, exertos, filamentos filiformes, anteras dorsifijas, versátiles, y con dehiscencia longitudinal; el ovario es cilíndrico o triquétro, prolongado en un cuello, con tres carpelos, trilocular, estilo exerto, filiforme, el estigma es trilobulado, glandular papiloso. Las cápsulas son leñosas con dehiscencia loculicida septifragal; las semillas lunulares, triangulares, aplanadas, angostamente aladas en su porción convexa, negras y brillantes.

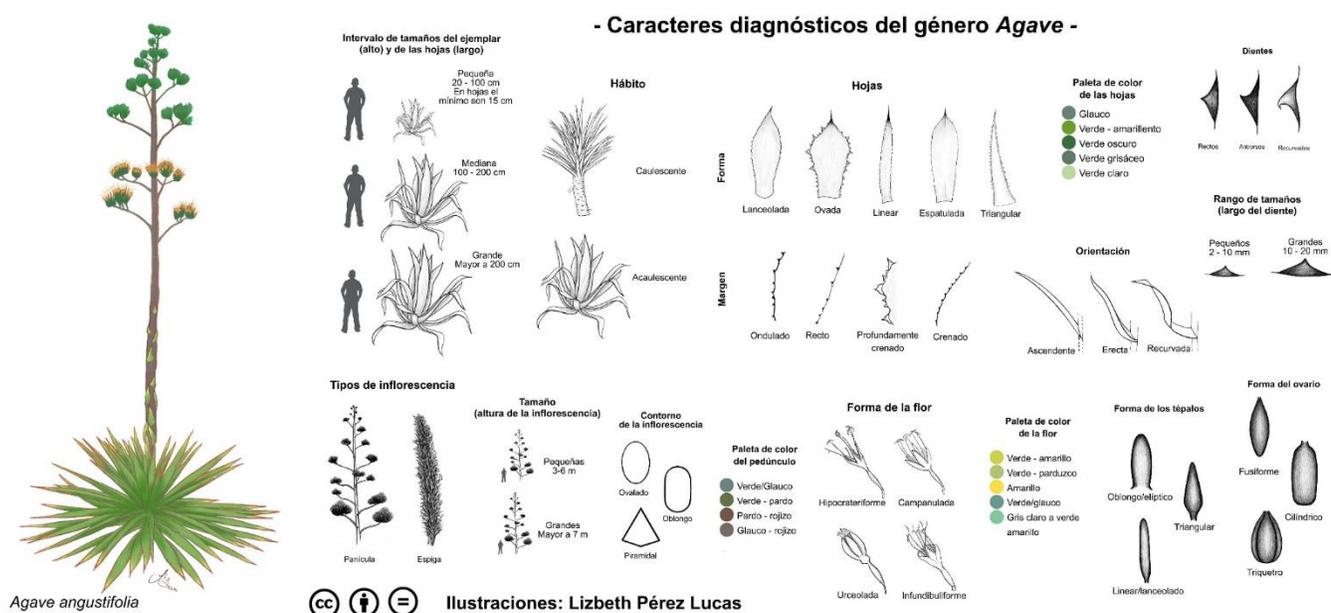


Figura 4. Infografía de los caracteres diagnósticos del género *Agave*.

Obtenida de www.agavesdeamerica.org

c) Distribución en México

Algunas especies del género *Agave* cuentan con una amplia distribución, mientras que otras, se consideran con una distribución restringida, es así que existen regiones con alta riqueza de especies. Las zonas más diversas son las provincias áridas y semiáridas del centro y norte del país, pero su número disminuye hacia las provincias húmedas y cálidas del sur (García-Mendoza, 2007). Los agaves pueden crecer en una variedad de ambientes, como en planicies, montañas, acantilados, dunas costeras o en los picos montañosos, preferentemente entre los 1,000 y los 2,000 mil metros sobre el nivel del mar (msnm), donde se encuentra la mayor riqueza hasta los 3400 msnm (García-Mendoza, 2007, 2017; García-Mendoza *et al.*, 2019).

En el 2006, la Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (CONABIO por sus siglas) presentó una infografía con la distribución de 14 especies utilizadas en la producción de mezcal (Figura 5).



Figura 5. Mapa Agave, mezcales y diversidad.

Obtenida de CONABIO, 2006

La información descrita en la infografía, muestra los resultados de proyectos financiados por la misma institución. El proyecto V09 “Sistemática y distribución actual de los *Agave* spp mezcaleros”, dirigido por el Dr. Abisaí García Mendoza (García-Mendoza, 2003); y el proyecto CS007 “Base de datos de nombres técnicos o de uso común en el aprovechamiento de los agaves en México”, dirigido por la Dra. Silvia Patricia Colunga García Marín (Colunga-GarcíaMarín, 2006).

d) Estatus de conservación en México NOM-059-2010

Para el año 2015, cuatro especies del género *Agave* fueron consideradas como “especies prioritarias para su conservación”: *Agave angustifolia* Haw var. *angustifolia*, *A. nizandensis* Cutak, *A. parviflora* Torr. y *A. victoriae.reginae* T. Moore (SEMARNAT, 2015). La Norma Oficial Mexicana 059 (NOM-059-SEMARNAT-2010) considera 22 especies del género *Agave* (DOF, 2019) (Cuadro 1).

Cuadro 1. Especies del género *Agave* en la NOM-059-SEMARNAT-2010. Elaboración propia con base en el Anexo Normativo III de la Norma, 2019.

Nombre científico	Nombre común	Distribución	Categoría de Riesgo
<i>A. abisaii</i> A&N	Maguey	Endémica	A
<i>A. andreae</i> S&V	Maguey de piedra	Endémica	A
<i>A. bracteosa</i> S. W.	Maguey huasteco	Endémica	P
<i>A. chiapensis</i> J.	Maguey chamula	Endémica	Pr
<i>A. congesta</i> G.	Maguey tzotzil	Endémica	Pr
<i>A. dasylirioides</i> J. & B.	Maguey	Endémica	A
<i>A. guiengola</i> G.	Maguey plateado	Endémica	P
<i>A. gypsophila</i> G.	Maguey gipsófilo	Endémica	A
<i>A. impressa</i> G.	Maguey	Endémica	A
<i>A. kewensis</i> J.	Maguey del Grijalva	Endémica	P
<i>A. kristenii</i> A. V. & C.	Maguey	Endémica	A
<i>A. nizandensis</i> C.	Maguey	Endémica	P
<i>A. ornithobroma</i> G.	Maguey	Endémica	Pr
<i>A. pablocarrilloi</i> V., M-C. & P-L	Maguey de piedra	Endémica	A

Cont. cuadro 1. Especies del género *Agave* en la NOM-059-SEMARNAT-2010.

Elaboración propia con base en el Anexo Normativo III de la Norma, 2019.

Nombre científico	Nombre común	Distribución	Categoría de Riesgo
<i>A. parrasana</i> A. B.	Maguey de Parras	Endémica	Pr
<i>A. parviflora</i> T.	amole, taiehcholi, Guarijío, Maguey sóbari	Endémica	A
<i>A. peacockii</i> C.	cacaya, lechuguilla, maguey de ixtle, Maguey fibroso	Endémica	Pr
<i>A. polianthiflora</i> G.	Maguey de colibrí	Endémica	A
<i>A. titanota</i> G.	Maguey del sol	Endémica	A
<i>A. vera-cruz</i> M.	Maguey		P
<i>A. victoriae-reginae</i> T. M.	agave, agave victoria, pintilla	Endémica	P
<i>A. vizcainoensis</i> G.	Maguey	Endémica	A

e) Usos

En México, los agaves tuvieron y continúan teniendo una gran importancia eco-nómica, ambiental y cultural para los pueblos indígenas y mestizos; estas plantas se han aprovechado desde la prehistoria en Mesoamérica hasta la actualidad de diversas formas como: alimento, bebida (fermentada o destilada), medicina, combustible, cobijo, ornato, fibras (ixtle), abono, jabón, juguetes, construcción de viviendas, elaboración de implementos agrícolas, entre otros usos (Figura 6) (Colunga-GarcíaMarín y Zizumbo-Villareal, 2006; Colunga-GarcíaMarín *et al.*, 2007; García-Mendoza, 2007; Esparza-Ibarra *et al.*, 2015; Colunga-GarcíaMarín *et al.*, 2017). Actualmente, el modo más común de uso, cultivo y selección de especies de *Agave* es por la producción de los destilados: tuxca, tequila, raicilla, bacanora y el mezcal (Colunga-GarcíaMarín *et al.*,

2017). Las bebidas anteriores forman parte del acervo de Denominaciones de Origen mexicanas y validadas por la Organización Mundial de la Propiedad Industrial (OMPI por sus siglas).



Figura 6. Usos del género *Agave*.

Elaboración propia con fotografías de: 1) Ing. Francisco Olachea, 2019-2020; 2) Arq. Verónica Díaz, [2019](#); 3) Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera, [2018](#); 4) Fototeca Nacional INAH, [1940](#); 5) Consejo Regulador de Mezcal, [2018](#); 6) Inulina de Agave, [Green House](#); 7) Vitaextrae Saponinas, [Parvitra](#); 8) Sin Embargo, [2011](#); 9) Foto Izquierda: G.M. Feinman y L. Nicholas, [2011](#)., Derecha: Reprografía de Marco Antonio Pacheco; 10) Animal Gourmet, [2016](#); 11) Miel de Agave, [2020](#).

II. Denominaciones de origen en México

La Denominación de Origen (*DO*) se define como el nombre de una región o lugar geográfico de un país que sirve para designar un producto originario, cuya calidad o características se deben exclusivamente a ese medio geográfico, resultado tanto de factores naturales como humanos (IMPI, 2017). El Instituto Mexicano de Propiedad Industrial (IMPI por sus siglas) es la institución encargada de reconocer las denominaciones de origen (Ley de Propiedad Industrial, Art. 156).

La *DO* es una figura jurídica reconocida internacionalmente para garantizar la autenticidad, calidad del producto y para salvaguardar los derechos de los productores, es decir, la *DO* genera ventaja competitiva, protege el patrimonio productivo y mantiene la esencia de los productos (las técnicas de fabricación o cultivo) (Miranda, 2003; Carrillo-Trueba, 2007).

Actualmente, México cuenta con 18 Denominaciones de Origen, distribuidas en diferentes estados de la República (Cuadro 2).

Cuadro 2. Denominaciones de Origen en México. Elaboración propia, información obtenida de: IMPI 2019, DOF, 1994ab, 1995, 2000ab, 2002, 2003ab, 2009, 2010, 2012, 2016, 2018, 2019, 2020.

Denominación de Origen	Año de declaración	Producto	Estado(s)	Género/especie
Mango Ataulfo	2003	Alimento	Chiapas	<i>Mangifera indica</i> L. var. <i>ataulfo</i>
Vainilla de Papantlá	2009	Alimento	Veracruz y Puebla	<i>Vanilla planifolia</i> A.
Chile habanero de la península de Yucatán	2010	Alimento	Campeche, Quintana Roo y Yucatán	<i>Capsicum chinense</i> J.
Arroz de estado de Morelos	2012	Alimento	Morelos	<i>Oryza sativa</i> L. subsp. <i>Indica</i>
Cacao de Grijalva	2016	Alimento	Tabasco	<i>Theobroma cacao</i> L.
Yahualica	2018	Alimento	Jalisco y Zacatecas	<i>Capsicum annum</i> L.

Cont. Cuadro 2. Denominaciones de Origen en México. Elaboración propia, información obtenida de: IMPI 2019, DOF, 1994ab, 1995, 2000ab, 2002, 2003ab, 2009, 2010, 2012, 2016, 2018, 2019, 2020.

Denominación de Origen	Año de declaración	Producto	Estado(s)	Género/especie
Olinalá	1994	Artesanía	Guerrero	No aplica
Talavera de Puebla	1997	Artesanía	Puebla	No aplica
Tequila	1977	Bebida	Guanajuato, Jalisco, Durango, Zacatecas, San Luis Potosí, Tamaulipas, Oaxaca, Guerrero, Puebla, Aguascalientes, Guanajuato, Morelos, México	<i>Agave tequilana</i> F. A. C. W. var. <i>azul</i>
Mezcal	1994	Bebida	Oaxaca, Guerrero, Puebla, Aguascalientes, Guanajuato, Morelos, México	<i>Agave</i> sp.
Bacanora	2000	Bebida	Sonora	<i>Agave angustifolia</i> H.
Sotol	2002	Bebida	Chihuahua	<i>Dasyilirion</i> sp.
Charanda	2003	Bebida	Michoacán	<i>Saccharum officinarum</i> L. <i>Agave maximiliana</i> B., <i>A. inaequidens</i> K.K., <i>A. valenciana</i> C. & A. V., <i>A. angustifolia</i> H., <i>A. rhodacantha</i> T., entre otros. Con excepción de <i>A. tequilana</i> F. A. C. W. var. <i>azul</i>
Raicilla	2019	Bebida	Jalisco y Nayarit	<i>Coffea arabica</i> L.
Café de Veracruz	2000	Café	Veracruz	<i>Coffea arabica</i> L.
Café de Chiapas	2003	Café	Chiapas	<i>Coffea arabica</i> L. var. <i>typica</i> , <i>C. arabica</i> L. var. <i>pluma</i> , <i>C. L. arabica</i> var. <i>bourbon</i> , <i>C. arabica</i> L. var. <i>mango</i> , <i>C. arabica</i> L. var. <i>marsellesa</i> , <i>C. arabica</i> L. var. <i>oro</i> , <i>C. arabica</i> L. var. <i>sarchimor</i> , <i>C. arabica</i> L. var. <i>geisha</i> y <i>C. arabica</i> L. var. <i>java</i>
Pluma	2020	Café	Oaxaca	No aplica
Ámbar de Chiapas	2000	Piedra	Chiapas	No aplica

a) Denominación de Origen Mezcal

La Denominación de Origen del Mezcal (*DOM*) fue aprobada en 1994 y está regulada por la norma oficial NOM-070-SCFI-2016. De acuerdo con la norma de 1994, la producción de mezcal se podía realizar con las siguientes especies de *Agave*: *A. angustifolia* Haw., *A. esperrima* Jacobi (aunque la norma identifica a *esperrima*, la especie correcta es *asperrima*), *A. weberi* Cela, *A. potatorum* Zucc. y *A. salmiana* Otto ex Salm (Figura 7), además, establecía que se podía utilizar cualquier otra especie, siempre y cuando no se utilizara como materia prima para la elaboración de otras bebidas con Denominación de Origen en el mismo estado (DOF 1994).

*Agave angustifolia**Agave asperrima**Agave weberi**Agave potatorum**Agave salmiana*

Figura 7. Especies del género *Agave* establecidas para la producción de mezcal, NOM-070-SCFI-1994.

Elaboración propia con fotografías del Banco de imágenes de CONABIO.

No obstante, se realizó una modificación a la misma en el año 2016, en la cual indica que cualquier especie del género *Agave* puede ser utilizada para la producción de mezcal (DOF, 2016).

La Declaratoria de la *DOM* ha sido modificada continuamente con los años y se han agregado municipios y estados, entre los que se incluyen: todos los municipios de los estados de Oaxaca, Guerrero, Zacatecas, San Luis Potosí y Durango, 115 de Puebla, 29 de Michoacán de Ocampo, 22 de Morelos, 12 del Estado de México, 11 de Tamaulipas, 6 de Aguascalientes y 2 de Guanajuato, en total 1,003 municipios de México cuentan con *DOM* (Figura 8) (DOF, 1994, 2003, 2012, 2015a, 2015b, 2018a, 2018b y 2018c).

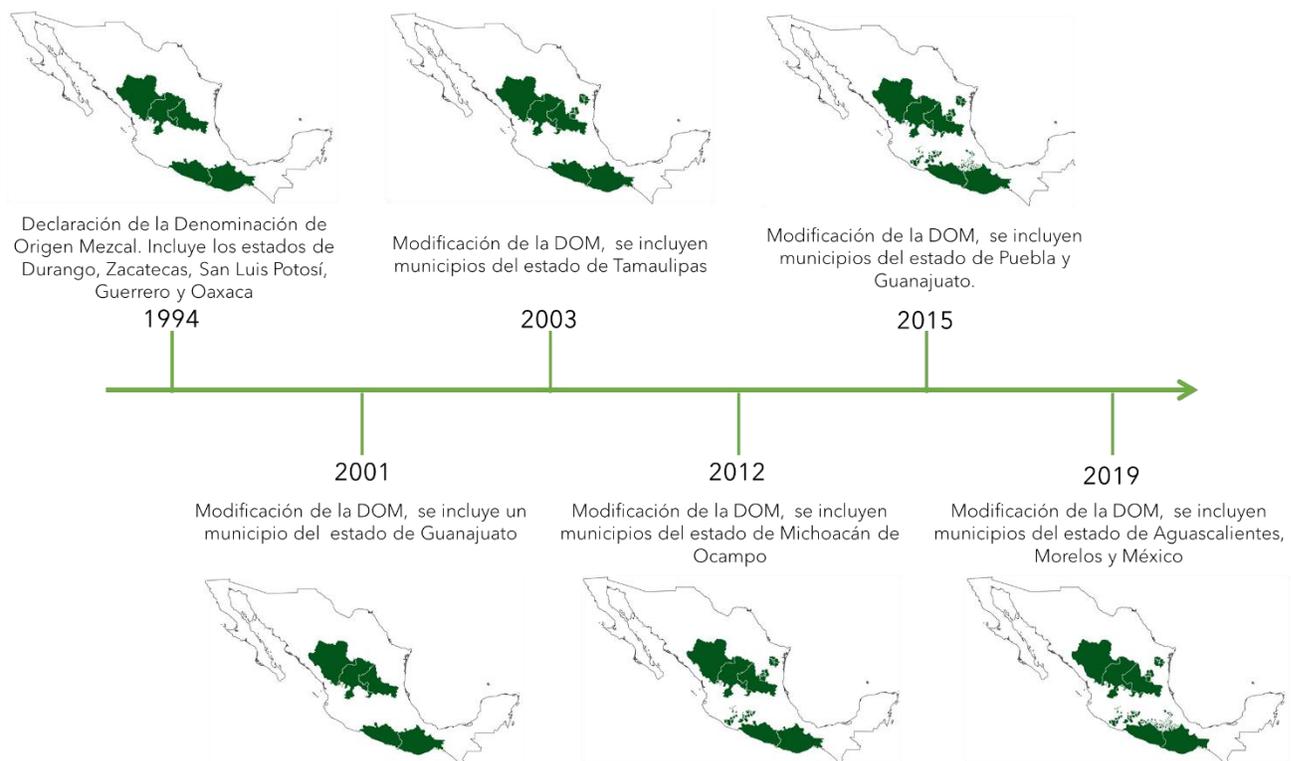


Figura 8. Línea del tiempo de las modificaciones de la Denominación de Origen Mezcal

Elaboración propia.

b) Mezcal

La palabra mezcal proviene del náhuatl *mexcalli*, *metl*=agave y *calli*=cocido, que significa “maguey cocido”. El nombre de “mezcal” se asignó por la llamada región del mezcal en el estado de Oaxaca (Colunga-GarcíaMarín y Zizumbo-Villareal, 2006; Carrillo-Trueba, 2007; Colunga-GarcíaMarín *et al.*, 2007, 2017; García-Mendoza, 2007; Zizumbo-Villareal *et al.*, 2013). Este destilado es obtenido por procesos artesanales o por procesos tecnificados, en las que se incluyen las siguientes etapas de producción: la selección y corte de la materia prima (jima), la cocción del Agave, la molienda del mosto, la fermentación del jugo, la destilación, la rectificación y la maduración del destilado (Figura 9) (CONABIO, 2006, Colunga-



Figura 9. Proceso de elaboración del mezcal.

Elaboración propia con fotografías del Ing. Francisco Olachea

GarcíaMarín *et al.*, 2006; Pérez-Hernández *et al.*, 2016, Martínez *et al.*, 2019).

Para el año 2015, el Consejo Regulador de la Calidad de Mezcal A.C. (CRM) registró 526 asociados: 494 productores de mezcal y 301 productores de Agave, sin embargo, la página no se encuentra actualizada con los nuevos municipios incluidos en la Denominación de Origen pertenecientes a los estados de Morelos y México <<http://www.mezcal.com/es/productores.php>>. Considero importante mencionar que hay productores de mezcal o Agave que no se han registrado ante el CRM y venden sus productos sin la certificación oficial.

En el informe estadístico del 2020 publicado por el CRM, el estado con mayor producción de mezcal fue Oaxaca, con una producción del 92.7%, seguido por Puebla con el 2.2% y Durango con el 1.7%. Además, la especie más utilizada para la producción de mezcal desde el 2011 es *Agave angustifolia*, en el 2020 el 90% de la producción fue realizada con esta especie. El 10% restante se divide entre *A. cupreata* (2%), *A. potatorum* (1.2%), *A. durangensis* (1.7%), *A. karwinskii* (0.9%), *A. marmorata* (0.6%), *A. tequilana* (0.6%) y 42 magueyes distintos (2.6%), no obstante, me gustaría resaltar que debido a sinonimias y nombres comunes de las especies (Colunga-GarcíaMarín, 2006a, 2006b), el número de magueyes utilizados para la producción de mezcal varía.

El crecimiento en el consumo de esta bebida (Pérez *et al.*, 2016; CRM., 2020) podría ser una oportunidad para propiciar la conservación de la biodiversidad, dado que la calidad del producto también se encuentra en las prácticas de producción y la relación con el ambiente, hay que prepararse y generar autenticidad, identidad, cultura, sostenibilidad y calidad (Larson, 2006;

Pérez *et al.*, 2016). Debido al aumento de la demanda de mezcal, se ha generado presión en las plantaciones y poblaciones de los Agaves (sobre todo en *A. angustifolia*) (Aguirre y Eguiarte, 2013; Martínez *et al.*, 2019).

c) Impactos ambientales

La producción de bebidas destiladas trae consigo costos ambientales relacionados con la diversidad de los agaves y al ecosistema en el que se distribuyen. Dentro de los principales impactos negativos, se encuentran (Hernández, 2003; SEMARNAT, 2021; Romero, 2021):

- Desertificación
- Modificaciones en el pH del suelo
- Deforestación
- Altas emisiones de CO²e
- Pérdida de diversidad genética
- Uso de plaguicidas
- Contaminación de suelo y agua (vinazas)
- Deterioro del paisaje
- Desplazamiento de fauna

III. Nicho ecológico

Los nichos ecológicos describen la interacción de las especies con el medio ambiente en distintas escalas espacio-temporales, también se han utilizado para delimitar ubicaciones geográficas de distintas especies (Chase y Leibold, 2003; Téllez-Valdés y Dávila-Aranda, 2003; Leibold y Geddes, 2005; Téllez-Valdés *et al.*, 2007).

Desde 1917 hasta la actualidad se han realizado definiciones y revisiones sobre los modelos de nicho ecológico, no obstante, en este texto únicamente se

abordarán los que se han considerado más importantes. La primera definición fue propuesta en 1917 por Joseph Grinnell, quien lo definió como “la unidad de distribución más pequeña, dentro de la cual, cada especie se mantiene debido a sus limitaciones instintivas y estructurales”, esta definición considera las condiciones ambientales como las principales limitantes de los nichos de las distintas especies. Diez años después, Charles Elton (1927), propuso en su libro “Animal Ecology” una definición basándose en la teoría ecológica: “el lugar que ocupa la especie en el medio biótico; es decir, su relación con los recursos y su interacción con otras especies”, a diferencia de la definición propuesta por Grinnell, esta definición establece a las interacciones bióticas como la principal limitante del nicho de las especies. Por último, George Hutchinson (1957), define el nicho ecológico como: “todas aquellas condiciones óptimas en el hipervolumen n-dimensional en las cuales la especie puede y podría lograr su desarrollo y subsistencia”, entendiéndolo como el conjunto de las condiciones bióticas y abióticas bajo las cuales una especie puede prosperar indefinidamente en un espacio y tiempo determinado.

Por otra parte, Soberón y Peterson (2005) han considerado que la distribución de cada organismo está determinada por diferentes factores: condiciones abióticas, factores bióticos, regiones geográficas accesibles para cada especie y la capacidad evolutiva de adaptarse a condiciones nuevas, tomando en cuenta que el nicho de una especie determina su distribución y la abundancia (Ballesteros-Barrera, 2011).

a) Tipos de nichos

En este proyecto de investigación, únicamente se considerarán los nichos determinados por la definición de Hutchinson: el fundamental y el realizado. Además, utilizaremos la división del área de interés en: ocupada, potencial y colonizable. Con base en esta afirmación, el nicho fundamental es una intersección entre la fisiología de la especie y las restricciones ambientales, mientras que, dentro de la definición de nicho realizado, además de considerar la fisiología de la especie y las restricciones ambientales, también se incluyen las interacciones bióticas (Guisan y Zimmerman, 2000, Soberón y Peterson, 2005; Soberón *et al.*, 2017).

Al comprender la teoría de nichos ecológicos, se han establecido métodos (con ayuda de algoritmos, softwares, SIG) que permiten modelar los nichos ecológicos de las especies. No obstante, la información que se tiene sobre las especies y las interacciones bióticas que tienen con otras especies es limitada. Soberón y Peterson (2005), realizaron el diagrama *BAM* en el cual podemos identificar que en el universo G , las condiciones abióticas están ejemplificadas con la letra A , la letra B corresponde a las condiciones bióticas y la M al área accesible para la especie (Soberón y Peterson, 2005; Soberón *et al.*, 2017). El área donde se intersecan los subconjuntos A , B y M , corresponde al área ocupada por la especie G_0 ; por otro lado, el área de intersección entre las condiciones bióticas y abióticas es un área que cuenta con las condiciones adecuadas para que pueda habitar la especie, sin embargo, el área no ha sido accesible para la especie, esta zona corresponde con un área de potencial de invasión (G_i); la suma de G_0 y G_i

corresponde con la geografía potencial o GP. Entonces, los Modelos de Nicho Ecológico (*MNE*) permiten llegar a una estimación del nicho fundamental, es decir, GP, si se considera al factor B, o simplemente el factor A si no se considera a B en el diagrama de BAM (Figura 10) (Mota-Vargas *et al.* 2020).

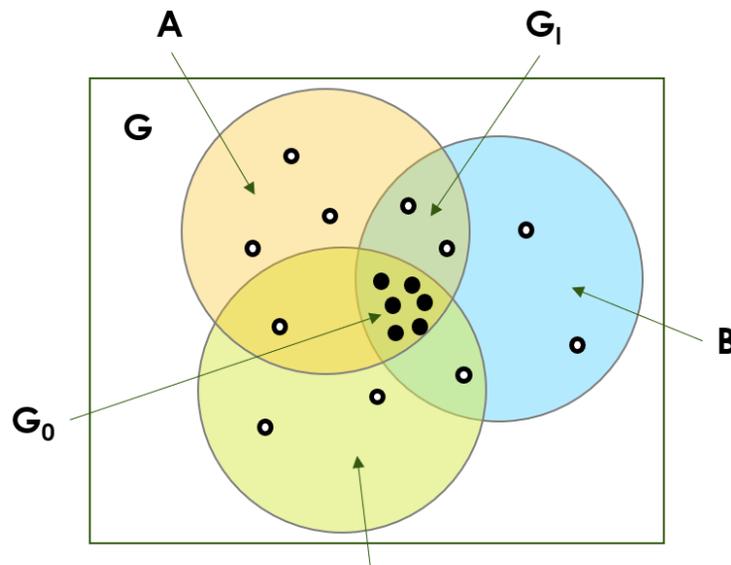


Figura 10. Diagrama BAM.

Tomado y modificado de Soberón *et al.*, 2017

Los modelos de distribución potencial son el resultado de la representación espacial de las condiciones ambientales idóneas en las que puede habitar la especie (Guisan y Zimmerman 2000; VillaSeñor y Téllez-Valdés, 2004; Mateo *et al.* 2011; Morales, 2012; Cruz-Cárdenas *et al.*, 2014).

Los modelos pueden tener diferentes aplicaciones: prospección, investigación y planificación (Decoursey, 1992), las cuales son importantes para el fin de este proyecto. Felicísimo y colaboradores (2011) utilizaron los MDP a modo de orientación en la prospección del territorio español con el objetivo de identificar

zonas idóneas para la flora vascular española. Por otro lado, Cruz-Cárdenas y colaboradores (2016) utilizaron los modelos a modo con fines de investigación y planificación para conocer el impacto del cambio climático en especies de la familia Pinaceae.

b) Modelos de distribución potencial del género *Agave*

El género *Agave* ha tenido y continúa teniendo una gran importancia cultural y económica en nuestro país, los modelos de distribución potencial se han utilizado para identificar áreas potenciales para cultivar, propagar y aprovechar especies de *Agave* (Cuadro 3).

Cuadro 3. Proyectos de distribución potencial de especies del género *Agave*.

Elaboración propia

Autores	Año	Titulo	Resumen
Flores-Spindola, B.M., Espinosa-Trujillo,E., Mireles-Arriaga, A.I., Ruiz-Nieto, J.E., Hernández-Ruíz, J.	2018	Análisis económico de áreas con potencial para el cultivo de <i>Agave cupreata</i> en el estado de Guanajuato	<p>Determinaron áreas potenciales para el cultivo de <i>A. cupreata</i> en tres municipios de Guanajuato.</p> <p>Recopilaron datos de producción de aguamiel, pulque y miel de maguey e indicaron la rentabilidad de los productos.</p> <p>Hay una gran oportunidad para los productores establecer cultivos con una amplia posibilidad de industrialización y conservación</p>
González-Rodríguez, X.A., Hernández-Ruíz, J., Espinosa-Trujillo, E., Mireles-Arriaga, A.I., Gutiérrez-Vaca, C., Ruíz-Nieto, J.E.	2018	Áreas de Distribución Potencial de <i>Agave salmiana</i> en el estado de Guanajuato	Identificaron 31 zonas en municipios del estado de Guanajuato con idoneidad ambiental para la propagación de <i>Agave salmiana</i> .

Cont. Cuadro 3. Proyectos de distribución potencial de especies del género *Agave*

Elaboración propia

Autores	Año	Titulo	Resumen
Reynoso-Santos R., López-Báez W., López-Luna A., Ruíz- Corral J., Castro- Mendoza, I., Cadena- Iñiguez, P., Valenzuela-Núñez, L., Camas-Gómez, R.	2016	Áreas potenciales para el cultivo del <i>Agave</i> (<i>Agave americana</i> L.) en la meseta comiteca, Chiapas	Identificaron tres municipios con potencial óptimo para el cultivo de <i>Agave americana</i> , considerando que la especie puede cultivarse en 55,874 ha del estado de Chiapas.
Martínez-Jiménez, Raymundo	2016	Distribución potencial y reproducción por semilla, de especies de agave empleadas en la elaboración de mezcal en el municipio de Villa de Sola de Vega, Oaxaca	Realizó mapas de distribución potencial de <i>Agave</i> <i>americana</i> , <i>A. angustifolia</i> , <i>A.</i> <i>convallis</i> , <i>A. karwinskii</i> , <i>A.</i> <i>marmorata</i> , <i>A. rhodacantha</i> y <i>A. potatorum</i> Identificó que <i>A. potatorum</i> , <i>A.</i> <i>americana</i> y <i>A. angustifolia</i> son las especies con mayor importancia en el municipio de Villa. Además, son las especies con mayor distribución en el municipio.
Ledesma-Horta, J.	2014	Distribución del <i>Agave</i> Mezcalero (<i>Agave</i> ssp.) y Áreas con Aptitud Potencial para su Desarrollo en San Felipe, Guanajuato	Identificó las especies distribuidas en el estado de Guanajuato: <i>Agave</i> <i>americana</i> , <i>A. asperrima</i> , <i>A. atrovirens</i> , <i>A. applanata</i> , <i>A.</i> <i>inaequidens</i> , <i>A. lechuguilla</i> , <i>A.</i> <i>salmiana</i> , <i>A. mapisaga</i> , <i>A.</i> <i>weberi</i> . Determinando que la zona potencial para cultivo en el municipio sea de 129 481 ha.

Cont. Cuadro 3. Proyectos de distribución potencial de especies del género *Agave*

Elaboración propia.

Autores	Año	Titulo	Resumen
Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias	2011	Caracterización y selección de sitios para plantaciones de Lechuguilla (<i>Agave lechuguilla</i> Torr.) en el estado de Coahuila.	Proporcionaron una guía para el aprovechamiento de <i>Agave lechuguilla</i> , considerando que esta especie puede ayudar a la degradación de algunos terrenos en el estado de Coahuila.
Luna-Raya, P	2003	Explotación actual y potencial del cultivo de <i>Agave tequilana</i> Weber Azul en el Estado de Guanajuato, México	Realizó un análisis de distribución potencial de <i>Agave tequilana</i> , considerando que la especie puede ser cultivada en el estado de Jalisco, Guanajuato, Nayarit, Tamaulipas y Michoacán. Posteriormente realizó un análisis de los costos de producción, ingresos y egresos de los cultivos de agave a una escala de tiempo de 7 años.

III. Definición del problema y justificación

México es el centro de origen y diversificación de los agaves, estas plantas se han aprovechado desde la prehistoria en Mesoamérica hasta la actualidad de diversas formas (Colunga-GarcíaMarín *et al.*, 2007; García-Mendoza, 2007). Uno de los usos es la producción de bebidas espirituosas, la industria mezcalera ha generado modalidades productivas que van de la agroindustria intensiva a la recolección en el monte de especies silvestres, ambas modalidades tienen costos ambientales y podrían provocar la desaparición de poblaciones silvestres (CONABIO, 2021). No obstante, también es una brecha de oportunidades para el manejo y aprovechamiento de las poblaciones, contribuyendo a la conservación de ecosistemas; por otro lado, los sistemas productivos deben adaptarse a las condiciones naturales de las regiones en las que se establezcan, generando estrategias de producción sustentable (CONABIO, 2021). En este sentido, los modelos de distribución potencial pueden ser utilizados para prospección, investigación y planificación de los sistemas productivos y de las poblaciones silvestres de los agaves más utilizados en la industria (Decoursey, 1992). *Agave angustifolia* es la especie con la que se obtiene la mayor producción de mezcal (90%), asimismo, cuenta con una gran distribución en el territorio mexicano; *A. cupreata* es la segunda especie más utilizada en la industria (2.0%), a diferencia de *A. angustifolia*, presenta una distribución endémica en el país; por último, *A. marmorata* es una especie que únicamente cuenta con poblaciones silvestres y con la que se produce menos del 1% de la producción de mezcal, esta especie cuenta con una distribución micro endémica (Figura 11) (CRM, 2020)

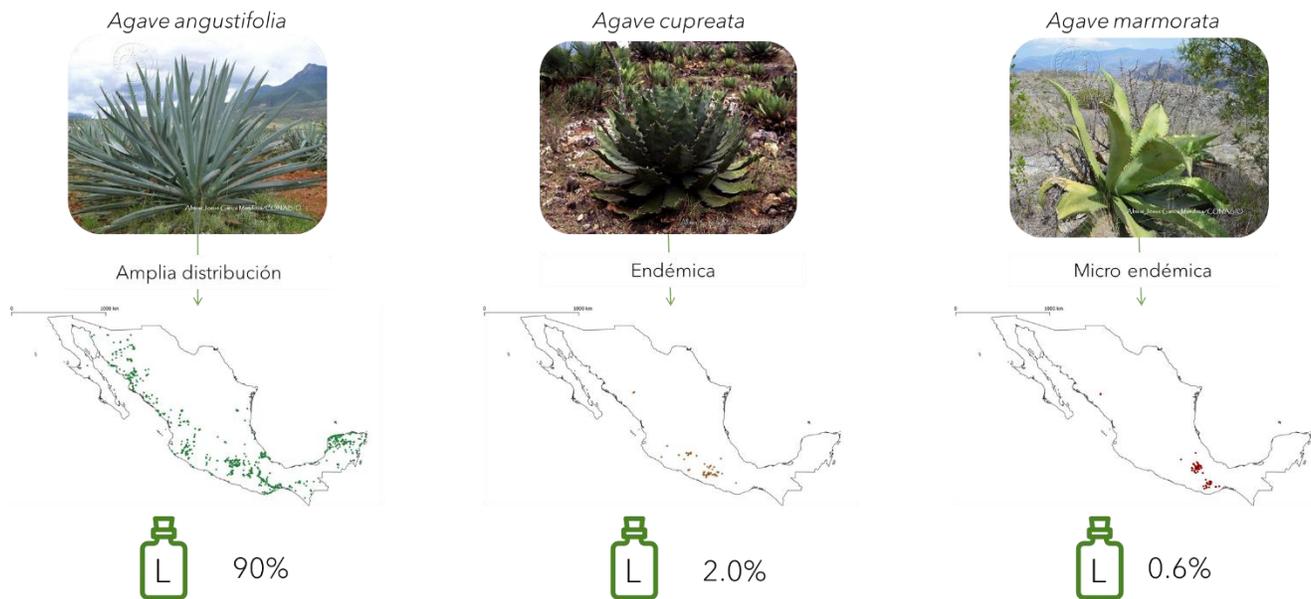


Figura 11. Tres de las especies del género *Agave* utilizadas en la industria mezcalera y su distribución en México.

Elaboración propia, con fotografías del Banco de imágenes de CONABIO

Adicional a esto, la existencia de información taxonómica, biológica, económica y tecnológica de las especies de agave albergada en bases de datos de acceso libre, presenta una oportunidad para generar inteligencia territorial que permita realizar toma de decisiones dentro de la industria.

IV. Objetivos e hipótesis

I. General

Elaborar mapas de distribución potencial con datos de libre acceso de tres especies de *Agave* utilizadas en la producción de mezcal en áreas con Denominación de Origen Mezcal para la toma de decisiones en la industria mezcalera.

II. Particulares

- ✓ Recopilar información biológica, taxonómica y registros espaciales de las especies seleccionadas para este estudio.
- ✓ Generar mapas de distribución potencial de *Agave angustifolia*, *Agave cupreata*, y *Agave marmorata* en áreas con Denominación de Origen Mezcal.
- ✓ Diseñar una estrategia para la toma de decisiones en la industria mezcalera.

III. Hipótesis

H₀: Los registros geográficos de ejemplares botánicos se distribuyen de manera “aleatoria” en el territorio mexicano.

H_a: Los registros geográficos de ejemplares botánicos no se distribuyen de manera “aleatoria” en el territorio mexicano.

H₀: Los modelos de distribución potencial no muestran áreas de idoneidad ambiental para la especie en el territorio mexicano.

H_a: Los modelos de distribución potencial muestran áreas de idoneidad ambiental para la especie en el territorio mexicano.

V. Metodología

I. Revisión técnica, taxonómica y biológica de las especies de agave

Para cada una de las especies de *Agave* estudiadas en esta investigación, se realizó un proceso sistemático de búsqueda y revisión de información biológica, cultural y económica (Figura 12). Identificando la producción científica y económica relevante de *Agave angustifolia*, *A. cupreata* y *A. marmorata* publicada en artículos científicos, libros, tesis, informes, infografías y memorias de congresos.

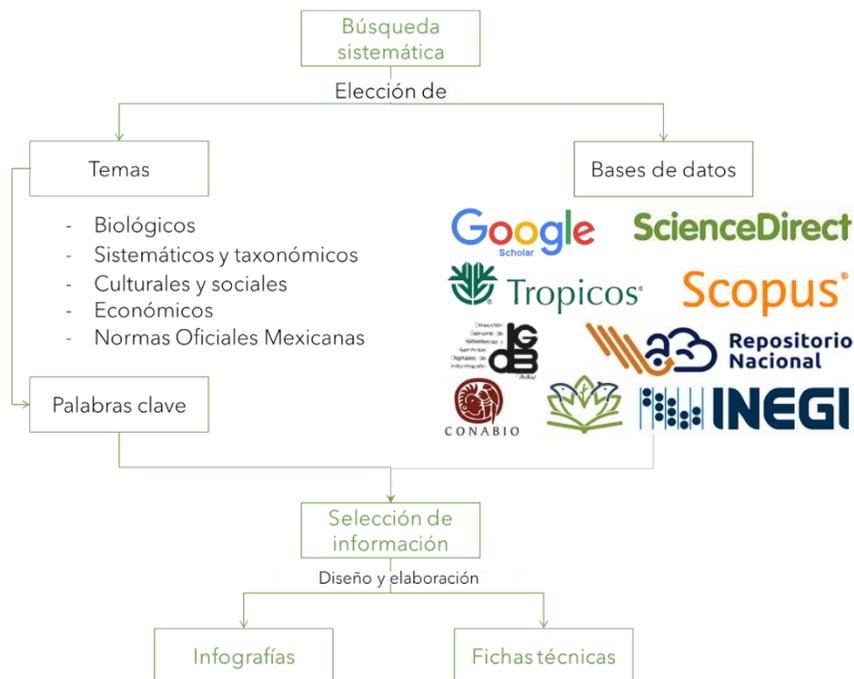


Figura 12. Proceso de búsqueda sistemática de información de *A. angustifolia*, *A. cupreata* y *A. marmorata*.

Elaboración propia, con fotografías del Banco de imágenes de CONABIO

Posteriormente, se realizó una selección de la información que permitió generar una infografía y una ficha técnica por especie. Este proceso permitió corroborar la sistemática y taxonomía de las especies, necesaria para la elaboración de los mapas de distribución potencial. Además, se contó con el apoyo de la Dra. Nancy Martínez, quien revisó la información taxonómica y morfológica.

La información incluida tanto en la infografía como en las fichas técnicas fue la siguiente:

- ✓ Familia
- ✓ Subfamilia
- ✓ Especie
- ✓ Sinonimias
- ✓ Nombres comunes
- ✓ Variedades
- ✓ Subespecies
- ✓ Descripción morfológica
- ✓ Ciclo de Vida
- ✓ Fenología
- ✓ Intervalo altitudinal
- ✓ Tipo de vegetación
- ✓ Categoría de riesgo
- ✓ Usos
- ✓ Peso de la piña
- ✓ Costo de la piña
- ✓ % de azúcares reductores
- ✓ Litros de mezcal producido

Las fichas técnicas contienen información más detallada y técnica de cada una de las especies. Además, tienen las referencias de donde se obtuvo la información. La ficha técnica de *Agave angustifolia* se ubica en el anexo 2, de *A. cupreata* en el anexo 3 y por último, de *A. marmorata* en el anexo 4.

El intervalo altitudinal se obtuvo directamente de las bases de datos de registros de cada una de las especies. El tipo de vegetación se obtuvo por medio del software QGIS 3.4, utilizando los metadatos de la capa vectorial “Vegetación Potencial” de Rzedowski (1990), obtenida del GeoPortal de CONABIO <http://www.conabio.gob.mx/informacion/gis/>. Se realizó el geoproceso de intersección con la capa de vectorial y los registros obtenidos para cada especie. Posteriormente, se exportaron las tablas de atributos de cada intersección y se identificó el tipo de vegetación en el que se ubicaban los registros.

La obtención de los datos se dividió en tres procesos (Figura 13): 1) registros, 2) mapoteca y 3) variables. Los registros espaciales de las especies se obtuvieron de bases de datos de herbarios digitales, posteriormente, se realizó una depuración de las bases de datos en Access, manteniendo los registros que tuvieran georreferencia, que errores y se eliminaron los registros duplicados (Gámez-Pastrana, 2010; Estrada-Márquez, 2016).

Los mapas se obtuvieron del Geoportal de CONABIO, considerando mapas biológicos y del territorio mexicano. El mapa de la Denominación de Origen Mezcal se realizó mediante el software QGIS 3.4, seleccionando los municipios de la capa vectorial “División política municipal” del INEGI (2019).

Para delimitar el área accesible de cada una de las especies, se utilizó el mapa de provincias morfotectónicas (Ferrusquía-Villafranca, 1990; Villaseñor *et al.*, 2015) y los registros de cada especie.

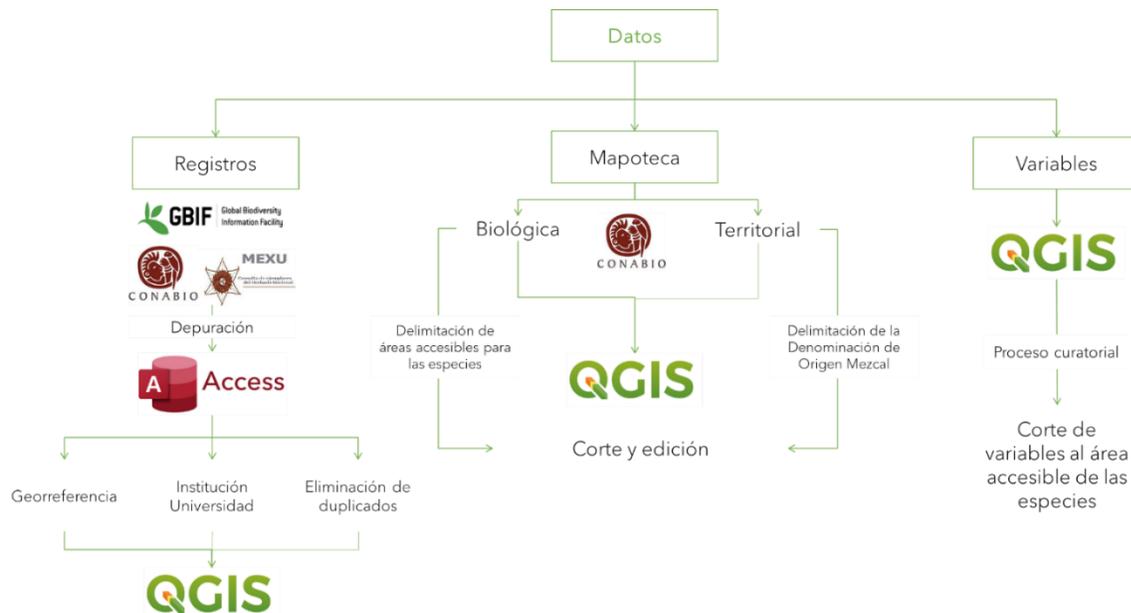


Figura 13. Proceso de obtención de datos: registros, mapas y variables.
Elaboración propia.

Las variables que se utilizaron en este estudio fueron las 58 variables en formato .ASC utilizadas por Cruz-Cárdenas y colaboradores (2014); las cuales incluyen 19 variables bioclimáticas (Anexo 1). Posteriormente, se cortaron los rasters al área accesible de cada especie, delimitada anteriormente.

II. Mapas de distribución potencial

Para generar los mapas de distribución potencial, se tuvieron que realizar pruebas estadísticas, tanto a los registros, como a las variables (Figura 14).

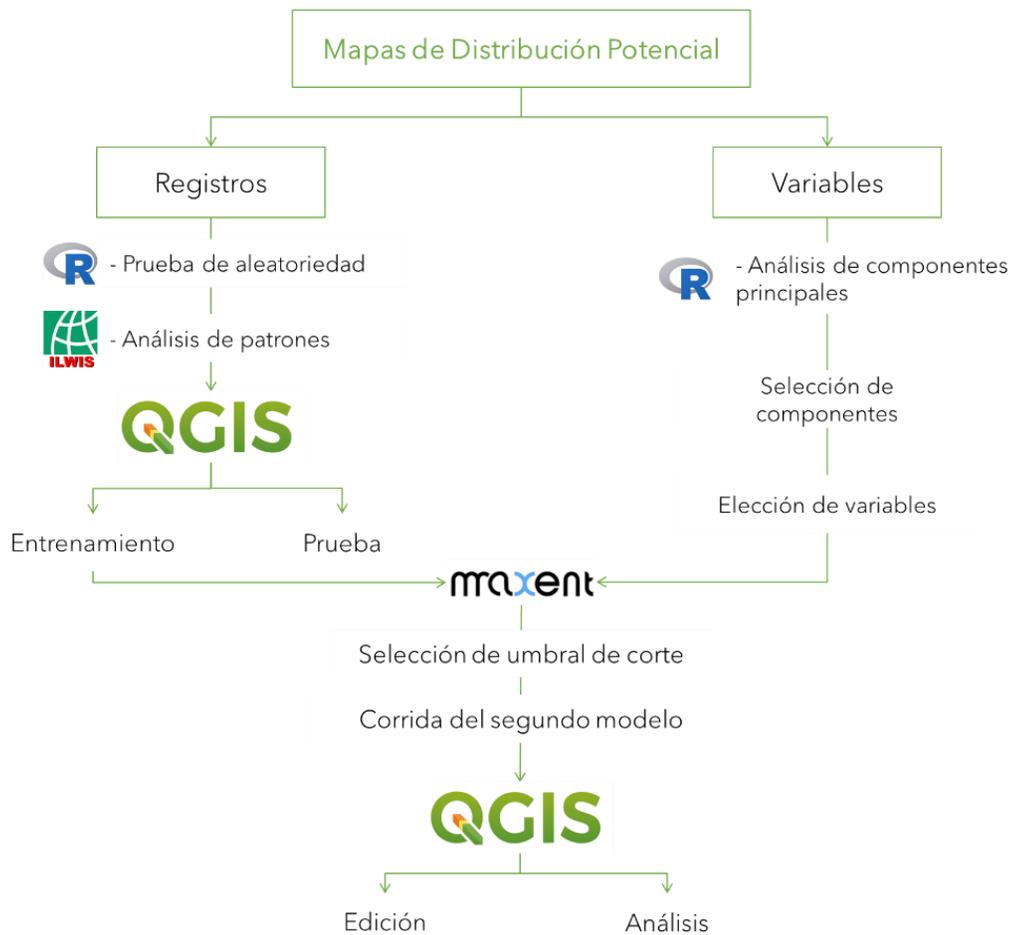


Figura 14. Proceso de elaboración de modelos de distribución potencial.
Elaboración propia basado en Cruz-Cárdenas et al., 2014.

A los registros se les realizó un tratamiento siguiendo la metodología propuesta por Cruz-Cárdenas y colaboradores (2014). Se aplicó una prueba de aleatoriedad por medio del software R Studio (Bivand *et al.*, 2008 en Cruz-Cárdenas *et al.*, 2014).

Dado que todas las especies tuvieron autocorrelación en sus registros, se realizó un análisis de patrones en el software ILWIS 3.7, el cual nos permite conocer el tipo de distribución que presentan los datos, es decir, si se ubican de forma dispersa o en zonas de mayor concentración, de modo que podamos seleccionar los grados para generar celdas de cuadrícula en el software QGIS 3.4, con el objeto de seleccionar al azar un sólo registro por celda de cuadrícula para seleccionar un subconjunto de especies que permita ajustar el modelo y el conjunto de datos de prueba. Además, la división de los registros es necesaria debido a que no se tuvo acceso a los datos de ausencia de las especies (Phillips y Dudick, 2008).

Para reducir la colinealidad entre las variables se realizó un análisis de componentes principales por medio del software R Studio, seleccionando los componentes que tuvieran hasta el 80% de variación acumulativa (Y. Cadena-Rodríguez, com. pers., 2020; Cruz-Cárdenas *et al.*, 2014). De estos componentes se seleccionaron los cinco valores absolutos más altos asociados a las variables.

Los Modelos de Distribución Potencial se realizaron con el algoritmo del software MaxEnt (Phillips *et al.* 2006). La configuración del modelo se realizó de acuerdo a Phillips y Dudick (2008), excepto por las opciones de *Extrapolate* y *Do clamping* que fueron desactivadas, la salida del modelo fue logístico.

Se realizaron dos modelos: el primero sin umbral de corte y el segundo con umbral de corte seleccionado con base en los valores de omisión de los datos de entrenamiento del primer modelo (Y. Cadena-Rodríguez, com. pers., 2020). Para la validación de los modelos se realizó una prueba binomial utilizando los datos de prueba y se utilizó el valor del área bajo la curva (Phillips y Dudick, 2008; Elith *et al.* 2006; Phillips *et al.* 2006; Anderson, *et al.*, 2003).

Los mapas se reclasificaron de modo que los píxeles con valores de 0 a 0.749 fueran 0 y de 0.75 a 1 equivalieran a 1. Se cortaron los mapas de distribución potencial la delimitación de la *DOM*. Posteriormente, se utilizó la Red de vías de comunicación de la Secretaría de Comunicaciones y Transportes de carreta (SCT, 2012), disponible en el GeoPortal de CONABIO, y el *OpenStreetMap* incluido en el software de QGIS 3.4, para comparar la distribución realizada (la ubicación real y actual de las especies) y la distribución potencial de las especies respecto a la cercanía de las actividades humanas. Por último, se emplearon las capas de Hidrografía (Maderrey & Torres-Ruata, 1990). Ambos procesos se realizaron en las áreas más destacadas de la distribución potencial reclasificada de cada una de las tres especies.

III. Diseño de estrategia

El diseño de la estrategia para la toma de decisiones se dividió en tres etapas: investigación previa, designación de un panel de expertos y la elaboración de un plan de acción. En la etapa 1, se realizó una búsqueda sistemática de información acerca de la toma de decisiones en industrias cuya materia prima fuera biodiversidad.

Por otra parte, con la búsqueda de información realizada en la revisión técnica y sistemática de las especies y la información general sobre el género *Agave*, se identificaron datos relevantes y las problemáticas entorno al género. Posteriormente, se identificaron expertos e involucrados en la cadena de valor del mezcal, desde el cultivo hasta el envasado del destilado de los agaves. Se consideraron expertos, los cuales por motivos personales solicitaron permanecer en el anonimato, involucrados en diferentes áreas: biología, innovación, sustentabilidad, proceso de producción y venta de productos. Con base en estos datos, se realizaron entrevistas semiestructuradas (Anexo 6) específicas para los expertos en las áreas, identificando las posibles soluciones a las problemáticas. Después, se recopiló la información y opiniones proporcionadas por cada experto, se realizó una validación cruzada por los expertos de las posibles soluciones. Por último, para la toma de decisiones en la industria mezcalera se realizó un plan de acción (Figura 15).

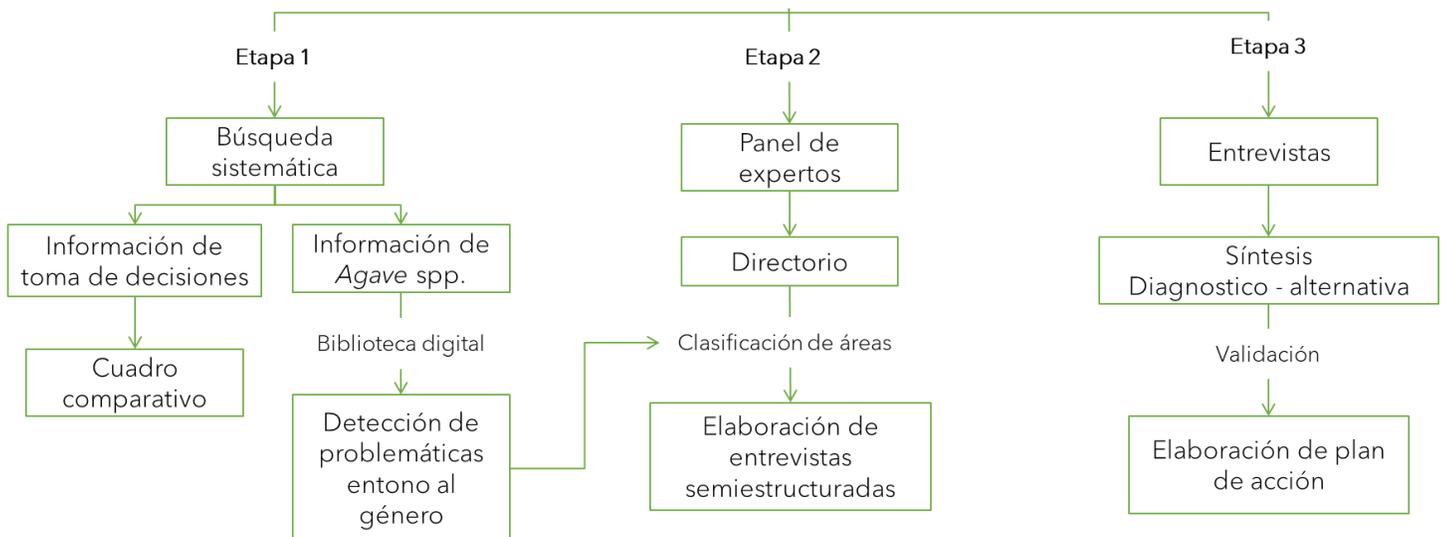


Figura 15. Diseño de estrategia de toma de decisiones.
 Elaboración propia.

VI. Resultados

I. Revisión técnica, taxonómica y biológica de las especies de agave

La búsqueda de información permitió identificar las sinonimias, variedades y subespecies de las especies *Agave angustifolia* y *Agave marmorata*, esta información fue relevante para la elaboración de las bases de datos de registros de las especies. *A. angustifolia* tiene un total de 22 sinonimias, 8 variedades y una subespecie, *A. marmorata*, únicamente cuenta con una sinonimia, *Agave cupreata* no cuenta con sinonimias.

Por otra parte, se identificaron los nombres comunes de las especies, datos importantes para la identificación de las especies por los productores en el campo. El número de nombres comunes designados para *A. angustifolia* supera los 62 (Anexo 2); la información obtenida para esta especie permitió identificar que su ciclo de vida es el más corto de las tres (Figura 16). A diferencia de *A. marmorata*, que tiene el ciclo de vida más largo, con un periodo de 25 a 35 años.

Con respecto al intervalo altitudinal, *A. cupreata* es la especie que tiene un menor intervalo (Figura 17), mientras que *A. angustifolia* tiene un mayor intervalo, lo cual está ligado a la vegetación en la que se encuentran, el tipo de vegetación que las tres especies comparten son el bosque de *Quercus* y el bosque tropical caducifolio.

La floración de las tres especies ocurre en meses diferentes, la primera especie que florece es *A. marmorata* (Figura 18), posteriormente florece *A. angustifolia* y por último *A. cupreata*, en concordancia la fructificación ocurre en el mismo sentido.

Agave angustifolia Haw.

Taxonomía

Subgénero	Agave
Sinonimias	22
Varietades	8
Subespecies	1
Nombres comunes	+60



Biología

Hábito	Rosetófilas acaules, rosetas 1-2 m alto, 1.5-2 m diámetro
Hojas	0.6-1.3 m largo, 0.04-0.08 m ancho, lanceoladas, planas o algo cóncavas, ascendentes, verde-claras a glaucas, margen recto, dentado
Inflorescencia	3-8 m de alto, contorno general oblongo, presentes ramas 1rias, 2rias y 3rias; pedúnculo verde; brácteas del pedúnculo triangulares, cartáceas, margen entero; pedicelos cortos
Flores	4-8 cm largo, hipocrateriformes o tubulares, verde-parduzcas-amarillentas; tépalos 1.5-2.5 cm largo; estambres con filamentos, amarillentos-purpúreos, anteras amarillentas; ovario cilíndrico
Frutos	cápsula 5-6 cm largo, oblongas
Ciclo de vida	6 a 8 años
Fenología	Florece: junio - agosto; Fructifica: septiembre - noviembre
Intervalo altitudinal	30 a 1770 msnm
Tipo de vegetación	Bosque de coníferas, de Quercus, espinoso y tropical caducifolio; matorral xerófilo



Costos

Peso de la piña	Un promedio de 80 kilogramos
Costo de la piña	Un promedio de \$13.00mxn por kilogramo
Azúcares reductores	Min. 17.19, máx. 31.7%
Litros de mezcal producidos	6, 073, 283 litros en el 2020



Figura 16. Infografía de *Agave angustifolia*, la especie más utilizada en la industria mezcalera.

Elaboración propia con fotografías del Banco de imágenes de CONABIO

Agave cupreata Trel. & A. Berger

Taxonomía

Subgénero	Agave
Sinonimias	-
Variedades	-
Subespecies	-
Nombres comunes	9



Biología

Hábito	Rosetófilas acaules, rosetas 0.8-1.3 m alto, 0.4-1 m diámetro
Hojas	0.4-0.8 m largo, 0.18-0.20 m ancho, lanceoladas, cóncavas, ascendentes o reflejas, glaucas, margen recto o ligeramente ondulado a crenado
Inflorescencia	5-7 m de alto, contorno ovalado, presentes ramas 1rias, 2rias y 3rias; pedúnculo verde; brácteas del pedúnculo triangulares, cartáceas, margen entero; pedicelos cortos
Flores	7-10 cm largo, hipocrateriformes a tubulares, verde-amarillentas; tépalos 2.2-3.5 cm largo; estambres con filamentos, verde amarillentos, anteras amarillentas; ovario fusiforme
Frutos	4-5.5 cm largo, oblongas; semillas 9-10 mm, negras, con ala
Ciclo de vida	7 a 15 años
Fenología	Florece: noviembre - enero; Fructifica: febrero - marzo
Intervalo altitudinal	1220 a 1860 msnm
Tipo de vegetación	Bosque de coníferas, bosque de <i>Quercus</i> , tropical caducifolio y tropical subcaducifolio



Costos

Peso de la piña	Un promedio de 35 kilogramos
Costo de la piña	Un promedio de \$4.50mxn por kilogramo
Azúcares reductores	Un promedio de 26.15%
Litros de mezcal producidos	192, 916 litros en el 2020



Figura 17. Infografía de *Agave cupreata*, la especie más utilizada en la industria mezcalera.

Elaboración propia con fotografías del Banco de imágenes de CONABIO

Agave marmorata Roezl

Taxonomía

Subgénero	Agave
Sinonimias	1
Varietades	-
Subespecies	-
Nombres comunes	12



Biología

Hábito	Rosetófilas acaules, rosetas 1-2 m alto, 1.5-2.5 m diámetro
Hojas	0.6-1.3 m largo, 0.2-0.4 m ancho, ampliamente lanceoladas, verde-amarillentas con bandas glaucas transversales, margen crenado, papiloso, con mamilas, dentado
Inflorescencia	5.5-10 m de alto, contorno oblongo, presentes ramas 1rias, 2rias, 3rias y 4tas; pedúnculo verde; brácteas del pedúnculo triangulares, cartáceas, margen entero o con dientecillos; pedicelos cortos
Flores	3-5 cm largo, campanuladas, amarillas; tépalos 1.2-2 cm largo; estambres con filamentos amarillos, anteras amarillas; ovario cilíndrico
Frutos	2.5-4 cm largo, oblongas; semillas 5-7 mm, negras, con ala
Ciclo de vida	12 a 35 años
Fenología	Florece: marzo - abril; Fructifica: mayo - julio
Intervalo altitudinal	340 a 2112 msnm
Tipo de vegetación	Bosque de <i>Quercus</i> , tropical caducifolio; matorral xerófilo



Costos

Peso de la piña	Un promedio de 67 kilogramos
Costo de la piña	Un promedio de \$5.50mxn por kilogramo
Azúcares reductores	Sin información
Litros de mezcal producidos	71,450 litros en el 2020

Figura 18. Infografía de *Agave marmorata*, especie utilizada en la industria mezcalera.

Elaboración propia con fotografías del Banco de imágenes de CONABIO

Con respecto a los litros producidos de mezcal en el 2020, con *A. angustifolia* se produce el 90% lo que equivale a más de siete millones de litros, con *A. cupreata* se produce el 2% lo que equivale a más de ciento cincuenta mil litros y, por último, *A. marmorata* especie con la cual únicamente se produjo el 0.6%, es decir, menos de cincuenta mil litros. *A. angustifolia* tiene un rango de azúcares reductores totales (ART) en el tallo de 17.19% a 31.7%, en *A. cupreata* se ha registrado un 26.15% de ART (Barrientos, 2020; Cruz-García *et al.*, 2013). No se encontró información disponible sobre la cantidad de ART en *A. marmorata*. De acuerdo con la información bibliográfica, el peso promedio de la piña de *A. angustifolia* es de 80.87 kg, el de *A. marmorata* es de 67.2 kg, a diferencia de *A. cupreata* que llega a pesar de 30 a 35 kg (Cárcamo y Noriega, 2009; Velasco, *et al.*, 2009; Vera-Guzmán *et al.* 2009; Cruz-García *et al.* 2013; Barrientos, 2020). La empresa “X”, proporcionó información sobre el peso de la piña, los costos de las piñas y los litros embotellados (Cuadro 4).

Cuadro 4. Comparativo de aspectos relevantes de los agaves en la industria mezcalera. Empresa “X” com. Pers. 2021; Barrientos-Rivera, 2020; Consejo Regulador de Mezcal, 2020; Cruz-García *et al.*, 2013.

	<i>A. angustifolia</i>	<i>A. cupreata</i>	<i>A. marmorata</i>
Producción nacional de mezcal (L)	7, 060, 725	156, 905	47, 071
Embotellamiento mezcal M. de L. (L)	9,000	9,000	4,500
Promedio peso de la piña (kg)	80.87	35	67.2
Promedio peso de la piña M. de L. (kg)	50	30	40
Costo de la piña por kg (\$mxn)	12.00 - 14.00	4.00 - 5.00	5.00 - 6.00
Azúcares Reductores Totales (%)	17.19 - 31.7	26.15	x

En relación con los registros espaciales de las especies, *Agave angustifolia* es la especie con mayor número de registros, con un total de 1,176; se consideraron los registros de las sinonimias, sin embargo, bajo los criterios de selección ninguna sinonimia contó con los registros para incorporar a la base de datos.

Por otra parte, *A. marmorata* tuvo un total de 339 registros, esta especie cuenta con una sinonimia (*Agave todaroi* Baker), pero no se obtuvieron registros espaciales de la misma, y, por último, *A. cupreata* fue la especie con menor cantidad de registros, con un total de 290.

Los registros espaciales permitieron identificar los estados en los cuales se distribuyen estas especies, *A. angustifolia* se distribuye en 27 estados (Figura 19), *A. cupreata* en ocho estados y con una distribución restringida *A. marmorata* únicamente en seis estados (Figura 20 y 21).

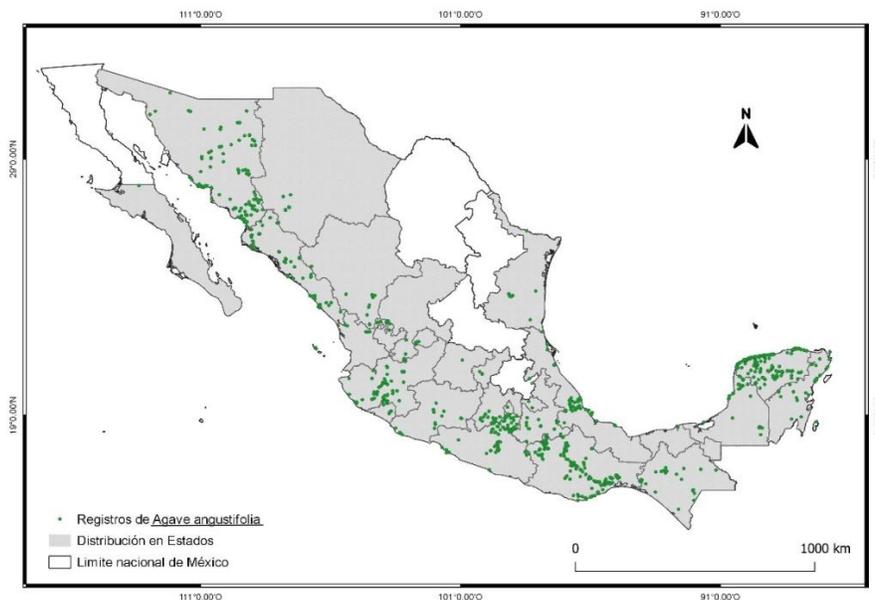


Figura 19. Disposición espacial de los registros de *A. angustifolia* en México.

Elaboración propia.

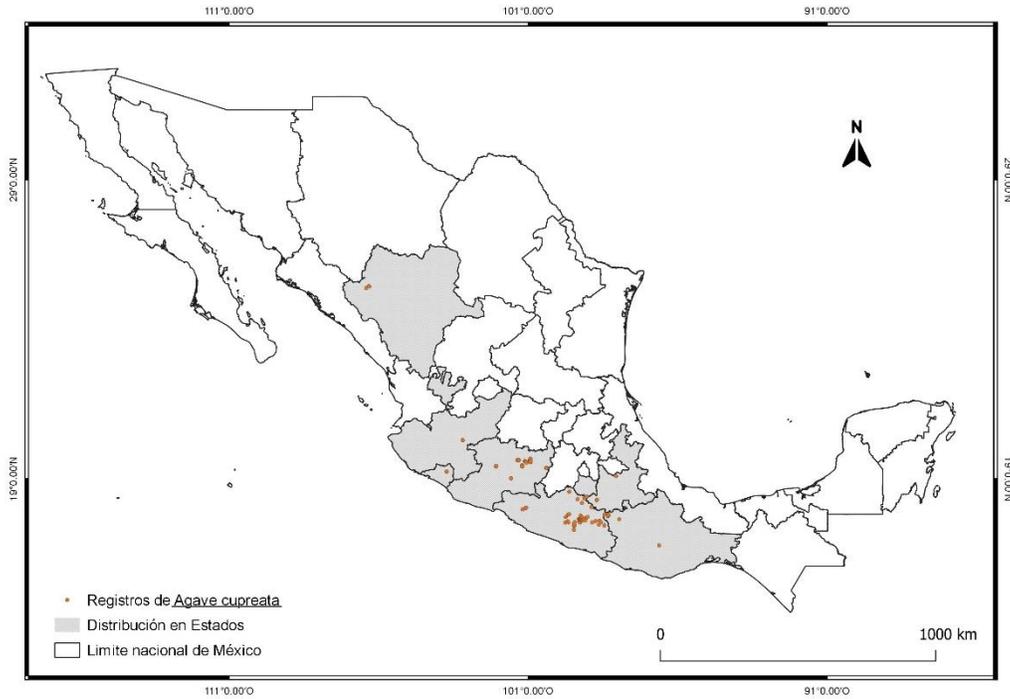


Figura 20. Disposición espacial de los registros de *A. cupreata* en México.

Elaboración propia

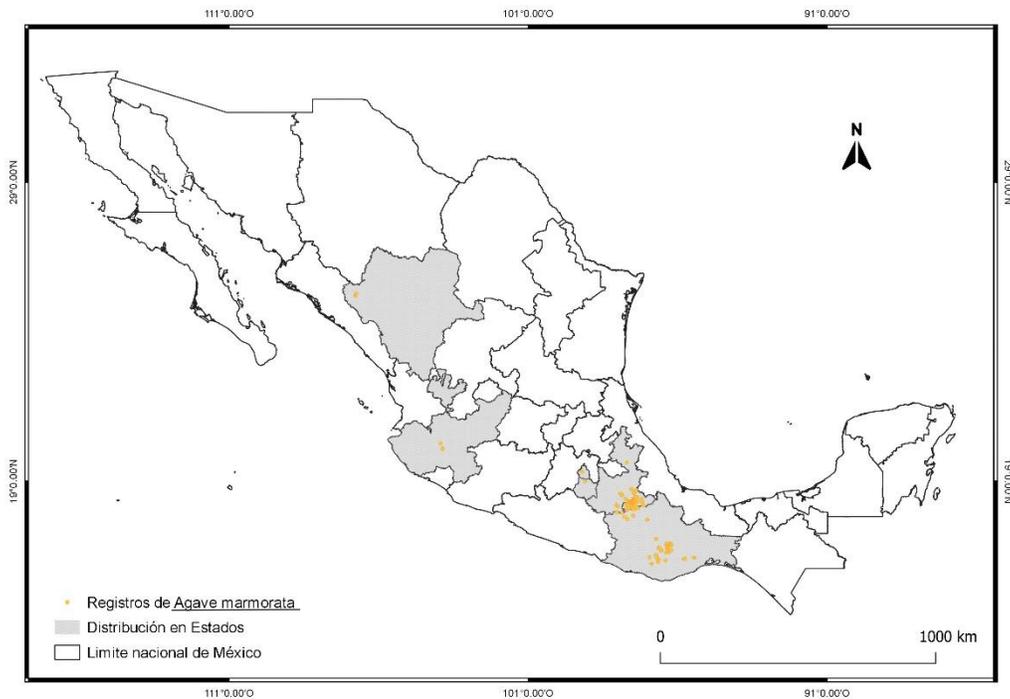


Figura 21. Disposición espacial de los registros de *A. marmorata* en México.

Elaboración propia

II. Mapas de distribución potencial

Las pruebas de aleatoriedad para las tres especies fueron negativas, los registros muestran patrones espaciales agregados, en la figura 22 se puede observar que los eventos ocurren por encima de la banda de confianza, determinando que los eventos no se distribuyen de manera independiente y uniforme en el espacio.

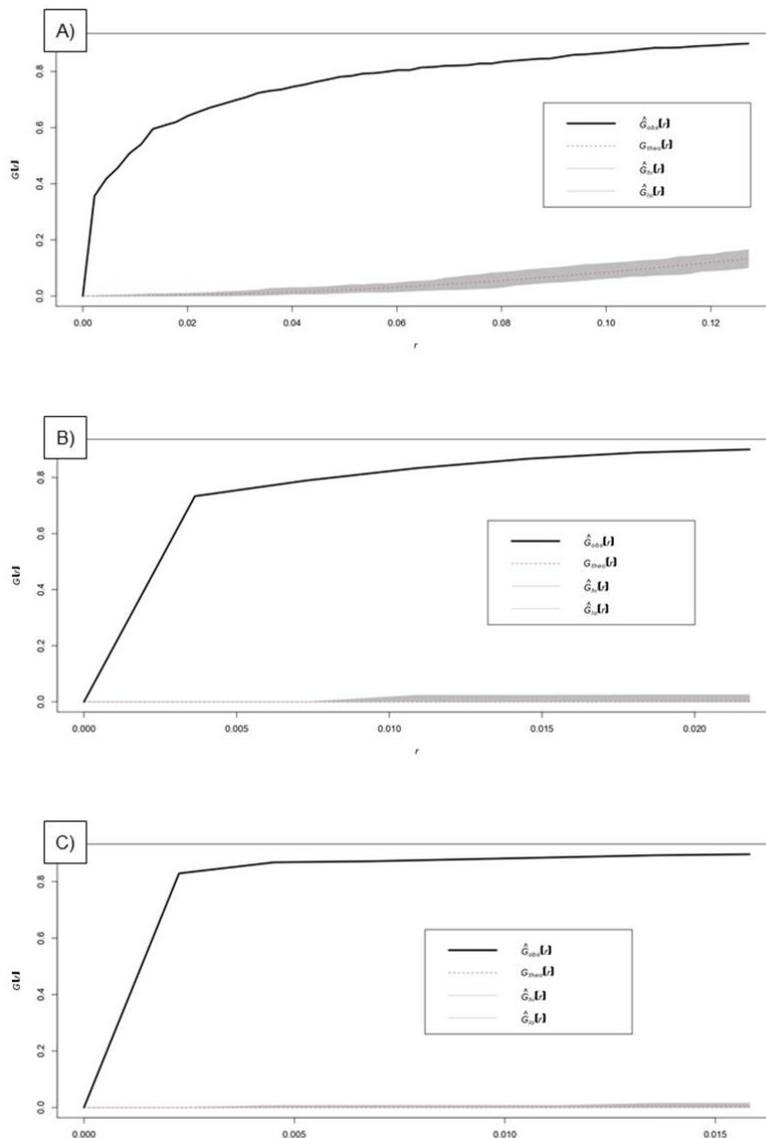


Figura 22. Resultados de la prueba de aleatoriedad. A) *A. angustifolia*, B) *A. cupreata* y C) *A. marmorata*.
Elaboración propia en software R.

El tamaño de la celda que se seleccionó para *A. angustifolia* fue de una distancia de 0.3° con una probabilidad de 97.31% de encontrar un punto cercano, para *A. cupreata* y *A. marmorata* el tamaño de la celda y la probabilidad fueron las mismas con una distancia de 0.1° con 95.86%. La selección aleatoria de los registros dividió los datos de *A. angustifolia* en 291 para entrenamiento y 885 de prueba, para *A. cupreata* en 55 para entrenamiento y 235 de prueba y por último 62 de entrenamiento y 276 para *A. marmorata*.

El análisis de componentes principales permitió seleccionar las variables que no estuvieran correlacionadas; el 80% de la variación acumulativa de *A. angustifolia* se obtuvo en el componente ocho, para *A. cupreata* en el componente siete y, por último, para *A. marmorata* en el componente seis. Se seleccionaron 33 variables para *A. angustifolia*, 30 para *A. cupreata* y 27 para *A. marmorata* (Cuadro 5).

Cuadro 5. Variables seleccionadas para cada especie. Elaboración propia

	<i>Agave angustifolia</i>	<i>Agave cupreata</i>	<i>Agave marmorata</i>
Aspecto	x	x	x
BIO 1: temperatura media anual	x		x
BIO 2: rango diurno medio		x	x
BIO 3: isothermalidad	x	x	x
BIO 4: estacionalidad de temperatura	x	x	x
BIO 5: temperatura máxima del mes más cálido	x	x	
BIO 6: temperatura mínima del mes más frío		x	
BIO 7: rango anual de temperatura		x	x
BIO 8: temperatura media del cuarto más húmedo		x	
BIO 9: temperatura media del trimestre más seco			x
BIO 10: temperatura media del trimestre más cálido	x	x	x
BIO 11: temperatura media del trimestre más frío			x
BIO 12: precipitación anual			x
BIO 13: precipitación del mes más húmedo	x		
BIO 14: precipitación del mes más seco			x
BIO 15: estacionalidad de la precipitación	x		
BIO 16: precipitación del trimestre más húmedo	x		
BIO 17: precipitación del trimestre más seco	x		
BIO 18: precipitación del trimestre más cálido	x	x	
BIO 19: precipitación del trimestre más frío	x	x	x

Cont. Cuadro 5. Variables seleccionadas para cada especie. Elaboración propia

	<i>Agave angustifolia</i>	<i>Agave cupreata</i>	<i>Agave marmorata</i>
Ca: calcio	x	x	x
Calentamiento anisotrópico			
CE: conductividad eléctrica	x	x	x
CO: carbono orgánico		x	
Elevación	x		
Escorrentía	x		x
ETRA: evapotranspiración anual real	x*	x	
ETRAH: evapotranspiración anual real de los meses húmedos	x	x	
ETRAS: evapotranspiración anual real de los meses secos	x	x	
Índice de convergencia	x		
Índice de humedad topográfica	x	x	
Índice de rugosidad del terreno			
IVNABR: índice normalizado de abril			
IVNAGO: índice normalizado de agosto			
IVNDIC: índice normalizado de diciembre	x		x
IVNENE: índice normalizado de enero	x		
IVNFEB: índice normalizado de febrero		x	
IVNH: índice normalizado de los meses húmedos del año			x
IVNJUL: índice normalizado de julio		x	x
IVNJUN: índice normalizado de junio			
IVNMAR: índice normalizado de marzo			
IVNMAY: índice normalizado de mayo			
IVNNOV: índice normalizado de noviembre			x
IVNOCT: índice normalizado de octubre		x	
IVNS: índice normalizado de los meses secos del año	x		
IVNSEP: índice normalizado de septiembre			x
K: potasio	x	x	
Medición de rugosidad vectorial	x	x	
Mg: magnesio	x	x	x
MO: material orgánico		x	x
Na: sodio	x	x	x
Pendiente		x	
pH: potencial de hidrógeno	x	x	
PPH: precipitación de los meses húmedos	x		
PPS: precipitación de los meses secos	x	x	
RAS: relación de absorción de sodio	x		x
TH: temperatura media de los meses húmedos	x	x	
TS: temperatura media de los meses secos			x

Al correr el modelo con los registros de entrenamiento y de prueba, en conjunto con las variables de cada una de las especies, se obtuvo un primer modelo con el que se designó un umbral de corte para cada especie, para las tres especies, el umbral de corte seleccionado fue “presencia de entrenamiento del percentil 10”, se tomó en cuenta que la tasa de omisión fuera menos al 0.100 y el umbral logístico fuera mayor a 0.2.

Posteriormente, se corrió el segundo modelo obteniendo los siguientes valores de AUC: 0.839 para *A. angustifolia*, 0.961 para *A. cupreata* y 0.97 para *A. marmorata*. Con base en la prueba binomial, obtuvimos los siguientes valores de éxito para los modelos: 0.9457627 (837, 885, pvalue<2.2e16) para *A. angustifolia*, 0.9659574 (227, 235, pvalue<2.2e16) para *A. cupreata*, 0.9855596 (273, 277, pvalue<2.2e16) para *A. marmorata*.

El modelo de distribución potencial (*MDP* de ahora en adelante) de *A. angustifolia* tiene la mayor extensión de los tres modelos generados (Figura 23). Dentro de la Denominación de Origen del Mezcal, la mayor distribución se destaca en los estados de Guerrero, Oaxaca, Morelos y Puebla (Figura 24).

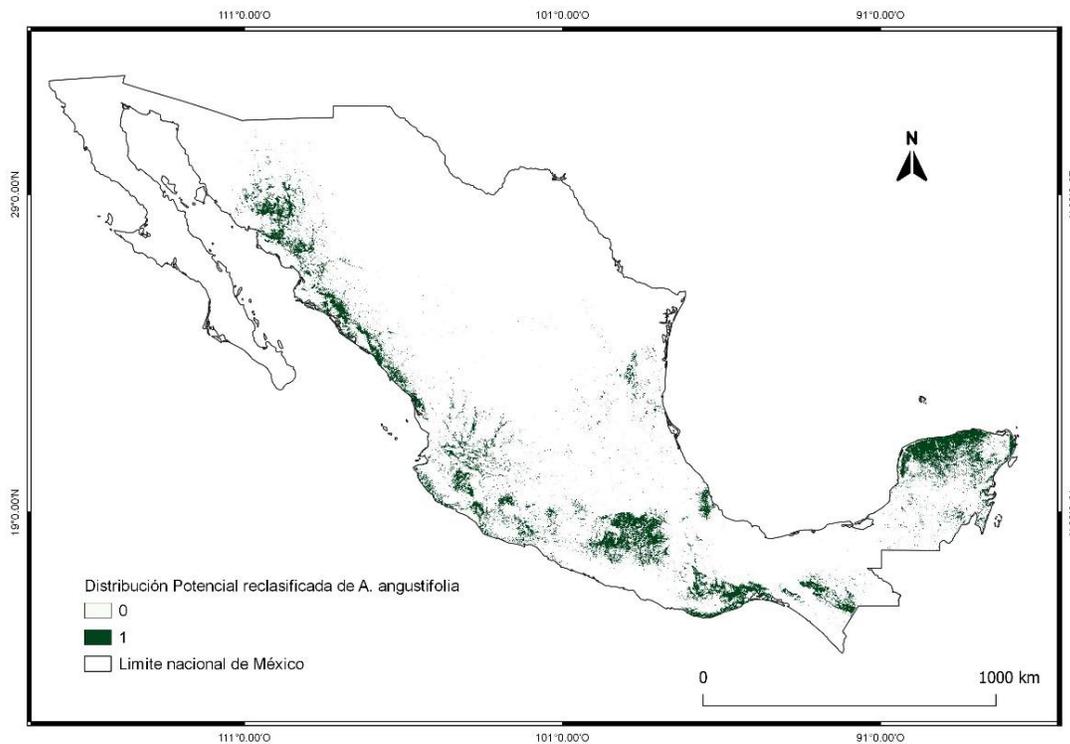


Figura 23. Modelo de distribución potencial de *Agave angustifolia*.
Elaboración propia

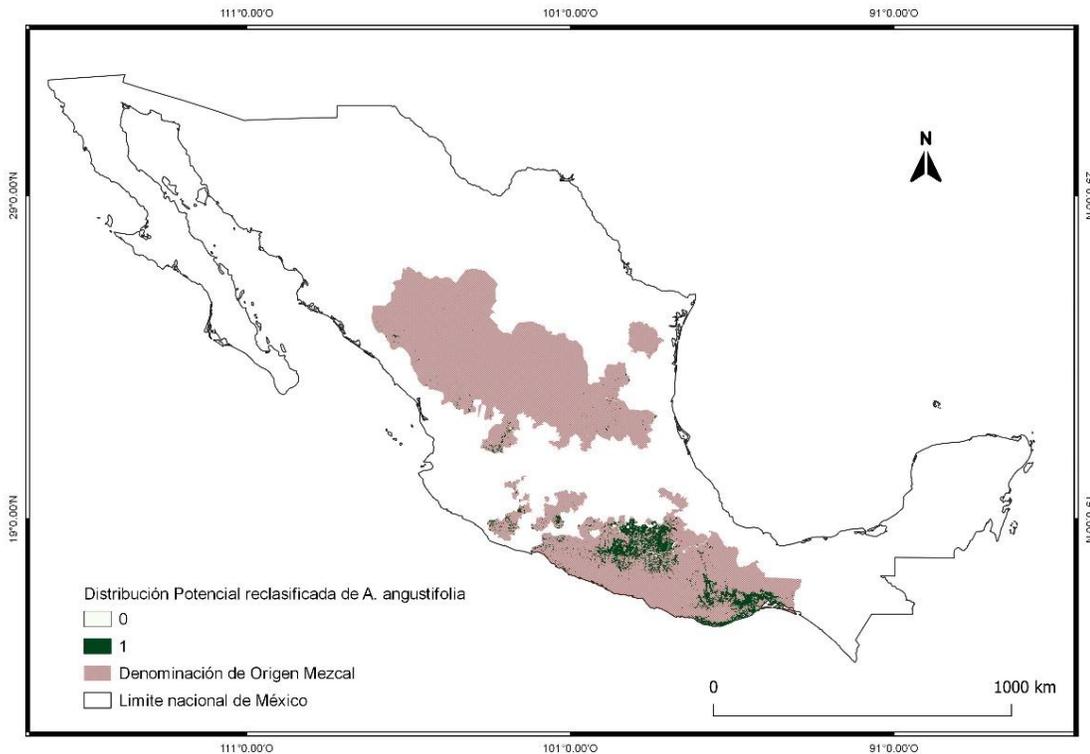


Figura 24. Modelo de distribución potencial de *Agave angustifolia* en la Denominación de Origen Mezcal.
Elaboración propia

Al combinar las capas con la hidrografía y la Red de vías de comunicación (*RVC* de ahora en adelante) (recortadas a *DOM*), se puede identificar que los registros de *A. angustifolia* se encuentran aledaños a caminos y a cuerpos de agua. La *DP* en la zona del estado de Oaxaca sigue las líneas de la *RVC*; además se pueden observar pixeles sobrepuestos a las líneas de la hidrografía (Figura 25).

Por otra parte, la zona de la costa del pacifico del estado tiene altas probabilidades de idoneidad ambiental para la especie; los registros en esta área son pocos. La *DP* sigue la disposición espacial de los registros de la especie, no obstante, se aprecian algunos pixeles solitarios por el territorio mexicano.

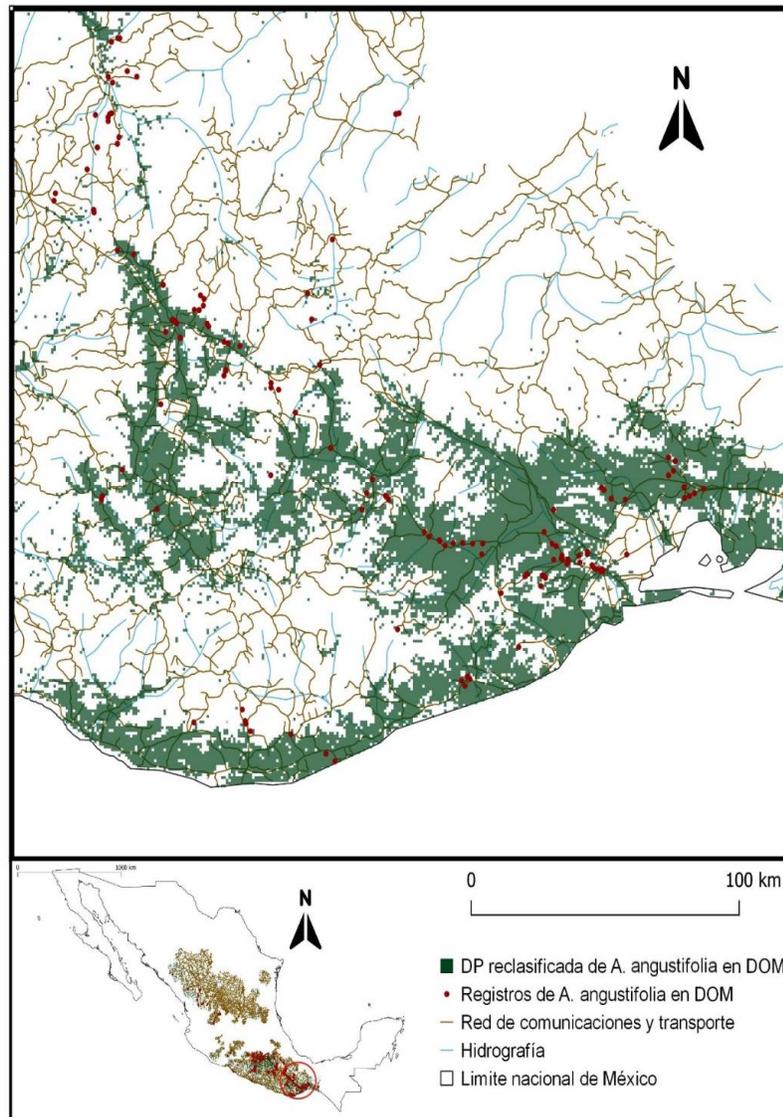


Figura 25. Distribución potencial de *A. angustifolia*, red de comunicaciones en conjunto con la hidrografía en la DOM, zona sur. Elaboración propia

Hacia el centro del país, continua la tendencia de los registros cercanos a las vías y cuerpos de agua (Figura 26).

Hay una zona en el estado de Puebla en el cual no hay registros, pero el área de *DP* es amplia, abarcando más de 10 municipios. El área también se expande hacia el estado de México y Morelos. En la zona del norte del país las áreas con idoneidad ambiental son escasas.

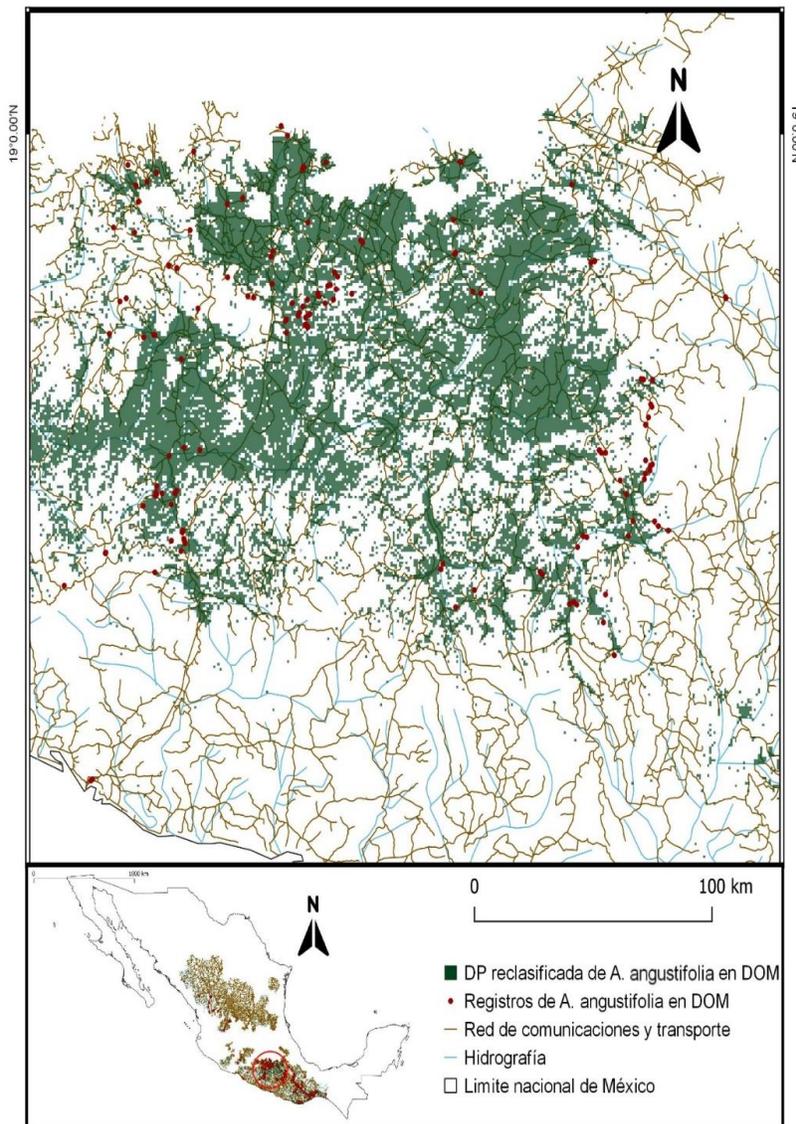


Figura 26. Distribución potencial de *A. angustifolia*, red de comunicaciones en conjunto con la hidrografía en la DOM, zona centro.
Elaboración propia

El *OpenStreerMap* (*OSM* de ahora en adelante). permitió identificar distribución de la especie en la Reserva de la Biosfera Tehuacán-Cuicatlán, pero no áreas de idoneidad ambiental (Figura 27).

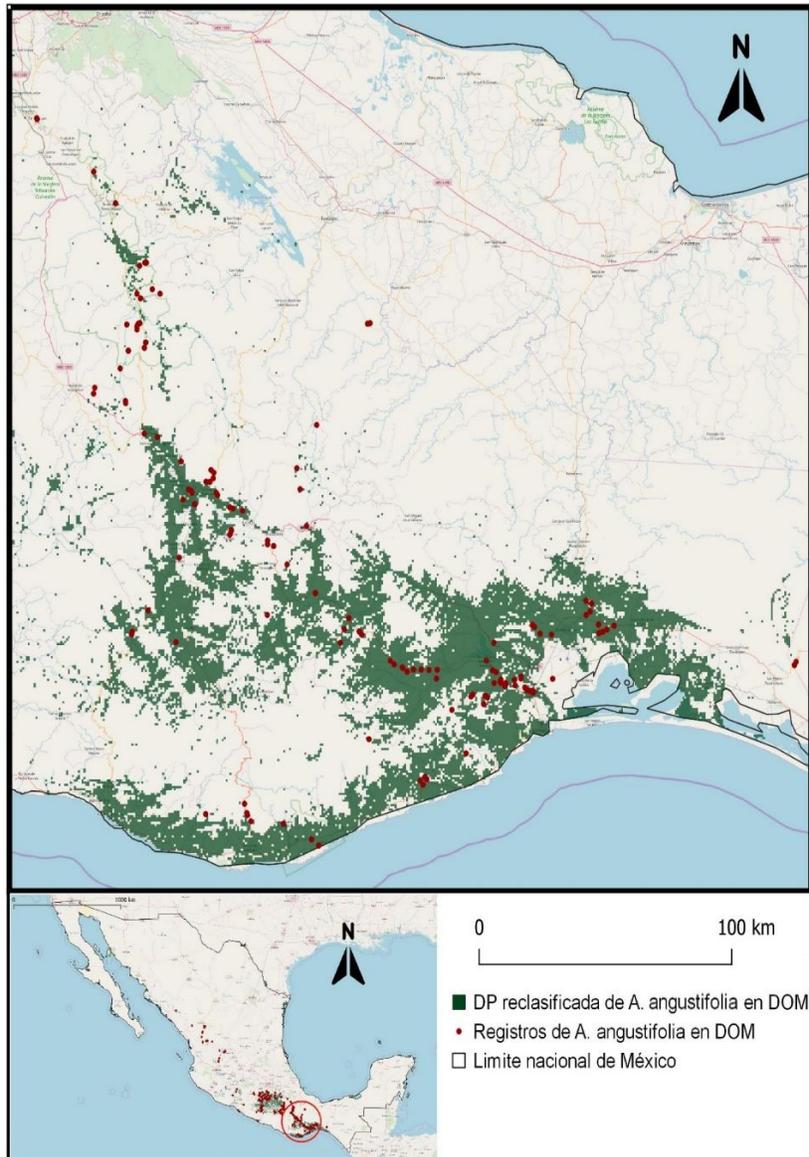


Figura 27. Distribución potencial de *A. angustifolia* vista con OpenStreetMap, zona sur.
Elaboración propia

Algunos municipios del estado de México fueron recientemente incluidos en la *DOM*, en estos municipios se observan algunos pixeles con idoneidad ambiental para la especie *A. angustifolia* (Figura 28).

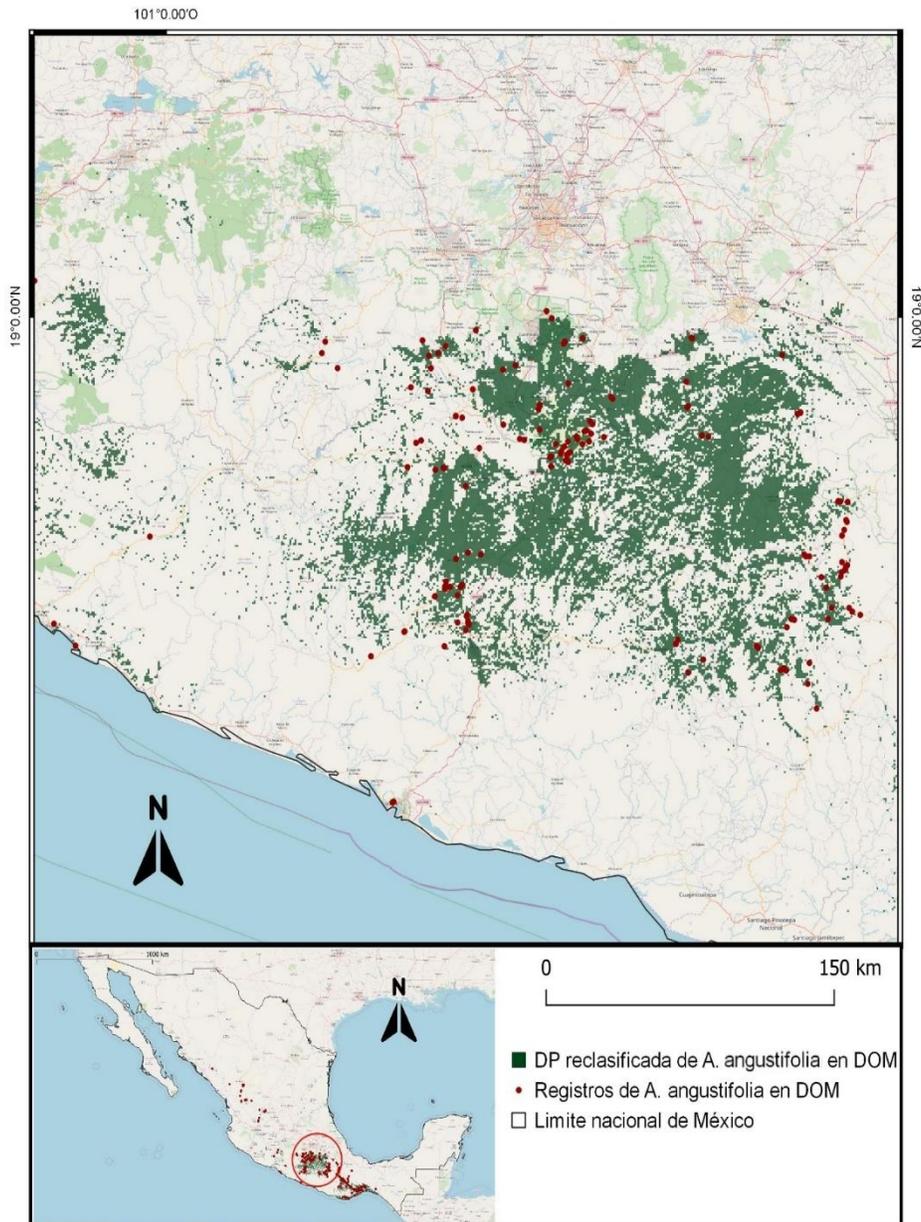


Figura 28. Distribución potencial de *A. angustifolia* vista con OpenStreetMap, zona centro.
Elaboración propia

La distribución potencial de *A. cupreata* se ubica entre la Depresión del Balsas y serranías meridionales, no obstante, se pueden ubicar algunas celdas con probabilidad alta en la zona norte del país (Figura 29).

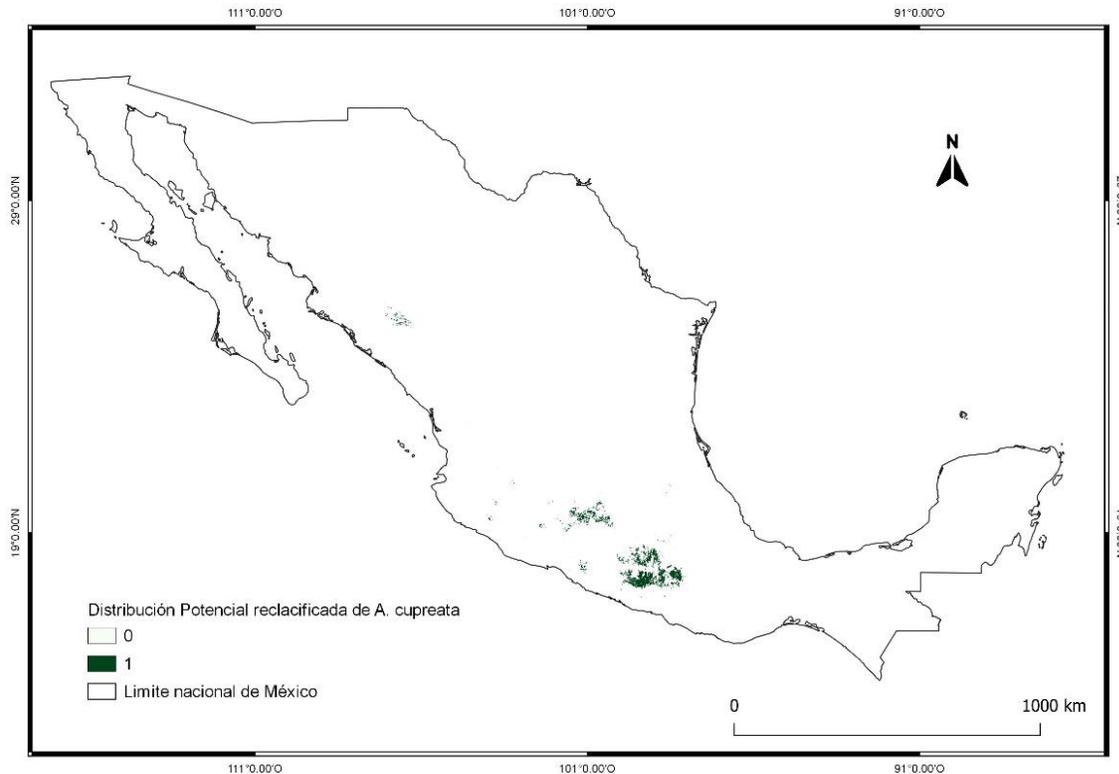


Figura 29. Modelo de distribución potencial de *Agave cupreata*.
Elaboración propia

Dentro de la *DOM*, los estados con mayor área distribución potencial son los estados de Guerrero, Morelos y Michoacán (Figura 30).

Los registros de la especie en la *DOM* siguen el mismo patrón que los de la especie *angustifolia*, se ubican aledaños a las *RVC*, a diferencia de, los registros no se intersecan con la hidrografía del país.

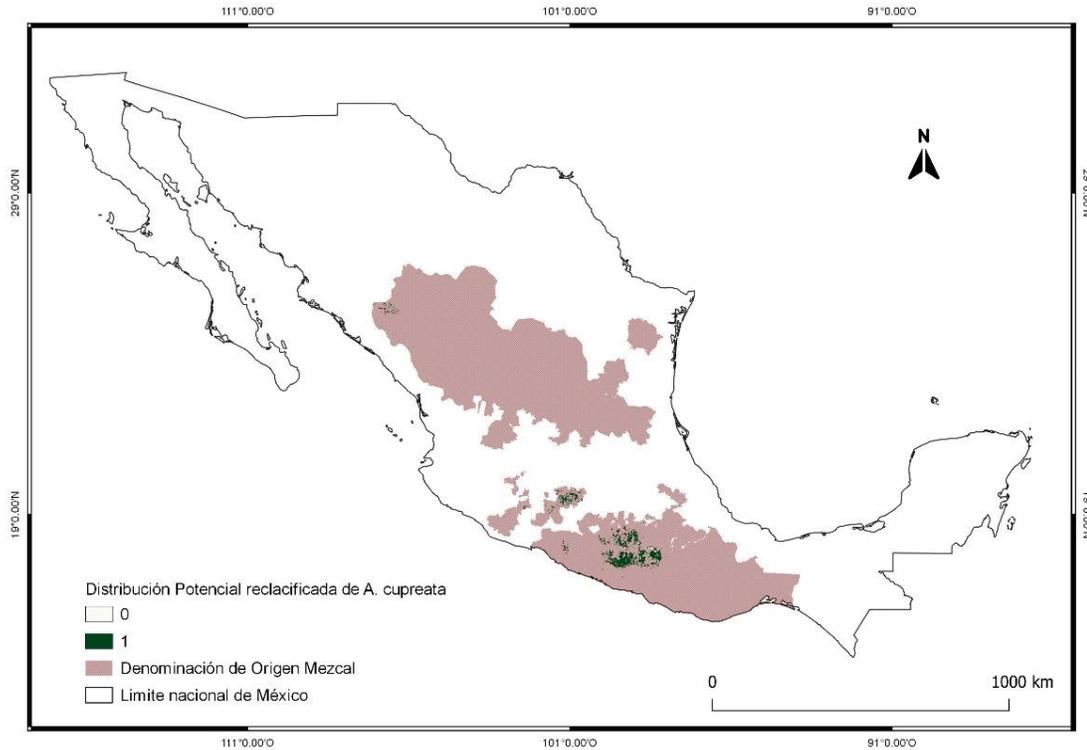


Figura 30. Modelo de distribución potencial de *Agave cupreata* en la Denominación de Origen Mezcal.
Elaboración propia

La idoneidad ambiental en la zona del estado de Guerrero no es uniforme, hay pixeles dentro de las zonas en las que la probabilidad es menor al 0.75 (dado la reclasificación de los modelos); además, hacia la zona este del estado la *DP* no se sobrepone con la hidrografía del mismo, también se aprecia una división entre la zona de Morelos y Guerrero, generada por un cuerpo de agua (Figura 31).

La *DP* se superpone con la capital del estado de Guerrero y con la Reserva de la Biosfera Sierra de Huautla en Morelos (Figura 32).

En Michoacán de Ocampo, los municipios que cuentan con *DOM* son pocos, hay algunos registros en los que no se observa *DP*, no obstante, la *DP* que se observa es amplia en comparación con la disposición espacial de los registros (Figura 33).

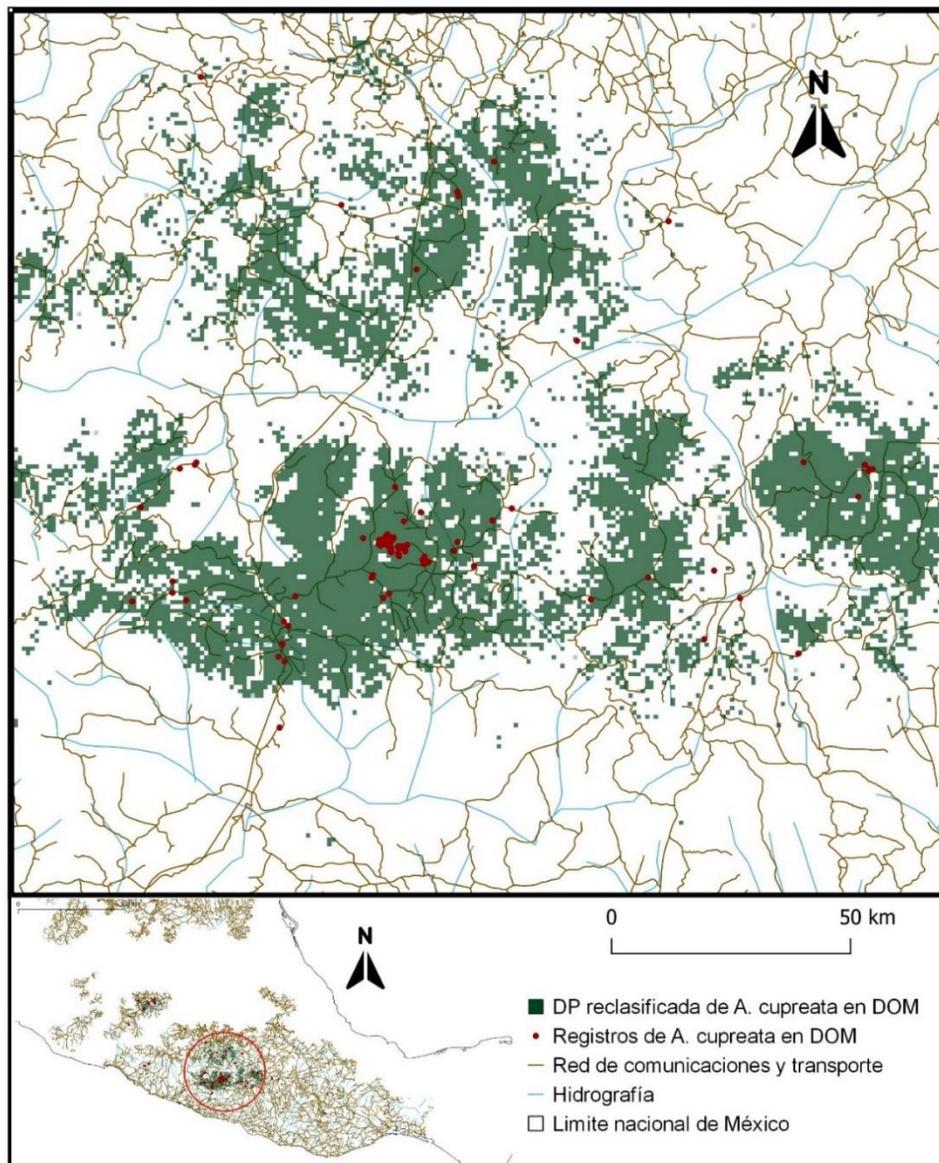


Figura 31. Distribución potencial de *A. cupreata*, red de comunicaciones en conjunto con la hidrografía en la DOM, Guerrero-Morelos.
Elaboración propia

En la figura 34 se identifica que las zonas con idoneidad ambiental del estado de Michoacán se ubican en zonas montañosas.

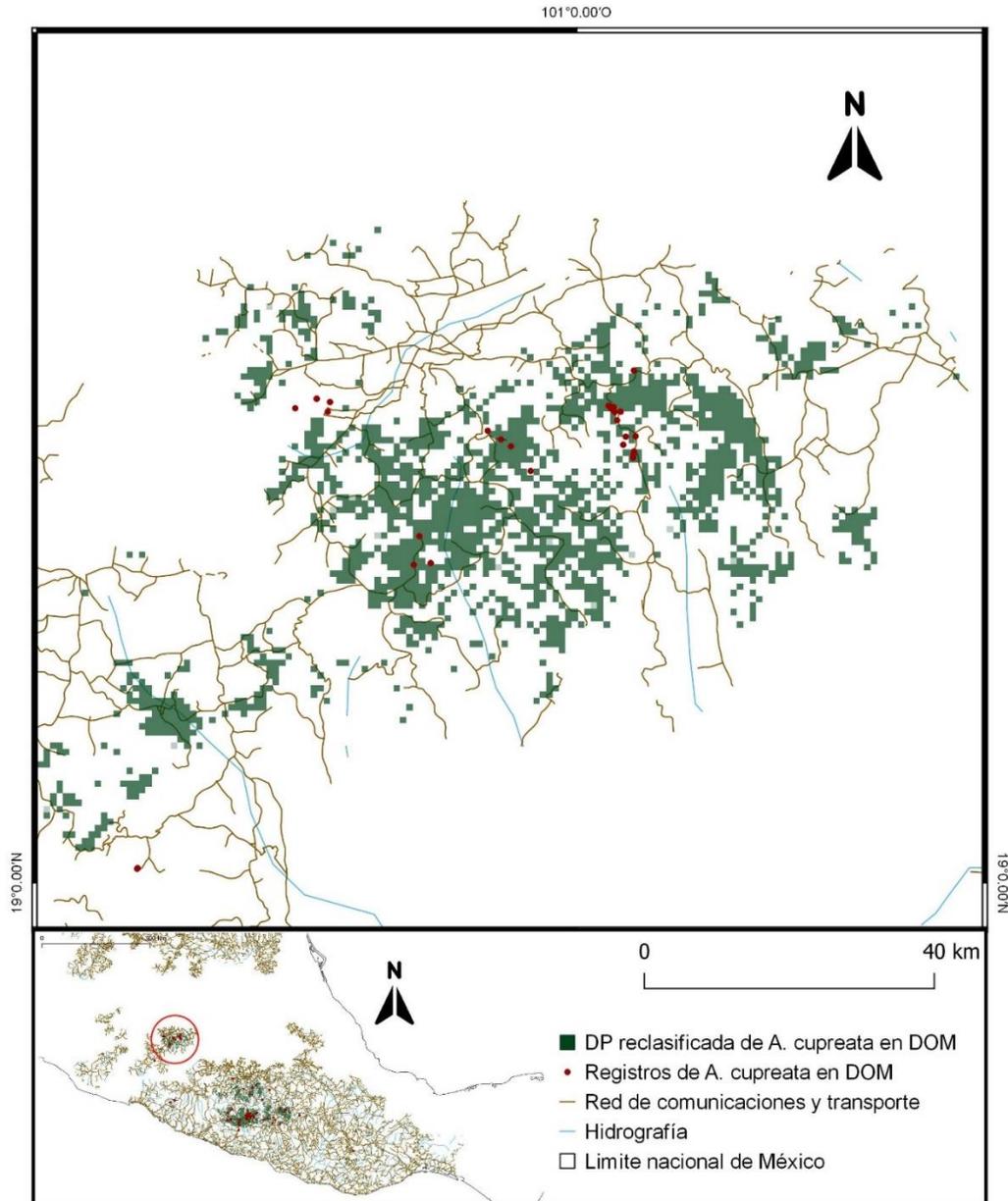


Figura 32. Distribución potencial de *A. cupreata*, red de comunicaciones en conjunto con la hidrografía en la DOM, Michoacán de Ocampo.
Elaboración propia

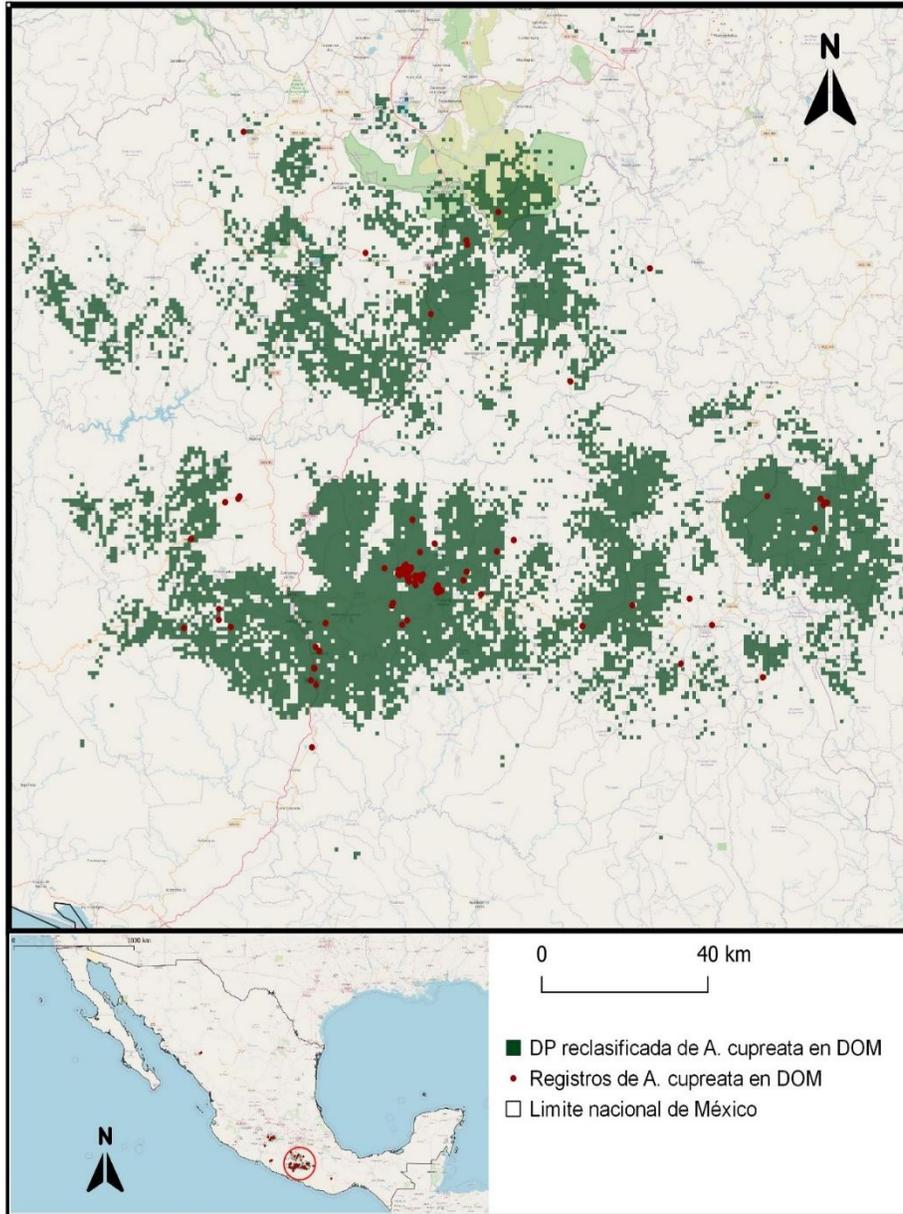


Figura 33. Distribución potencial de *A. cupreata* vista con OpenStreetMap, Guerrero-Morelos.
Elaboración propia

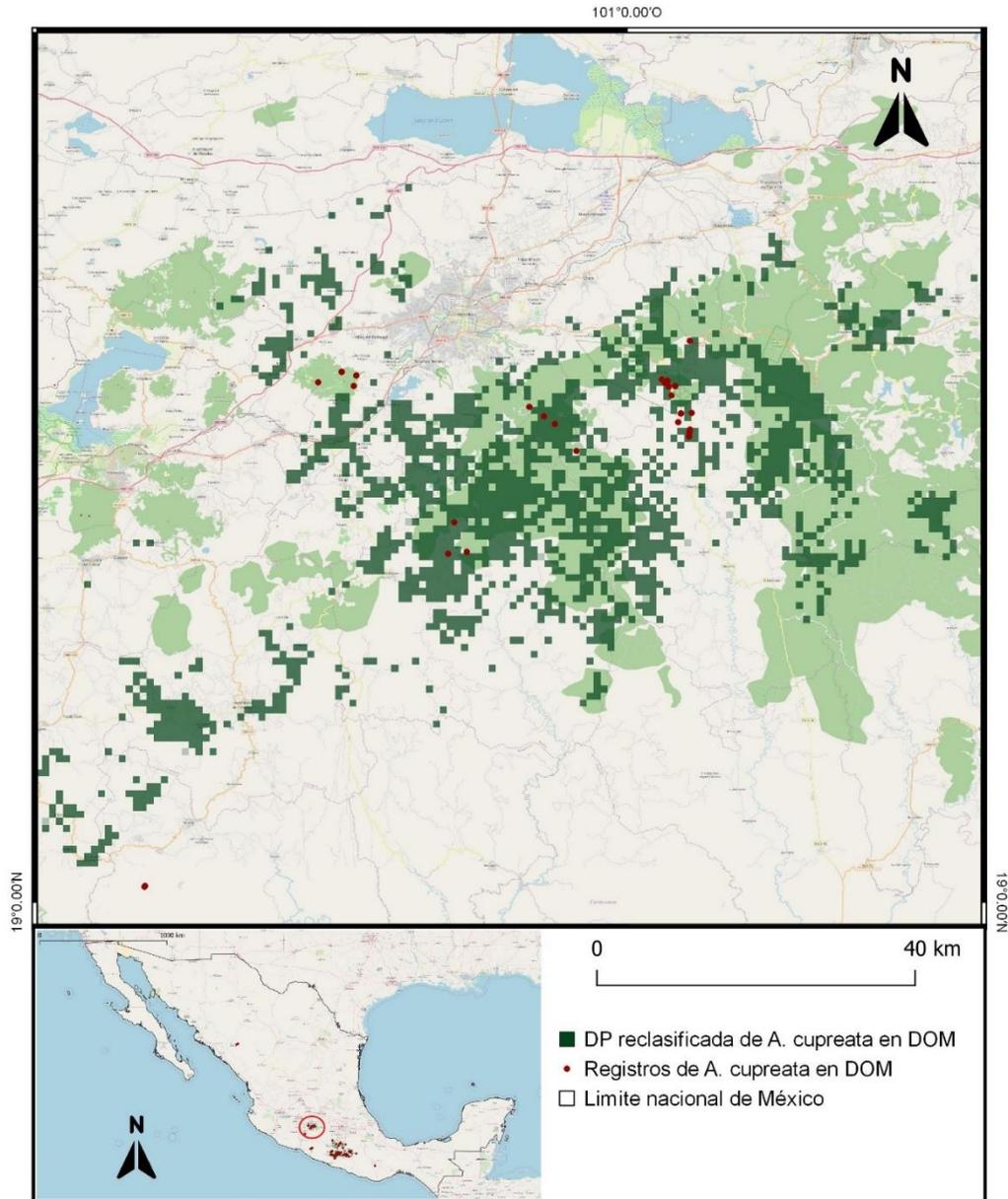


Figura 34. Distribución potencial de *A. cupreata* vista con OpenStreetMap, Michoacán de Ocampo.
Elaboración propia

El *MDP* de *A. marmorata* se distribuye en los estados de Oaxaca y Puebla (estados dentro de la *DOM*), abarcando la Costa Pacífica, la Depresión del Balsas y las Serranías Meridionales (Figura 35-37).

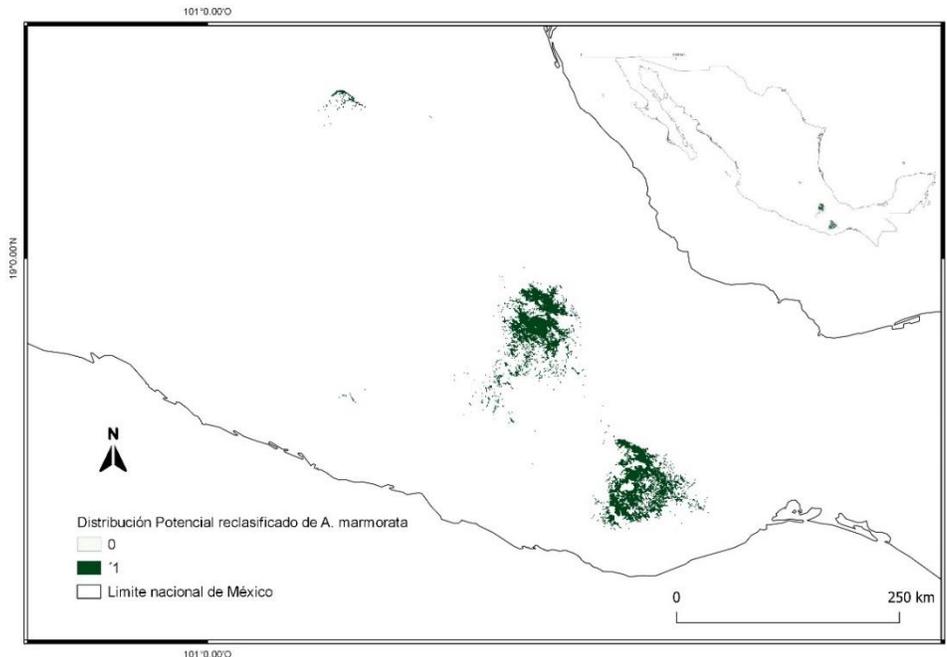


Figura 35. Modelo de distribución potencial de *Agave marmorata*.
Elaboración propia

Además, se observa una separación entre las áreas de distribución potencial en el estado de Oaxaca, con base en las divisiones florísticas, esta área corresponde a la región Mesoamericana de Montaña de las provincias Serranías Meridionales.

Partiendo de la separación de las áreas mencionadas en el párrafo anterior, se hizo el acercamiento a cada una, designándolas como la zona de Puebla – Oaxaca (*PO* de ahora en adelante) y la zona del sur del estado de Oaxaca.

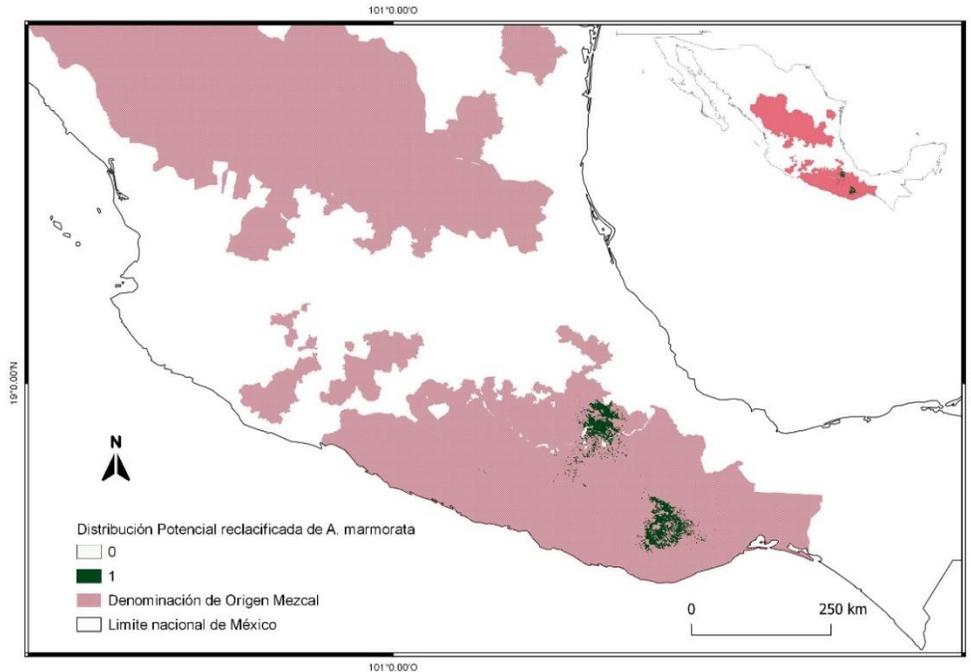


Figura 36. Modelo de distribución potencial de *Agave marmorata* en la Denominación de Origen Mezcal.
Elaboración propia

Los registros de la zona *PO* se observan aglomerados en una zona específica con mayor cercanía al estado de Puebla, alineados a los caminos o carreteras (Figura 37). A diferencia de la zona del sur de Oaxaca, en el cual no se observa un aglomerado de registros, no obstante, los pocos registros que se observan también se ubican emparejados a alguna vía de comunicación (Figura 38).

En la zona *PO* se observa idoneidad ambiental en la zona de Tehuacán y hacia el noreste del estado de Oaxaca, acercándose al estado de Guerrero, hay algunos pixeles que muestran posibilidad de encontrar el ambiente adecuado para la especie *A. marmorata* (Figura 39).

En la zona del sur del estado, la distribución potencial no se distribuye en la cercanía de las zonas en las que podría ocurrir mayor movimiento humano (Figura 40).

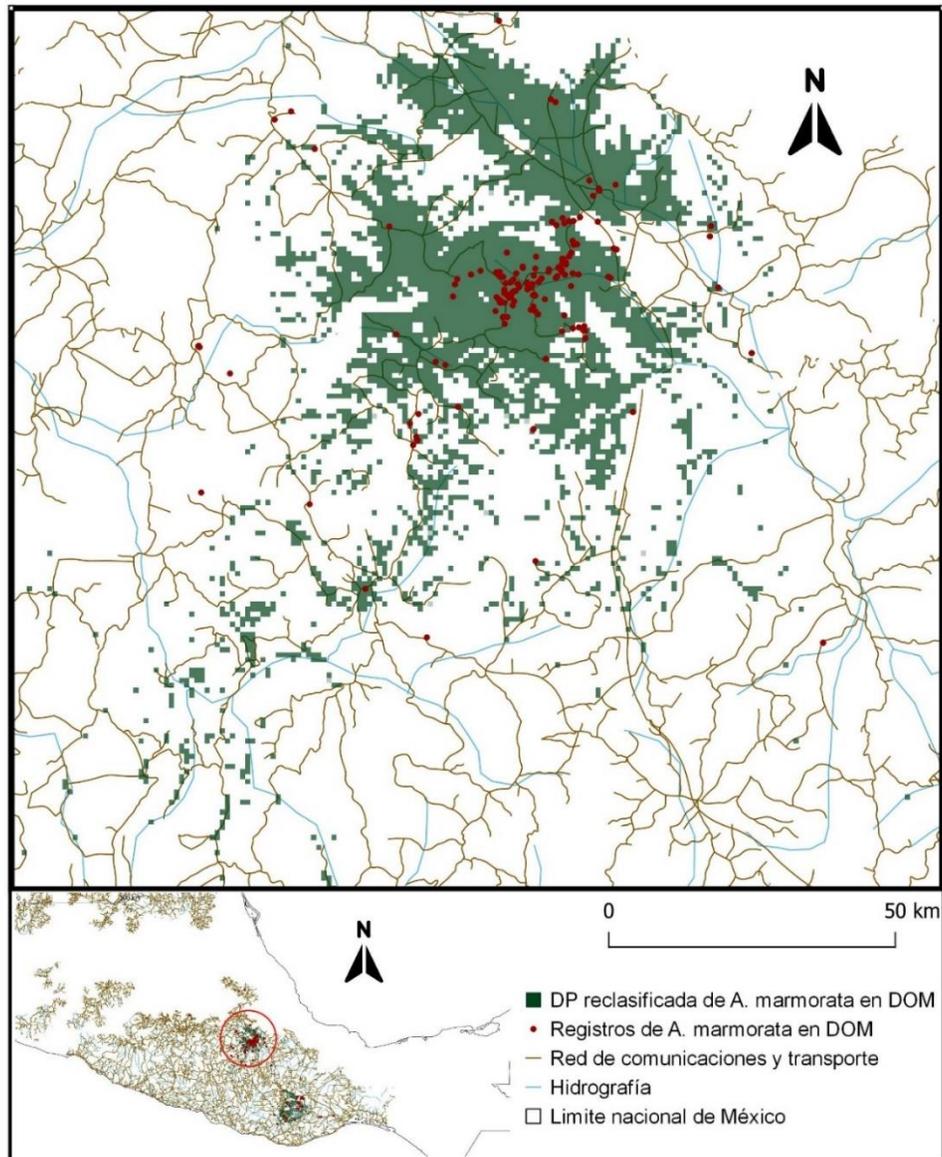


Figura 37. Distribución potencial de *A. marmorata*, red de comunicaciones y transporte y la hidrografía en la DOM, Puebla - Oaxaca.
Elaboración propia

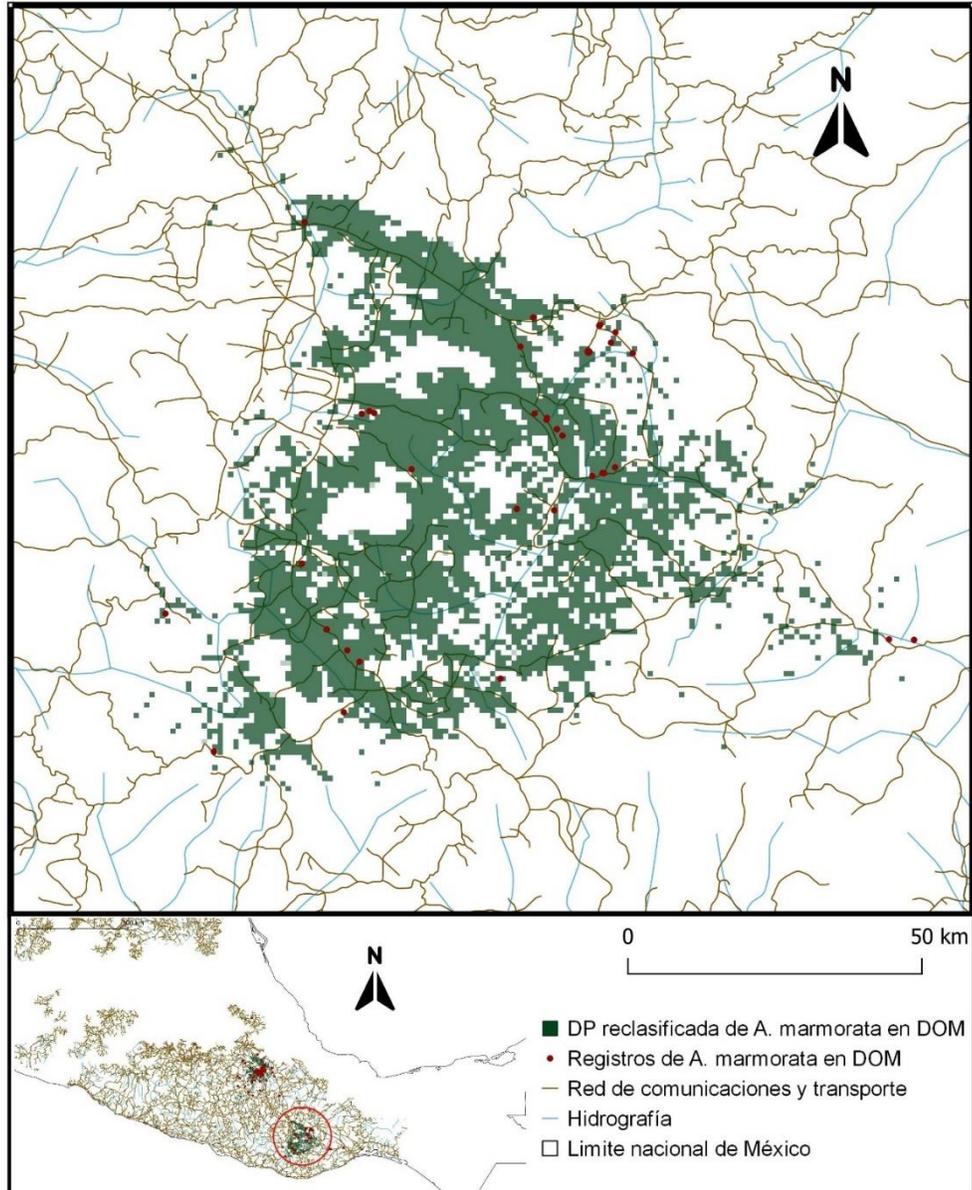


Figura 38. Distribución potencial de *A. marmorata*, red de comunicaciones y transporte y la hidrografía en la DOM, Oaxaca.
Elaboración propia

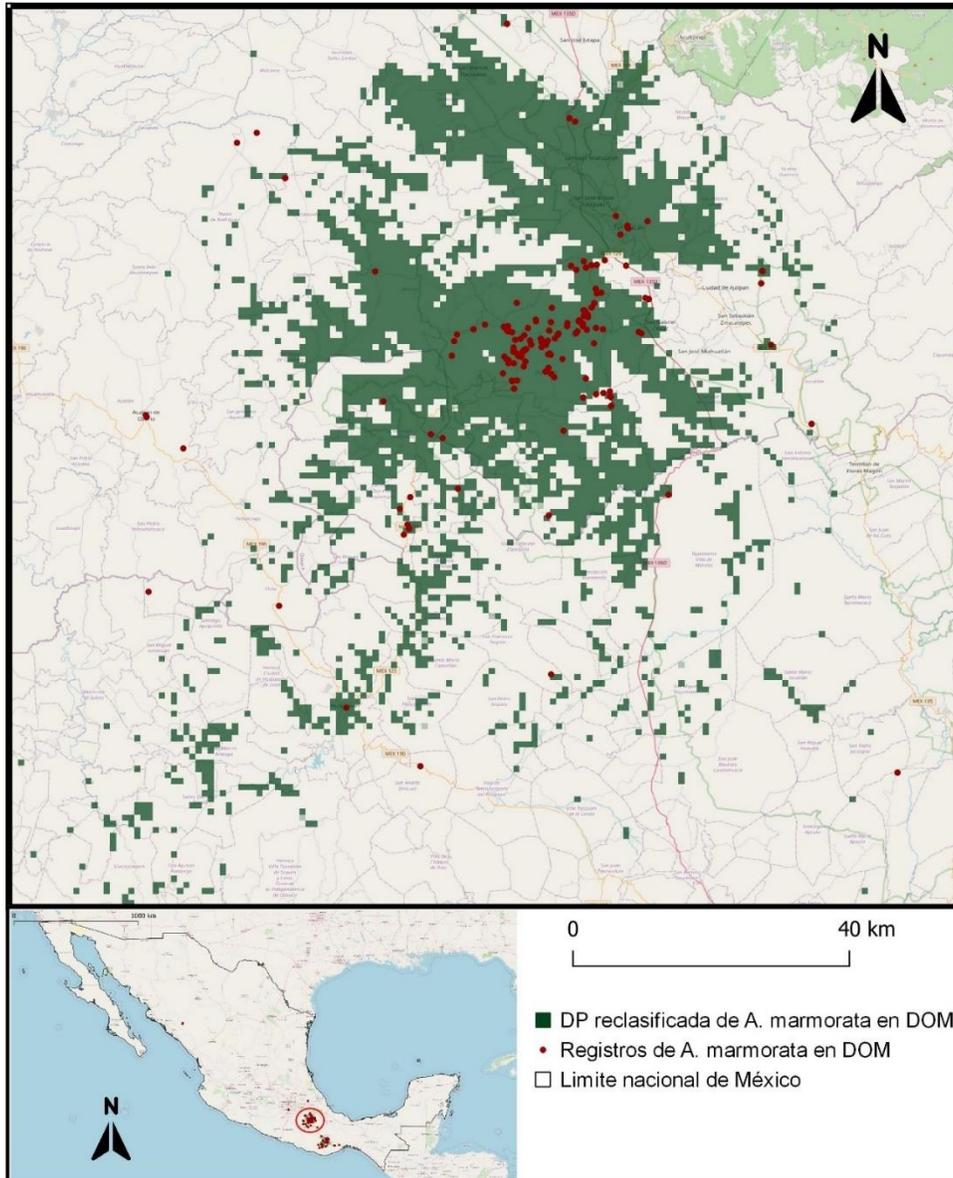


Figura 39. Distribución potencial de *A. marmorata* vista con OpenStreetMap, Puebla-Oaxaca.
Elaboración propia

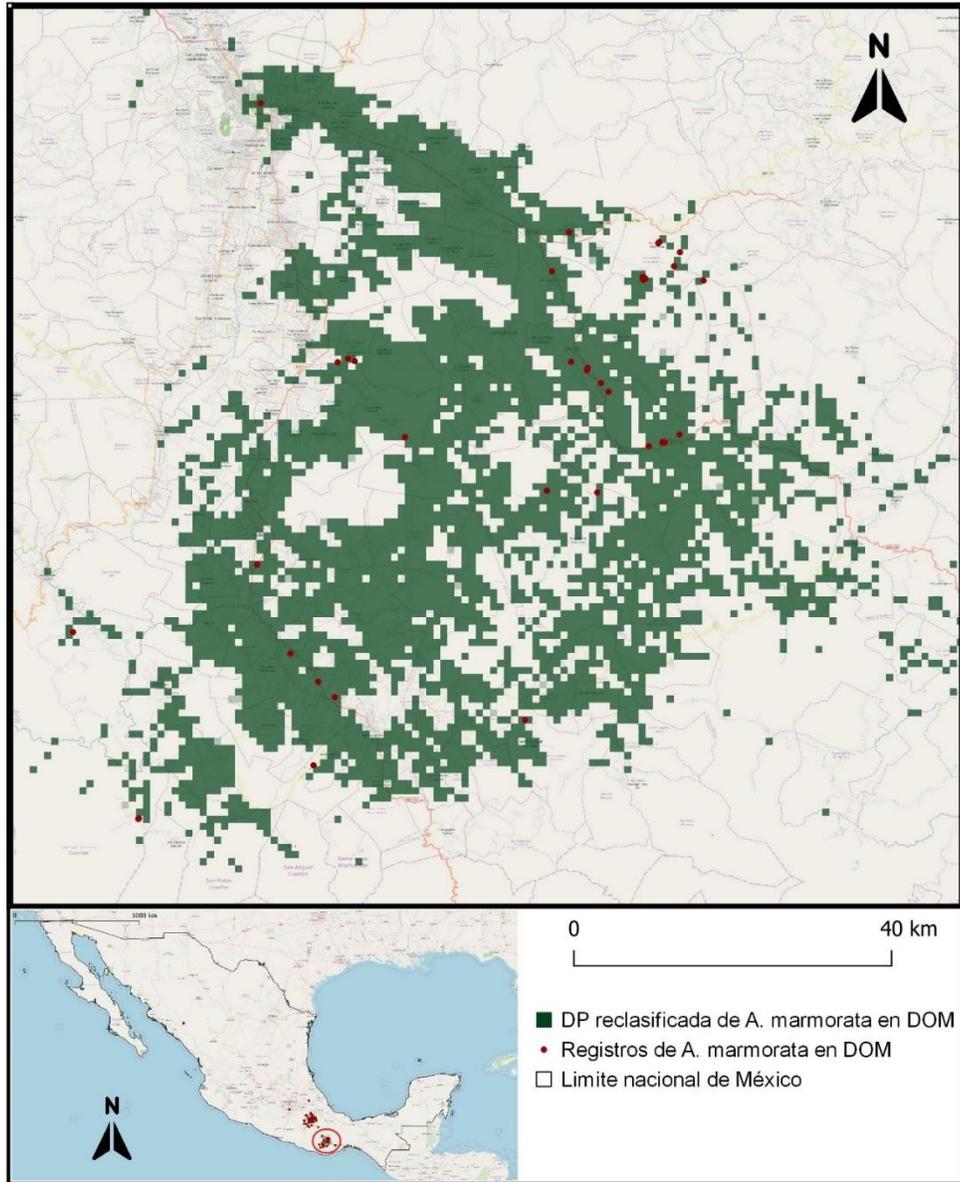


Figura 40. Distribución potencial de *A. marmorata* vista con OpenStreetMap, Oaxaca. Elaboración propia

III. Diseño de estrategia

Para la toma de decisiones existen diferentes modelos, métodos, procesos y variables.

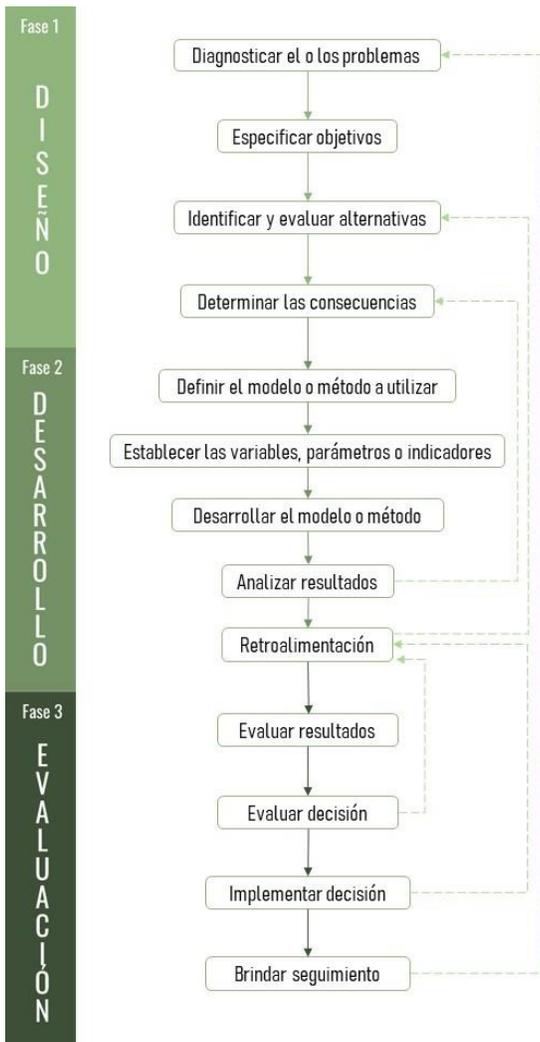


Figura 41. Proceso de toma de decisiones.
Elaboración propia

El modelo por elegir para la toma de decisiones debe considerar el sector económico, social o ambiental en el que se pretendan desarrollar, pueden variar los objetivos y los resultados. No obstante, al sistematizar el desarrollo que se debe llevar a cabo para la toma de decisiones se identificaron tres fases compuestas por 13 pasos a seguir (Figura 41) (FUNDESYRAM, 2011; Posada, 2007; Garza-Ríos *et al.*, 2006; Gallager y Watson, 1982; Keeney, 1982). Al ser un sistema en el que una acción puede tener un gran impacto, es posible retornar a pasos previos para ajustar fallas y reducir los errores.

La búsqueda bibliográfica permitió identificar el estado del arte en la toma de decisiones de empresas cuya materia prima es flora o

fauna. Como se mencionó anteriormente, existen varios métodos y modelos, diferenciándose en cuantitativos y cualitativos.

Los parámetros, indicadores y valores dependen de los objetivos de la investigación o proyecto; se identificaron diferentes tipos, dividiéndolos en: sociales, económicos, biológicos, ecológicos, inocuidad y energéticos (Cuadro 6). Además, en la búsqueda de información sobre la toma de decisiones, se identificaron distintos métodos en los cuales se involucra un panel de expertos. No obstante, no se ubicó un trabajo en cual se incluyera la toma de decisiones sobre la industria mezcalera, en general, lo resultados de este estudio se enfocan al cultivo de especies de agave utilizando modelos de distribución potencial o manuales para el cultivo del mismo.

Por otro lado, los datos relevantes y algunas problemáticas identificadas a través de la investigación realizada sobre el estado del arte y el estado técnico de las especies, se enlistan a continuación:

1. El despojo del meristemo apical de los agaves para la producción de mezcal no permite la floración.
2. El proceso de jima del agave retira las hojas de los individuos, estas hojas se consideran como desechos.
3. El tiempo de maduración de las especies puede generar problemas económicos a los productores.
4. Extracción de ejemplares de especies silvestres para cubrir la demanda de los productos.
5. El número de nombres comunes genera que la identificación taxonómica de las especies sea confusa. Algunos productores desconocen con la especie con la que trabajan.
6. Se han identificado más de 40 especies utilizadas para la producción de mezcal, algunas sin identificación científica.
7. La extracción desmedida de agaves silvestres ha repercutido en las poblaciones, su distribución y la riqueza de las especies.
8. El cultivo intensivo de agaves ha afectado a diferentes ecosistemas, provocando desertificación y deforestación.

9. *Agave angustifolia* es la especie con mayor demanda en la industria de bebidas destiladas, sostiene tres denominaciones de Origen y tiene una amplia distribución.
10. *Agave cupreata* únicamente se reproduce de manera sexual, es una especie cultivada.
11. Se ha identificado la hibridación entre especies ej. *A. potatorum* y *A. cupreata*.
12. No se tienen registros de un banco de germoplasma de especies utilizadas en la industria mezcalera.
13. La Denominación de Origen Mezcal establece que todas las especies del género pueden ser utilizadas para la producción de mezcal, no obstante, debido a características físico-químicas (saponinas, inulina, azúcares reductores totales) de las especies no todas pueden utilizarse para la producción de mezcal.
14. Existe desinformación sobre los azúcares reductores totales de algunas de las especies.

Continuando con la etapa 2 de la toma de decisiones, en el panel de expertos que se designó se conjuntaron expertos de diferentes organizaciones o instituciones, es así que, se contactó a 5 expertos, dos de instituciones públicas pertenecientes a la Universidad Nacional Autónoma de México, una organización de Sommeliers y dos empresas privadas, considerando a la mezcalera “X” (Figura 41).

Institución/Organización	Área
	Biología Productor
	Sustentabilidad Innovación
	Proceso de producción
 	Biología Innovación, Sustentabilidad

Figura 42. Panel de expertos.
Elaboración propia

Cuadro 6. Cuadro comparativo del estado del arte de toma de decisiones. Elaboración propia

Autores	Año	Titulo	URL	Resumen	Método/Modelo utilizado	Variables, indicadores, tema	Herramientas/ software
Peloché, D., Benítez, N., Pareja, L., Bentancur, O., & Palladino, C..	2020	Toma de decisiones e inocuidad: el caso de productores de cebada en Uruguay	https://bit.ly/34C4IRJ	El objetivo de este estudio fue determinar si la toma de decisiones por parte de agricultores afecta la inocuidad de los granos de cebada. Sin embargo, no se pudo demostrar esta hipótesis, no obstante, los autores consideran que la metodología puede ser trasladada a diferentes ámbitos para generar procesos innovadores que sirvan tanto para la sostenibilidad de los sistemas productivos.	Muestreo de Cochran, entrevistas, análisis multivariable, distancia de Gower, análisis de clúster.	Datos generales de la empresa, su gestión, manejo de cultivo, sensibilización en el uso de productos fitosanitarios (26 variables).	Software R
López, F., Gómez, R., Harvey, C., López, M. & Sinclair, F.	2006	Toma de decisiones de productores ganaderos sobre el manejo de los árboles en potreros en Matiguás, Nicaragua	https://bit.ly/34EkeY2	Identificar las principales decisiones que afectan la cobertura arbórea en fincas, así como los factores que inciden en estas decisiones. Identificaron las actividades que tienen un impacto negativo sobre cobertura arbórea.	Clasificación de productores, encuesta semiestructurada, análisis de frecuencia, intensidad y sitio.	Tamaño de la finca, el número de cabezas de ganado, el área de los potreros, los cultivos y las áreas de bosques y tacotales. Control manual, químico y mecánico de malezas en los potreros, aprovechamiento de árboles, poda de los árboles ubicados en las cercas vivas, y cambios de uso de suelo de tacotal a potrero o cultivos y viceversa	Netica

Cont.Cuadro 6. Cuadro comparativo del estado del arte de toma de decisiones. Elaboración propia

Castañeda, K. & Ocampo, L.	2016	Aplicación de modelos de cultivo del café para la evaluación de efectos de variabilidad climática	https://bit.ly/2RTzf5x	El sector cafetero es relevante para la economía colombiana, por lo tanto, la caficultura es una de las apuestas productivas que busca el desarrollo de nichos. Los modelos de simulación y predicción acerca del rendimiento, crecimiento y desarrollo de las plantas, la dinámica de humedad y otros nutrientes pueden permitir la comprensión de la influencia de las variables agroclimáticas en estos impactos.	Modelación de cultivos	Carbono, radiación, transpiración, condiciones climáticas, agua, nutrientes, plagas, temperatura	BIOMA, AquaCrop
Maza-Rojas, B.	2004	Modelos de toma de decisiones de los productores ganaderos respecto al cambio de uso de suelo y la adopción de sistemas silvopastoriles en Costa Rica	https://bit.ly/3uFhQdT	Desarrollaron modelos de decisión para productores ganaderos en Costa Rica. Escogiendo un modelo dinámico y determinístico que permite evaluar el impacto de factores (internos y externos), el pago por servicios ambientales y la adopción de sistemas silvopastoriles. De modo que predice, evalúa distintos escenarios y mide impactos.	Modelo estático de hogar ganadero con optimización lineal, modelo estático de hogar ganadero con tres usos de suelo, modelo estático de hogar ganadero con tres usos de suelo con fórmulas de Becker.	Uso de suelo, tipo de fincas (área y espacio disponible), ganado (edad, peso), mano de obra, días de trabajo, peso vivo, materia seca, crecimiento de forraje	Excel, Matlab
López, M.A., Chávez, B. & Flórez, V.J.	2011	Modelos de cultivos y modelos fenológicos	https://bit.ly/3ie4BOS	Los autores mencionan los diferentes modelos de crecimiento para cultivos, para producción de cultivos, fenológicos y de tiempo térmico. Los modelos de cultivos son una herramienta para el análisis de las decisiones sobre el manejo del cultivo.	Modelos descriptivos y modelos explicativos	Tasa de crecimiento, radiación solar, temperatura, disponibilidad de agua, nutrición, plagas, determinación del área foliar	

Cont.Cuadro 6. Cuadro comparativo del estado del arte de toma de decisiones. Elaboración propia

Pérez, O.M., Telfer, T.C. & Ross, L.G.	2002	Optimización de la acuicultura marina de jaulas flotantes en Tenerife, Islas Canarias, mediante el uso de modelos basados en Sistemas de Información Geográfica (SIG)	https://bit.ly/3vMMcMX	Se seleccionaron las áreas más óptimas para el cultivo de peces en jaulas, definieron las funciones de producción en factores y restricciones. Las fases para el desarrollo del proyecto fueron: razonamiento, diseño y elección.	Análisis multicriterio, modelación, análisis de sensibilidad	Playas, pesca, infraestructura, ambiente marino, deportes náuticos, calidad de agua, impacto visual, restricciones	SIG
Chantre, G.R., Lodovichi, M.V., Blanco, A.M., Bandoni, A.J. & Sabbatini, M.R.	2014	Sistemas de toma de decisiones y su aplicación al manejo de malezas	https://bit.ly/3yYDL31	Desarrollaron un modelo de planteamiento operativo para el manejo de Avena fatua. El principal objetivo fue determinar las mejores prácticas para el uso de herbicidas y maximizar los beneficios.		Tipo de herbicidas, rendimiento, densidad del banco de semillas, fecha de siembra del cultivo, competencia cultivo-maleza, precios, costos,	MPO
Sánchez-Cohen, I., Díaz-Padilla, G., Guajardo-Panes, R. & Macías-Rodríguez, H.	2011	Toma de decisiones para el desarrollo sostenible de los recursos naturales	https://bit.ly/3z7NPHk	Propuesta de algoritmo que permita considerar los tres aspectos fundamentales: equidad, sustentabilidad y crecimiento económico. Teniendo como resultado que las capacitaciones y el acceso a crédito con los mejores cursos de acción.	los sistemas de auxilio en la toma de decisiones (cualitativos y computarizados), matriz de decisiones, análisis de sensibilidad.	Equidad, sustentabilidad, crecimiento económico	Definte
Carrilo, P.	2006	Indicadores ambientales y modelos internacionales para toma de decisiones.	https://bit.ly/2TAtMAR	Explicación de los modelos más utilizados para la toma de decisiones con base en sustentabilidad	Modelo Presión-Estado-Respuesta, modelo fuerza motriz estado-respuesta, modelo fuerzas motrices presión - estado-impacto - respuesta, Modelo – Flujo – Calidad (MFC), Modelo Presión-Estado - Impacto/Efecto-Respuesta, Modelo Presión-Estado - Impacto/Efecto-Respuesta Gestión	Dependiendo del modelo se utilizan diferentes indicadores	

Cont.Cuadro 6. Cuadro comparativo del estado del arte de toma de decisiones. Elaboración propia

Jiménez-Lozano, G. & Jiménez-Muñoz, A.	2012	Algunos modelos de toma de decisiones	https://bit.ly/3fKaFgu	Resumen y ejemplos de diferentes alternativas para la solución de problemas, comprendiendo los factores para tomar una decisión acertada.	Matriz de decisiones con diferentes criterios, programación lineal, decisión multicriterio y análisis multiobjetivo, teoría de juegos	dependen del tipo de decisión que se quiere hacer: en ambiente de certeza, en ambiente de riesgo, en ambiente de incertidumbre, con información experimental, sin información experimental.	
Cortés-Cortés, M.E. & Sánchez-Navarro, T.M.	2008	Modelo lineal multiobjetivo para la toma de decisiones en alimentación del ganado.	https://bit.ly/3vNI27y	Desarrollo de una modelación matemática para brindar soluciones a la dieta del ganado, permitió un ahorro de 109 414 pesos cubanos.	Modelo lineal multiobjetivo	tipos de cultivo, nutrientes, dieta del animal, presupuesto económico, área total a cultivar o a limpiar	
Martínez-Rojas, N. & Andrade-Sosa, H.H.	2016	Integración de la lógica difusa a la dinámica de sistemas para la selección de terrenos de cultivos agrícolas	https://bit.ly/3ci2Jkj	Permite los productores y expertos de la agroindustria, analizar la calidad del terreno para un cultivo determinado por medio de controladores lógicos, con el fin de conocer que tan apropiado es el terreno para determinado cultivo y la relación entre la calidad del terreno y los rendimientos por hectárea.	Dinámica de sistemas y lógica difusa	Clima, factores del suelo, hectáreas, siembra, producción,	Evolución
García-Alcaraz, J.L.	2016	Modelos multivariados para la toma de decisiones en sistemas productivos: Estudio de caso en la industria vitivinícola (España) y maquiladora (México)	https://bit.ly/2RnJ1MW	Tesis doctoral que evalúa diferentes sectores en ciudades diferentes. Aplican diferentes modelos para obtener el mejor y que sea más eficaz para la industria.	Entrevistas, estandarización de variables, desviación estándar, pruebas de multicolinealidad, análisis descriptivo, validación de cuestionario, modelo de ecuaciones estructurales, eficiencia del modelo, análisis univariado y factorial, matriz de correlaciones, prueba de esfericidad de Bartlett.	Variables proporcionadas por las respuestas del cuestionario	SPSSv.21

Cont.Cuadro 6. Cuadro comparativo del estado del arte de toma de decisiones. Elaboración propia

Fernández DE Castro, Fabre, A. y López-Padrón, A.	2013	Validación mediante método Delphi de un sistema de indicadores para prever, diseñar y medir el impacto sobre el desarrollo local de los proyectos de investigación en el sector agropecuario	https://bit.ly/38az2PK	Designaron indicadores para prever, diseñar y medir el impacto sobre el desarrollo local con base en la opinión de 17 expertos.	Método Delphi, estadística	Impacto económico (17), impacto de conocimiento (12), impacto social (6), impacto medioambiental (5).
Meza-Sepúlveda, D.C., Quintero-Saavedra, J.I., Zartha-Sossa, J.W. y Hernández-Zarta, R.	2020	Estudio de prospectiva del sector cacao al año 2032 como base de programas de capacitación universitaria en el sector agroindustrial. Aplicación del método Delphi	https://bit.ly/3sOQX7X	Designaron dos rondas para la consulta de temas prioritarios, pasaron de 42 temas a 19 temas prioritarios. Participaron 100 expertos en la primera ronda, posteriormente únicamente se quedaron 17 expertos. Mencionan la necesidad de la vinculación entre los productores, comercializadores y funcionarios de gobierno.	Vigilancia tecnológica, método Delphi	Calidad de grano, injertación, acceso a asistencia técnica, transferencia de tecnología, Denominación de Origen, plan de manejo ambiental,
Zartha-Sossa, J.W., Montes, J.M., Vargas, E.E., Arias, O. y Hoyos, J.L.	2015	El método Delphi modificado. Un acercamiento desde la Metodología de Sistemas Suaves	https://bit.ly/3gti6IT	Realizaron una consulta a 14 expertos acerca de la diferencia entre diferentes métodos utilizados para la gestión de la innovación.	Metodología de sistemas suaves, metodología de Checkland, método Delphi, matriz de alineamiento M1, estrategias y modelos de innovación.	Estrategia de innovación, modelos de gestión de innovación.
Palacio, J.C., Hernández-Zarta, R., Ríos, A.F., Zartha-Sossa, J.W.	2016	Estudio de Prospectiva: Aplicación del método Delphi en Cafés Especiales en Colombia al 2025	https://bit.ly/3sLIAey	Identifican distintas áreas de oportunidades en el sector del café, así como de áreas de prioritarias.	Vigilancia tecnológica, método Delphi	Innovaciones, tecnologías, nuevos negocios, estrategias de difusión y comercialización.

Posterior al contacto con los expertos y realizar la entrevista semi estructurada, se identificaron las siguientes soluciones con base en los puntos antes redactados:

1. PROBLEMA: El despojo del meristemo apical de los agaves para la producción de mezcal no permite la floración.
1. SOLUCION: Mantener un porcentaje de la población o cultivo con meristemo, permitiendo la floración de los individuos.
2. PROBLEMA: El proceso de jima del agave retira las hojas de los individuos, estas hojas se consideran como desechos. Además, al final del proceso, se generan residuos como vinazas y gabazo.
2. SOLUCION: Desarrollar proyectos que involucren economía circular y biotecnología para aprovechar este residuo. También utilizar las hojas para la extracción de ixtle y la generación de artesanías. En el caso de las vinazas y el bagazo, considerar desarrollar un manual para el desecho o el reúso de estos residuos, de modo que la producción de mezcal sea más sustentable. Aplicar paquetes tecnológicos (“Conjunto de conocimientos científicos, empíricos y comerciales, procesados y sistematizados, con los que es posible implementar, operar, producir y/o distribuir un bien o servicio, nuevo o mejorado”- Banco Mundial 2021 p. 2) en la cadena de producción de agave, desde el cultivo hasta los residuos.
3. PROBLEMA: El tiempo de maduración de las especies puede generar problemas económicos a los productores.
3. SOLUCION: Realizar policultivos o permacultura en conjunto con las diferentes especies de agave para que los productores tengan otro medio de ingresos económicos.
4. PROBLEMA: Extracción de ejemplares de especies silvestres para cubrir la demanda de los productos.
4. SOLUCION: Desarrollar programas que permitan el manejo sustentable de las especies, además, proporcionar manuales a los productores para que puedan propagar las especies silvestres sin afectar a los ecosistemas.
5. PROBLEMA: No se tienen registros de un banco de germoplasma de especies de agave.
5. SOLUCION: Generar bancos de germoplasma o generar un curso o taller para productores en los que se les enseñe a designar semillas de especies de agave para la producción futura y la variabilidad genética de las especies. Proponer un banco de semillas a nivel nacional para salvaguardar la variabilidad genética del género.
6. PROBLEMA: El número de nombres comunes genera que la identificación taxonómica de las especies sea confusa para los investigadores, ya que al realizar investigaciones en campo, en ocasiones no se cuentan con los ejemplares y los productores únicamente conocen el nombre común de las especies, lo que imposibilita la correcta determinación, añadiendo el número de

- nombres comunes similares utilizados para las especies de agave. Algunos productores desconocen con la especie con la que trabajan.
6. SOLUCION: Realizar un taller o curso de “para-taxónomos”, es decir, proporcionar a los interesados en agave un manual y una explicación para que puedan identificar a las especies en campo por su nombre científico, además, proporcionar una guía para sacar fotografías y que los expertos puedan corroborar la especie.
 7. PROBLEMA: Se han identificado más de 40 especies utilizadas para la producción de mezcal, algunas sin identificación científica. Algunas especies se podrían encontrar en alguna categoría de riesgo, además, dados los compuestos químicos de las hojas existen algunas especies con las que no se puede producir mezcal.
 7. SOLUCION: Realizar un taller o curso de “para-taxónomos”. Además, realizar un proyecto de identificación de las especies utilizadas para la producción. Incluir la ciencia ciudadana para la identificación y distribución de las especies.
 8. PROBLEMA: El cultivo intensivo de agaves ha afectado a diferentes ecosistemas, provocando desertificación y deforestación.
 8. SOLUCION: Diseñar programas de cultivo más sustentables, incluyendo la rotación de cultivo, agroforestería y los policultivos.
 9. PROBLEMA: *Agave angustifolia* es la especie con mayor demanda en la industria de bebidas destiladas, sostiene tres denominaciones de Origen y tiene una amplia distribución.
 9. SOLUCION: Poner énfasis en la especie *A. angustifolia* dado que su uso y aprovechamiento en México es exhaustivo. Además, dado su domesticación, su variabilidad genética y la distribución en el país, podría existir especiación entre las diferentes poblaciones silvestres que se distribuyen en el territorio mexicano. Es por esto que se considera necesario realizar una exploración a fondo sobre esta especie, considerando su biología (genética) y distribución.
 10. PROBLEMA: *Agave cupreata* únicamente se reproduce de manera sexual, es una especie cultivada.
 10. SOLUCION: Definir esquemas de cultivo y producción de la especie, incentivar a la producción en viveros de la especie y destinar un banco de germoplasma en diferentes áreas de su distribución para propiciar la variabilidad genética de la especie. Es imprescindible destinar una parte de la población (cultivo o silvestre) de *A. cupreata* que permita la floración.
 11. PROBLEMA: Se ha identificado la hibridación entre especies ej. *A. potatorum* y *A. cupreata*.
 11. SOLUCION: Identificar si las especies pueden ser viables para la reproducción y fertilidad, realizar un estudio en áreas de convergencia de ambas especies para identificar a los híbridos. Identificar si estos híbridos son reconocidos por las comunidades aledañas para establecer si se han utilizado para su destilación. A futuro, si es una nueva subespecie o especie nueva, generar propagación de la misma y realizar estudios sobre su biología y sistemática.
 12. PROBLEMA: La Denominación de Origen Mezcal establece que todas las especies del género pueden ser utilizadas para la producción de mezcal, no

obstante, debido a características físico-químicas (saponinas, inulina, azúcares reductores totales) de las especies no todas pueden utilizarse para la producción de mezcal

12. SOLUCION: Es necesario que a través de los productores se identifiquen taxonómicamente las especies con las que produce la destilación (introducción de un curso de “para-taxónomos”. Tener una base de datos de las especies con las que trabaja la industria mezcalera, diferenciar las especies por sus usos en otras industrias. Además, es imprescindible limitar las especies que se pueden utilizar para la *DOM* dado que no todos los destilados de agave pueden ser consumidos por el humano.
13. PROBLEMA: Existe desinformación sobre los azúcares reductores totales de algunas de las especies.
13. SOLUCION: Posterior a la identificación de las especies, crear una tabla de medición de los ART es conveniente, además, se podría realizar selección artificial de los individuos que tengan el porcentaje adecuado ART, fomentando la reproducción sexual de las especies.

De acuerdo con las soluciones y propuestas anteriores, se pueden utilizar los modelos de distribución potencial para identificar áreas con idoneidad ambiental (considerando el uso de suelo, los tipos de propiedad, los productores, relieve, siempre respetando las dinámicas de los ecosistemas), determinar las especies de polinizadores y plantas que se ubican en las zonas con idoneidad ambiental para establecer sistemas de cultivo (policultivos o permacultura) sustentables, sin generar grandes perturbaciones en el ecosistema. Es necesario establecer una red de grupos focales de productores (en diferentes áreas, dependiendo de la distribución de las especies y de la *DOM*) que involucren la identificación de las especies, incluyendo sus usos en la industria mezcalera y en otras industrias, el modo de establecer policultivos o aplicar agroforestería, generar un banco de semillas de agave para propiciar la reproducción sexual de las especies y el modo de desecho o uso de los residuos.

Para el caso de la empresa, identificar áreas cercanas a la ubicación municipal de los productores y contactar más productores, lo cual permitiría aumentar la producción y realizar de una manera más eficiente las propuestas establecidas con anterioridad. Considerar municipios o estados específicos podría mejorar las probabilidades de las zonas idóneas.

Por otro lado, con base en las tres especies utilizadas en este proyecto, debido a la cercanía entre sus distribuciones, las zonas con idoneidad ambiental podrían ubicarse en la zona distribución potencial conjunta, lo cual reduciría en gran medida los procesos del objetivo sobre la red de productores. Ahora bien, continuando con la estrategia, el considerar los modelos de cultivo para las especies de agave podría tener más peso, tomando en cuenta las variables que afectan en mayor medida a la idoneidad ambiental para cada una de las especies. Además, pensar en los polinizadores de las especies y generar modelos de distribución potencial de los mismos para posteriormente unir ambos modelos y generar mejores resultados también se podría considerar como otra alternativa. En conjunto a las interacciones bióticas, los agaves pueden crecer en conjunto o solitarios, lo cual no se ha considerado en este proyecto, pero queda como un tema abierto a investigación.

Finalmente, cabe mencionar que este ejercicio no se puede aplicar de manera directa en este momento del proyecto, ya que como se mencionó con anterioridad, los resultados no se observarían en un periodo de corto plazo. Además, con la ubicación de los productores a nivel estatal, no fue posible desarrollar a más profundidad este tema en esta tesis.

VII. Discusión

I. Revisión técnica, taxonómica y biológica de las especies de agave

La importancia de conocer la taxonomía completa, es decir, las sinonimias, las subespecies y las variedades de las especies, se debe a que es necesario considerar la distribución realizada de la especie, ya que el objetivo es tener un panorama sobre la distribución potencial de las mismas, además, es necesario comprobar las listas de sinónimos para asegurarse de que se asignan todos los registros a la especie correcta (Newbold, 2010). Es por esto que el realizar adecuadamente las bases de datos de registro de presencia para correr el modelo de distribución potencial y permite reducir los sesgos espaciales y taxonómicos (Soberón *et al.* 2000). Por otro lado, la identificación de los nombres comunes de las especies, además de ser un indicador de la importancia biocultural, puede facilitar la caracterización de las mismas en el campo, debido a las interacciones y la cultura de los productores y campesinos ubicados en las zonas rurales que se encuentran dentro de la distribución realizada de las especies de agave (Colunga-GarcíaMarín, 2006). Adicionalmente, el conocer los nombres comunes que se designan para una especie es de utilidad ya que se puede denominar una misma especie botánica con los diferentes nombres en diferentes áreas geográficas y culturales, permitiendo a los investigadores designar posteriormente el nombre científico de la especie (Mejía, 1984; Colunga-GarcíaMarín, 2007).

La cantidad de nombres comunes de *Agave angustifolia* se debe a su amplia distribución por el territorio mexicano: en consecuencia, el uso que se le ha dado a esta especie por los grupos humanos es amplia (Colunga-GarcíaMarín *et al.* 2017; Vázquez-

García *et al.* 2007). La vegetación en la que se ha ubicado a esta especie va desde dunas costeras al nivel del mar hasta bosques de pino-encino y roble (García-Mendoza y Chiang, 2003). García-Mendoza (2011) considera que el área de distribución de esta especie es gracias a su diversidad morfológica y su capacidad de adaptación, lo cual también explica el porqué es la especie con mayor número de sinonimias y variedades en este proyecto. Aunque la domesticación de esta especie ha sido de importancia para las industrias, tal como lo fue en la industria tequilera; Barrea-Barrientos y colaboradores (2019) concluyen que la selección artificial de esta especie es notable definiendo dos grupos en un dendograma, diferenciando a los taxones vegetales por su nombre común: espadín y sacatoro.

Además, relacionado con la distribución (silvestre y cultivada) y los nombres comunes, el uso de esta especie dentro de la industria de bebidas destiladas es igual de amplia. La cantidad de litros producidos por la industria mezcalera es alta y además tiene un uso como materia prima de otras denominaciones de origen: bacanora y raicilla (DOF, 2019; NOM-168-SCFI-2004). A diferencia de esta especie, *A. cupreata* y *A. marmorata*, tienen un número menor de nombres comunes y su distribución es reducida en comparación. La especie con menor ocupación en el territorio es *A. marmorata*, pero tiene más nombres comunes que la especie *cupreata*, no obstante, esta especie se conoce con nombres en alguna lengua o dialecto, lo cual podría estar relacionado con su distribución en el estado de Oaxaca y Puebla, estados con alta riqueza cultural y biológica (Miguel-Vázquez *et al.*, 2020; García, 2016; Silverio, 2016; Ordóñez y Rodríguez, 2008; CONACULTA, s.f.).

Ahora bien, el tiempo en el que los agaves llegan su madurez fisiológica es importante para la industria mezcalera, dado que es el momento en que los productores cortan el meristemo apical que da pie a la inflorescencia. Al retirar el meristemo apical, no se permite a las especies generar una inflorescencia y, por lo tanto, no hay floración ni fructificación, este proceso tiene repercusiones tanto para la variabilidad genética de la planta como para sus interacciones bióticas, en específico, sus polinizadores. Algunos de los polinizadores que se han identificado para los agaves son esfíngidos, himenópteros, aves, marsupiales y murciélagos (Figura 43) (Arreola-Gómez *et al* 2020; León y Torres-García, 2015; Trejo-Salazar *et al.*, 2015; Palacios, 2011; Molina-Franer y Eguiarte, 2003; Ornelas *et al.*, 2002; Arizaga *et al.*, 2000; Eguiarte *et al.*, 2000).

.Las dos especies de marsupiales se identificaron como polinizadores para *A. cupreata* en el estado de Michoacán de Ocampo (Arreola-Gómez *et al* 2020). Para *A. marmorata*, en el Valle de Tehuacán, se identificaron 12 especies distintas de aves que se alimentan del néctar de las flores, no obstante, se identificó que el polinizador principal de esta especie es el género *Icterus* (Ornelas *et al.*, 2002).

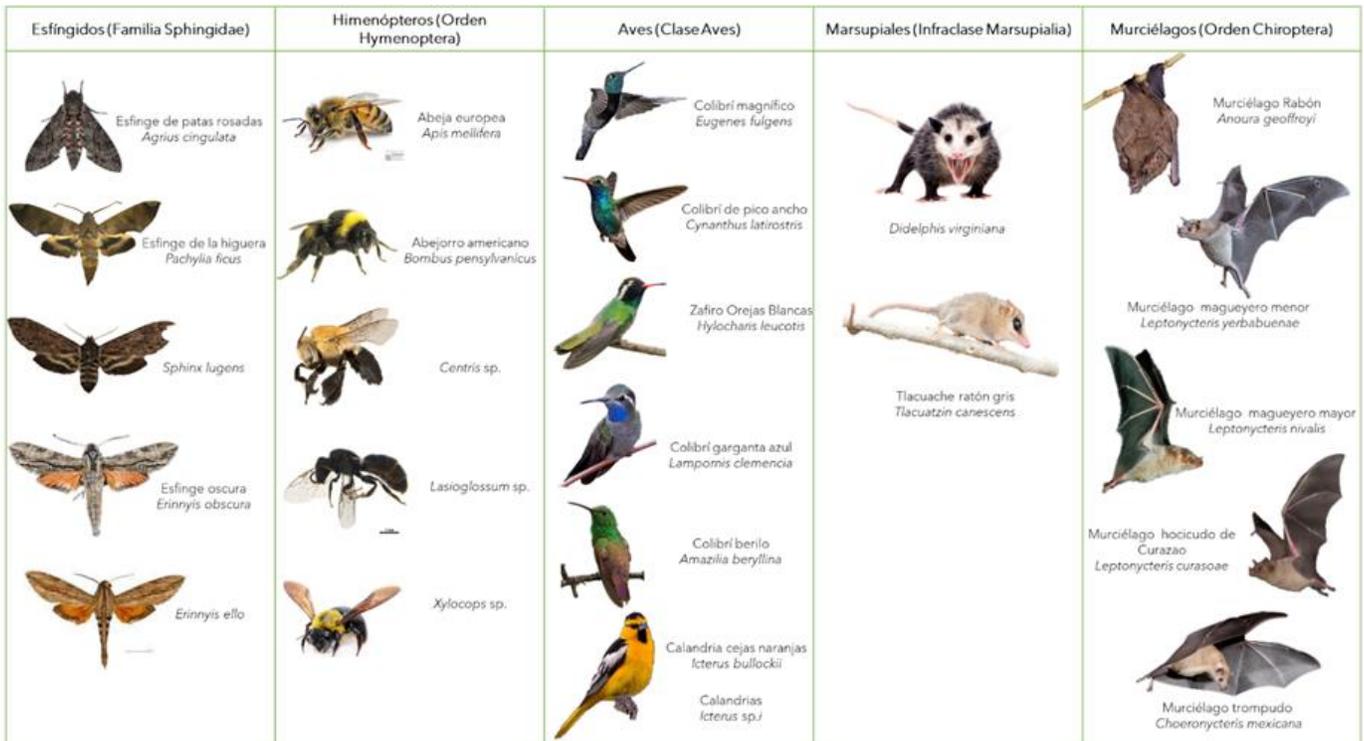


Figura 43. Polinizadores del género Agave.
Elaboración propia

Considerando las zona del estado de Michoacán de Ocampo y del Valle de Tehuacán, en conjunto a la distribución de alguna de las especies de marsupiales o de calandrias, se podría realizar un modelo de nicho ecológico para las respectivas especies (en este proyecto no sé realizo este proceso debido a que no fue considerado dentro de los objetivos). Además, sería necesario considerar los aspectos biológicos y biográficos de los polinizadores y reducir el tamaño del área accesible para que concuerde tanto para la planta como para su polinizador (Figura 44).

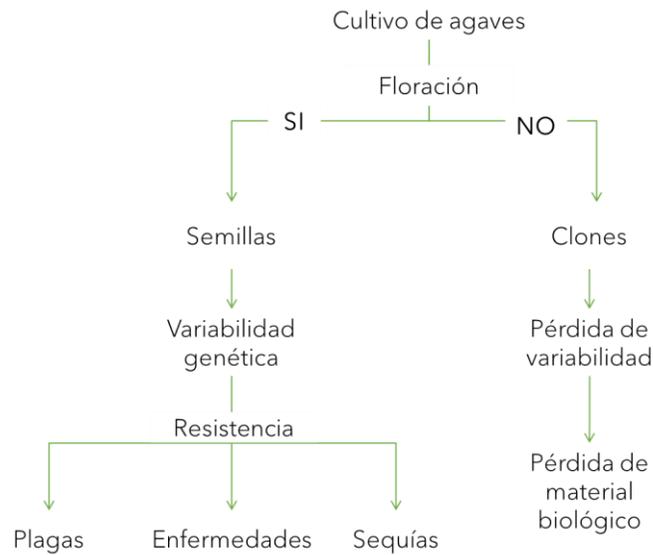


Figura 44. Consecuencias de permitir o negar la floración de los agaves utilizados en la industria mezcalera.

Elaboración propia

Dentro de la industria del mezcal existe el temor de que se sigan los mismos pasos que tomó la industria tequilera, con la baja variabilidad genética de las poblaciones de *Agave tequilana* Weber var. azul y el uso único de una especie para la producción. Como un método para reducir la homogeneidad genética de las poblaciones y contribuir al aumento de las poblaciones de polinizadores, en particular de los murciélagos (*Leptonycteris yerbabuena*), Medellín y colaboradores han propuesto a los productores de tequila, que permitan un porcentaje de la parcela o del cultivo para su floración, dando como incentivo una certificación llamada “bat friendly” (Medellín *et al* 2017ab; Trejo *et al.* 2017; Medellín y Eguiarte, 2016).

Para las poblaciones cultivadas y silvestres utilizadas para la elaboración de mezcal, sería de importancia utilizar esta propuesta de igual modo y considerar utilizar el germoplasma de las especies para su uso en centros de cultivo, propagación y viveros (sustentables). Importante mencionar que este proceso se realiza actualmente con *A. cupreata* ya que únicamente se reproduce de manera sexual, por lo que algunas organizaciones no gubernamentales siembran esta especie en viveros y algunas comunidades en Chilapa, Guerrero que contribuyen al manejo sustentable de esta especie (Pérez-Hernández *et al.*, 2016; com.persn. I. Granich, 2004 en Martínez-Palacios *et al.*, 2011).

Retomando la domesticación de la *A. angustifolia* y el ciclo de vida, podría ser que este tiempo sea el menor de las tres especies debido a su selección artificial y a la domesticación que han sufrido por el humano, ya que *A. cupreata* es la especie más pequeña de las tres y crece en un periodo mayor a los años que tarda la especie *angustifolia*, no obstante, de acuerdo con García-Mendoza (2007) los agaves grandes alcanzan su madurez entre los 10 y 25 años y los pequeños entre cuatro y cinco años. Aunque el Centro de Investigación y Asistencia en Tecnología y Diseño del Estado de Jalisco A.C. (CIATEJ por sus siglas) (2014), menciona que el tipo de suelo, la humedad, el grado de exposición al sol, el tipo de vegetación asociada entre otros, también se consideran algunos de los factores que influyen en el tamaño y el tiempo de madurez de las plantas.

Los tipos de vegetación en los que se distribuyen los registros de las especies estudiadas en este proyecto concuerdan con lo que se menciona en la literatura.

Para el caso de *A. cupreata*, la mayor distribución de la especie se consolida en los bosques de *Quercus* y en los bosques tropicales secos del sur del territorio mexicano (Pérez-Hernández *et al.* 2016), aunque *A. marmorata* también se puede distribuir en estos tipos de vegetación. Respecto al intervalo altitudinal, se ha estimado que los agaves son más abundantes entre los 1000 y 2000 *msnm*, pero pueden llegar hasta los 3400 *msnm* (García-Mendoza, 2007), las tres especies se ubican entre estos intervalos. Aunque *A. cupreata* se distribuye exactamente entre este rango establecido, de acuerdo con Gentry (1982), esta especie se ubica entre los 1200 y 1890 *msnm*, lo cual concuerda con la información obtenida para la infografía. Por otro lado, *A. angustifolia* se ubicó hasta los 1770 *msnm*, no obstante, se ha registrado a esta especie hasta 2200 *msnm* (García-Mendoza y Chiang, 2003).

Algunos productores consideran que el sabor del mezcal está relacionado con la altitud, el tipo de suelo, las levaduras y las manos del maestro mezcalero (F. Olachea, com. pers., 2020). El mezcal proviene de la destilación del fermentado de la piña, la fermentación permite convertir los azúcares que se encuentran en la cabeza de la planta en alcohol (Pérez-Hernández *et al.*, 2016; Tornes y Hernández, 2015; CIATEJ, 2014).

La cantidad de azúcares reductores totales que un buen maguey debe tener para que la calidad del destilado y el porcentaje de alcohol sea adecuada, debe ser entre el 25% y 30% de los mismos (Bautista-Justo *et al.* 2011), tanto *A. angustifolia* como *A. cupreata* se encuentran en este porcentaje, es necesario realizar una investigación de los ART de *A. marmorata*.

Ahora bien, el tamaño de la piña varía debido a su madurez fisiológica, algunas piñas pueden ser más pequeñas que otras (CIATEJ, 2014), lo cual se observa en las diferencias de tamaño en descripciones morfológicas, además, también se ha considerado que por esto el promedio del peso proporcionado por las empresas y la encontrada en la literatura varía. Sin embargo, para identificar el porcentaje de *ART* y el peso de las especies utilizadas por la empresa "X", se recomienda realizar un método particular para conocer con más exactitud ambos parámetros. He considerado de suma importancia recalcar la cantidad de litros extraídos, la cual aumento en más de setecientos mil litros del año 2019 al 2020, y el uso de la especie *angustifolia* paso de un 86% a un 90% (CRM, 2019, 2020), datos que me parecen alarmantes, y confirman que el problema mencionado por Carrillo-Trueba (2007), en donde la Denominación de Origen Mezcal está siguiendo los pasos del tequila, produciendo la bebida con pureza varietal y no toma en cuenta la diversidad de variedades y especies que existen, lo que genera cambios que empobrecen todos los mezcales. Es procurar los servicios ecosistémicos y pensar que la calidad no sólo está en el producto, sino en las buenas prácticas de producción y su relación con el ambiente (Larson, 2006).

En cuanto a la distribución espacial de los registros de las especies, las bases de datos seleccionadas para la extracción de los mismos permitieron realizar la depuración bajo los criterios establecidos, lo cual permitió eliminar la información errónea o incompleta almacenada. No obstante, aunque se hizo una selección de los registros georreferenciados, los datos podrían tener errores de entrada, generando posibles errores en la distribución de los mapas; es por esto que el segundo criterio (seleccionar

puntos georreferenciados por una institución/universidad) se considera importante para reducir este tipo de errores, con una identificación por expertos y un método de muestreo eficiente, sin embargo, también podrían existir errores taxonómicos (Mathew *et al* 2014; Lash *et a l.*, 2012; Chapman, 2005; Soberón *et al* 2000). Aunque el uso de los datos abiertos de museos permita generar nueva información, es necesario realizar una correcta limpieza detallada de los datos (Simoes y Peterson, 2018).

La información almacenada en la base de datos del portal *GBIF* <<https://www.gbif.org/>>, pasa por una serie de metodologías integrales que permiten la evaluación de contenido, generando que los datos tengan valor para las investigaciones científicas; aun así, la duplicación de datos puede ocurrir cuando el mismo conjunto de datos se publica en diferentes ocasiones a través del portal (Gaiji *et al.* 2013). Además, las bases de datos de la Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de Biodiversidad SNIB <<http://www.snib.mx/ejemplares/descarga/>> y del portal de datos abiertos de la Universidad Nacional Autónoma de México en la sección de colecciones biológicas: Herbario Nacional de México <<https://datosabiertos.unam.mx/biodiversidad/>>, pueden tener información duplicada debido a las colaboraciones realizadas en proyectos, es decir, varios registros provenientes del mismo espécimen o de un espécimen que se divide y se almacena en varios museos; la eliminación de los registros duplicados reduce la sobreestimación, el sesgo de la distribución y la colinealidad espacio ambiental (Gaiji *et al.* 2013; Soberón *et al.* 2000).

Otro punto a resaltar es que en este proyecto no se realizó una re-georreferenciación de los registros que se consideraban extraños dada la distribución conocida para las especies, Bloom y colaboradores (2017) desarrollaron el método de Precisión de Georreferenciación de Análisis Espacial (SAGA por sus siglas en inglés) para estandarizar el proceso de georreferenciación, método que mejoraría la precisión de los todos registros que se realicen.

Con respecto a la distribución de las especies en el territorio mexicano, no se tienen registros de *A. angustifolia* en los estados de Coahuila, Hidalgo, Nuevo León y San Luis Potosí, en comparación con las provincias morfotectónicas, la especie tiene accesibilidad a estos estados (Anexo 5). Esta diferencia podría deberse a la eliminación de los registros, aspectos ecológicos y fisiológicos de las plantas o por un error de muestreo. Por otra parte, a la especie marmorata se le identificó en el estado de Durango y Jalisco, probablemente estos sean errores de georreferenciación, posiblemente por un error al escribir las coordenadas (Simoës y Peterson, 2018), mismo que se hubiera reducido al utilizar un método para re georreferenciar los registros. De igual modo ocurre con los registros de la especie cupreata ubicados en el estado de Durango.

México es un país que cuenta con una gran diversidad biológica y cultural, de acuerdo con la Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural (SADER por sus siglas) (2019), las denominaciones de origen promueven la formación y conservación de los recursos, favoreciendo el desarrollo de nuevas tecnológicas con un enfoque sustentable y permite que los saberes y técnicas tradiciones lleguen a las nuevas generaciones.

Una de las denominaciones de origen con mayor extensión global, es la denominación de origen del sector vinícola en Europa, abarcando España, Francia, Italia, Alemania (Catania y Avagnina, 2007; OMPI, 2001), aunque la denominación de origen del mezcal solamente pertenece al territorio mexicano, el tamaño de la denominación abarca gran territorio.

Por otro lado, aunque el total del territorio del estado de Puebla no abarque la Denominación de Origen, es el segundo estado con mayor producción de mezcal con un 8.4%. Además, fuera de denominación de origen también se realiza envasado de bebidas espirituosas, mal denominadas mezcales o también conocidas como destilados de agave (CRM, 2020). Del total del territorio de la denominación de origen, únicamente 9 estados producen mezcal, aunque el estado de Oaxaca es el principal envasador de mezcal (CRM, 2020).

II. Mapas de distribución potencial

La distribución realizada y potencial de *A. cupreata* en la provincia Jalisco-Guerrerense sustenta el patrón Montano Subhúmedo Circumbalsas, en el que la presencia de la especie, en conjunto con *Adiantum shepherdii* (helecho) y *Pinus pringlei* (pino), es predominante, en específico en la Subprovincia del Balsas (Morrone, 2019). La separación que se puede observar en la distribución potencial de *A. marmorata* se debe a que, en la zona de las Serranías Meridionales, se encuentra el complejo montañoso del norte de Oaxaca (Morrone, 2005) y considerando que el tipo de vegetación en el que es más común ubicarla es en el matorral xerófilo (Ornelas *et al.* 2002), se podría sugerir que esta área no tiene la idoneidad ambiental requerida de la especie.

Por otro lado, los registros ubicados de estas dos especies en la provincia Sierra Madre Occidental podrían estar dados por un error en las georreferencias de los registros de las especies, como se discutió en el apartado de las fichas técnicas.

Continuando con los registros de las especies, la hipótesis aleatoria de la aleatoriedad de los registros es rechazada, dado que los registros se encuentran por encima de la banda de confianza y existe una homogeneidad entre los registros, los cuales no son explicados por el azar. Esto se debe a que los registros generalmente se concentran en carreteras, caminos, zonas elevadas, cercanas a ríos, además, los muestreos generalmente se concentran en zonas o localidades en las que ya se ha observado la especie (Wisz *et al.* 2008; Argáez *et al.* 2005; Soberón *et al.* 2000). Para reducir la autocorrelación de los registros, la selección azarosa de un registro por celda es un método que se ha considerado, además, proporciona una diferencia entre los registros de prueba y entrenamiento de los modelos (Cadena-Rodríguez, 2018; Cruz-Cárdenas *et al.* 2014). El tamaño de la celda está proporcionado por la probabilidad de encontrar otro registro a una distancia, en la que la autocorrelación se reduzca (Cadena-Rodríguez, 2018).

A. cupreata y *A. marmorata* tienen menos registros y más homogéneos, es por esto que el tamaño de la celda es menor, a diferencia de *angustifolia*, que es la especie con mayor número de registros y tiene una distribución espacial de registros mayor en la República Mexicana. Una opción viable que permitiría aumentar la cantidad de registros para realizar los modelos de distribución espacial sería el uso de la ciencia ciudadana que ha sido funcional para algunos grupos, como es el caso de algunas aves

(ej. Garcilita-Arguello, 2021). El uso de la herramienta Naturalista <<https://www.naturalista.mx/>> como un elemento de la ciencia ciudadana ha permitido identificar nuevas especies, aunque es importante mencionar que un experto en el grupo debe validar la información, generalmente usando las fotografías y las descripciones que colocan los usuarios de esta plataforma (Pio-León *et al.* 2020). La toma de fotografías para cada uno de los grupos debe ser basado en sus caracteres diagnósticos (ej. Lodoño y Sánchez, 2020).

Asimismo, la selección de las variables con base en los componentes permite reducir la colinealidad entre las mismas, reduciendo la sobre estimación. Por otro lado, permite identificar cuáles son las variables que tienen una mayor influencia en la distribución de las especies. De acuerdo con las pruebas del PCA y la prueba de jackknife (generada por el software de Maxent), la influencia de las precipitaciones se puede identificar dentro de las variables bioclimáticas seleccionadas para *A. angustifolia*. Debido a la diversidad genética de la especie, su distribución abarca áreas en que la precipitación puede ser mínima, no obstante, también puede distribuirse en zonas en las que la precipitación sea mayor a los 1600mm (Vázquez-García, 2007).

Para las tres especies, las variables relacionadas con el tipo de suelo (CE, Ca, Mg y Na) influyen en la idoneidad ambiental en la que se pueden llegar a distribuir las especies, ya que las características del suelo se han reportado significativos para las especies del género *Agave* (Cervera *et al.* 2018; Mariles-Flores, *et al.* 2016).

El tipo de suelo y sus características físico-químicas, como lo es el pH y la escorrentía, tienen efecto en la distribución de las especies (Mariles-Flores, *et al* 2016; Pérez-Ramírez *et al.* 2013).

Ahora bien, comparando los modelos obtenidos en este trabajo con otros, tenemos que Huerta-Zavala (2018), identificó áreas de distribución potencial óptimas, subóptimas, marginales y no óptimas de *A. angustifolia* en el estado de Guerrero. El área marginal se ubica en la costa del estado y el área no óptima se registra en la zona centro del estado, los modelos reclasificados realizados en este trabajo se asemejan al modelo propuesto por el autor Huerta-Zavala. No obstante, éste clasifica al municipio Chilpancingo de Bravo como un área no óptima, a diferencia del modelo propuesto; el municipio cuenta con idoneidad ambiental para la especie. Martínez-Jiménez (2016) identificó áreas de distribución potencial en el municipio Villa Sola de Vega en el estado de Oaxaca, determinando que el este del municipio tiene la mayor probabilidad de distribución para la especie, además, identificaron individuos en campo. A diferencia del presente trabajo, no se obtuvieron registros especiales de la especie en el municipio, no obstante, la distribución potencial en el mismo, se asemeja en ambos estudios. A pesar de la similitud entre los trabajos, se utilizaron diferentes variables, concluyendo que la variable con mayor aportación fue la variable de uso de suelo y vegetación, por el contrario, en este trabajo la variable con mayor aportación fue la temperatura media anual (Bio 1). La variación fenotípica de *A. angustifolia* se considera de importancia y se propone realizar un estudio que abarque la distribución total y la variación genética de

la especie, sin los límites entre países (J. Reyes, com. pers., 2020; Huerta-Zavala, 2018).

Por otro lado, Castro y colaboradores (2015), realizaron la distribución potencial de *A. cupreata* en Michoacán de Ocampo, destacando que la zona del centro y noroeste del estado tienen altas probabilidades de idoneidad ambiental para la especie, además, consideran que la altitud en la que se ubique la especie es importante para mantener a los individuos dentro de sus parámetros naturales, ya que el incremento o disminución de la temperatura afecta el desarrollo de los individuos. Esto podría relacionarse con la afectación de las variables de temperatura en los modelos de distribución potencial. Comparando la distribución potencial identificada por Flores-Spindola y colaboradores (2018) en el estado de Guanajuato con el presente trabajo no se ubican idoneidad ambiental en el estado, incluyendo los municipios con DOM. Esta diferencia en el modelo podría deberse a que no hay registros de la especie en el estado de Guanajuato o simplemente a que la especie no han logrado movilizar las barreras biogeográficas y no tienen idoneidad ambiental para su distribución. Por otro lado, Sáenz-Romero y colaboradores (2012) han sugerido que debido a las condiciones climáticas esperadas para el año 2030, será necesario realizar colecta de semillas de una determinada población, producir plántulas en un vivero y posteriormente, trasplantar esas plántulas a una distancia de entre 175 y 200 m mayores a las poblaciones de origen (migración asistida). Con base en la idoneidad ambiental de la especie en el estado de Guerrero y Michoacán, se observa que la separación de la distribución generada por el Rio del Balsas podría deberse a que en general, la especie

se distribuye en las áreas montañosas aledañas al río, implicando la importancia del clima y de la altitud (Arreola-Gómez *et al* 2020; Barrientos-Rivera, 2020; Scheinvar, 2008; Gentry, 1982)

Por último, la distribución potencial de *A. marmorata* abarca la zona norte de la Reserva de la Biosfera Tehuacán-Cuicatlán, lugar en el que se encuentran distribuidos espacialmente registros de la especie. Esta área corresponde al estado de Puebla, mientras que hacia el estado de Oaxaca se encuentran pocos registros e idoneidad ambiental cercana a la hidrografía y a caminos, no obstante, Flores-Maya y colaboradores (2015) mencionan que su distribución abarca todo el Valle de Tehuacán-Cuicatlán. Además, generaron modelos de distribución potencial en el municipio de Zapotitlán en el estado de Puebla, identificando que la especie podría extenderse hacia el norte del país; sin embargo, al realizar este proyecto, se observa que la idoneidad ambiental de esta especie abarca hasta Yehualtepec y Tzicatlacoyan en el estado de Puebla. Por otro lado, los autores, localizaron los tipos de suelos en los que se encuentra mayormente distribuida la especie: Leptosol lítico-Regosol calcárico. Este tipo de suelo contiene calcio (SEMARNAT, 2000), lo cual demuestra la importancia de la variable Ca para esta especie, esta variable fue la que aportó mayor información de acuerdo con el análisis de jackknife. Flores-Maya y colaboradores (2015) mencionan que las poblaciones de esta especie se han visto reducidas en la Mixteca Poblana, considerando la explotación de la especie para la producción de mezcal como una de las causas principales. Por esto, Aguilar-Jiménez y Rodríguez (2018) generan una propuesta de propagación *in vitro* en la Mixteca Poblana.

Por otra parte, el estudio realizado por Martínez-Jiménez (2016) en el municipio Villa de Sola de Vega en el estado de Oaxaca, menciona que la mayor aportación a esta especie es la precipitación, no obstante, se ha considerado que la variación de las condiciones del suelo, los diferentes tipos de vegetación y el clima, no afectan el establecimiento y distribución de esta especie (Flores-Maya *et al.*, 2015). Considero importante mencionar que para corroborar los modelos de distribución potencial es necesario realizar expediciones de campo para comprobar la distribución de especies en las áreas en las que no se tienen registros de estas (Castillo-Quiroz *et al.*, 2012). Desafortunadamente, debido a los problemas de seguridad que se viven en el país, esto podría considerarse como una limitante.

La evaluación de los modelos por medio del valor AUC y la prueba binomial permitieron aceptar la hipótesis alternativa. De acuerdo con Balsas (2017), el modelo de *A. angustifolia* (0.839) es ajustado y tiene una buena tasa de clasificación, mientras que *A. cupreata* y *A. marmorata* tienen una tasa de clasificación muy buena, es decir, los modelos predicen con alta probabilidad la distribución las especies. Además, concorde a esta clasificación, la reclasificación de los modelos a partir del 0.75 implica que los pixeles de los modelos tienen una buena tasa de clasificación.

La idoneidad ambiental de las especies en los municipios y estados con DOM, de las especies estudiadas en este trabajo, se identifican mayormente en los estados de Guerrero, Oaxaca y Puebla. Los estados de Oaxaca y Puebla son los estados que generan mayor producción de mezcal (2020), a diferencia de Guerrero que únicamente proporciona el 0.1% del envasado.

Habría que decir también que este estudio a nivel nacional, podría fungir de base para la selección de áreas más pequeñas y específicas para analizar con mayor detalle la distribución potencial de las especies, es decir se tendría que hacer un acercamiento a cada zona de manera particular y la selección por especie. De este modo también se podrían incluir variables fenotípicas de las especies (Huerta-Zavala, 2018; Martínez-Jiménez, 2016; Vázquez Pérez 2015).

III. Diseño de estrategia

Debido a las condiciones climáticas que se esperan a futuro, las estrategias en la toma de decisiones se han vuelto un punto clave para la adaptación al cambio global (Bustos y Diaz, 2020). Es por esto que la generación de este tipo de estrategias es necesaria para la adaptación de procesos en diferentes sectores. Ante el dinamismo social, económico y ambiental que se vive alrededor del mundo la gestión de operaciones y procesos desde un enfoque de colaboración de triple hélice se vuelven más necesarios (Castillo *et al.* 2014; Chang-Castillo, 2010). De manera que la toma de decisiones de la industria mezcalera debe incluir también la opinión del sector gubernamental, por ejemplo: IMPI, SEMARNAT, CONAFOR, SADER, etc.

También se propone que se deben considerar los diferentes elementos de escala: nacional, regional, local, productor. Además, en lugar de optar por un nuevo concepto, considerando los objetivos planteados para el diseño de la estrategia (propagar y cultivar), se plantea como una posible solución el identificar los problemas puntuales de

cada uno de los productores y el uso que le brindan al suelo-cultivos. En consecuencia, la toma de decisiones se volvería particular y probablemente se obtendrían mejores resultados. En definitiva, realizar este ejercicio a una menor escala, con objetivos particulares acerca de aspectos sociales, económicos y biológicos específicos para cada una de las especies en zonas más pequeñas, sería de mayor utilidad para cualquier industria que utilice biodiversidad como materia prima.

Reyno-Santos y colaboradores (2016), realizan la distribución potencial en el estado de Chiapas para la especie *Agave americana*; sugieren que, para mejorar los resultados, es necesario aumentar a escala de análisis donde sean incorporadas otras variables como es el caso de datos productivos, con un enfoque de análisis multicriterio, el cual es considerado dentro de los métodos seleccionados para la fase 2 de la estrategia de toma de decisiones.

El uso de los nichos ecológicos, es decir, incluir a los polinizadores y otras interacciones bióticas, para tomar decisiones fue funcional en el sector de la apicultura. Cadena-Rodríguez y colaboradores (2019), identificaron áreas para ubicar apiarios en el estado de Michoacán, consideraron las condiciones bióticas de *Apis mellifera* como polinizador, además hacen mención que los polinizadores específicos aportarían más evidencia al nicho ambiental de las especies que polinizan.

Con esto se reitera el uso de las interacciones biológicas de los agaves para posicionar áreas de cultivo, de manera que se consideren al cultivo como un sistema abierto que

necesita de otros organismos para su mantenimiento en el tiempo. Además, para la selección de las áreas de idoneidad ambiental se debería considerar las especificaciones fisiológicas de las especies, determinando rangos de las variables de suelo y clima con mayor idoneidad. Aunque, se tiene como una limitante los índices de inseguridad del país. Considerando también el uso del tipo de suelo y aspectos de los ecosistemas, es importante mencionar que se espera que, con este proyecto, no se perturben ecosistemas o se llegue a la deforestación, ya que la meta es utilizar a la ciencia para mejorar las condiciones en las que se distribuyen las especies de agave.

El uso de expertos para la toma de decisiones respecto a problemáticas en las organizaciones, proyectos o industrias es un método recurrente, el método Delphi considera que el número mínimo de expertos a considerar son siete y máximo 30 expertos, este está dividido en cuatro etapas y se consideran diferentes criterios (Varela-Ruíz et al., 2011). En este proyecto, únicamente se consideraron cinco expertos y tres etapas, además, al final del método Delphi se debe incluir un informe final y estadísticos dado que se deben tener resultados cuantitativos, al igual que cualitativos. Es así que, para realizar un ejercicio a futuro relacionado con este proyecto, debería incluir por lo menos dos expertos más, considerando a los productores de algunas zonas. Además, con la ayuda de grupos focales, se podrían identificar más problemáticas sobre la industria y su materia prima, ya que, es necesario involucrar el conocimiento de las personas que tienen mayor cercanía con la materia prima, en este caso, los agaves (Hamui-Sutton y Varela-Ruiz, 2013; Varela-Ruíz et al., 2011).

Es un común acuerdo que es necesario permitir la floración de las especies de agave para mantener el equilibrio del ecosistema, considerando a los polinizadores, y la viabilidad genética de las especies (Medellín et al 2017ab; Trejo et al. 2017; Medellín y Eguiarte, 2016). El dejar que los agaves concluyan con su ciclo de vida, con la reproducción sexual, permite la producción de semilla. Los bancos de semillas comunitarios (BSC) son un modelo que permite la administración colectiva de las semillas necesarias para la siembra en las comunidades (SNICS, 2017), aunque las semillas que principalmente se resguardan son las de la milpa (maíz, frijol, calabaza), sería importante involucrar a otras especies nativas de México, como son los agaves y el algodón. Existe un banco de germoplasma de *Agave* spp.: “Agaves de fibra y mezcaleros”, perteneciente al Centro de Investigación Científica de Yucatán (CICY, 2021). Kean-Galeno en 2017, estableció un banco de germoplasma de *Agave* spp. en el Estado de México, con un total de cinco especies: *Agave salmiana*, *A. horrida*, *A. angustifolia*, *A. inaequidens* y *A. attenuata*. La idea de generar policultivos de agave surgió con *A. tequilana* (Herrera-Pérez et al. 2017).

VIII. Conclusión

Acorde con los diferentes apartados de esta tesis, se desarrollaron las siguientes conclusiones:

- La revisión previa a la elaboración de los modelos de distribución potencial es de utilidad para conocer las características morfológicas, de distribución y culturales de las especies. Además, el conocimiento previo a la generación de modelos permite que los mismos sean mejores debido a la inclusión completa de la especie. También permiten que la información de las especies esté disponible y sea digerible para cualquier público o sector.
- Los registros de las especies, su depuración y buena georreferenciación son necesarias para la modelación de la distribución potencial. Es necesario mejorar los métodos de muestro para reducir el síndrome de carretera e incluir la ausencia de los registros.
- La Denominación de Origen Mezcal tiene una gran extensión en México, no obstante, la mayor producción se genera en el estado de Oaxaca, lo cual está ligado a la distribución de las especies de agave mezcaleras, en específico la especie *A. angustifolia*. Existe la necesidad de reformular el uso intensivo de esta especie.
- La especie *Agave angustifolia* sostiene 3 denominaciones de origen, el uso de la misma debe ser sustentable. Además, debido a su diversidad genética y fenotípica, realizar un estudio sobre su sistemática es necesario.
- El género *Agave* tiene una gran importancia en nuestro país, priorizar su conservación, tanto en estado silvestre como cultivado, debe considerarse como una prioridad.
- Los mapas de distribución de las especies a escala nacional pueden ser utilizados para determinar áreas más pequeñas y tomar decisiones particulares.
- Las tomas de decisiones de las industrias que utilicen diversidad biológica deben estar vinculadas con la academia, el gobierno y el sector productivo.
- Comenzar a considerar la producción de mezcal con la misma importancia que la producción de tequila y café en México podría generar cambios importantes en el mercado y seguramente en las poblaciones de estas especies, tener en mente la sustentabilidad desde la filosofía de la triple hélice es primordial.

IX. Bibliografía

- Aguirre, D. y Eguiarte, L. 2013. Genetic diversity, conservation and sustainable use of Wilde *Agave cupreata* and *Agave potatorum* extracted for mezcal production in Mexico. *Journal of Arid Environments* 90: 36-44.
- Almaraz-Abarca, N., Delgado-Alvarado, EA, Torres-Morán, MI, Herrera-Corral, J., Ávila-Reyes, JA, Naranjo-Jiménez, N., y Uribe-Soto, JN (2013). Variabilidad genética en poblaciones naturales de *agave durangensis* (Agavaceae) revelada por rasgos morfológicos y moleculares. *The Southwestern Naturalist*, 58 (3): 314–324.
- Anderson, R., Lew, D. y Peterson, A. 2003. Evaluating predictive models of species distributions: criterio for selecting optimal models. *Ecological Modeling* 162: 211-232.
- Argáez, J.A., Christen, A.J., Nakamura, M. y Soberón, J. 2005. Prediction of potential areas of species distributions based on presence-only data. *Environmental and Ecological Statistics* 12(1):27-44
- Arizaga, S., Ezcurra, E., Peters, E., Ramírez de A., F. y Vega, E. 2000. Pollination ecology of *Agave macroacantha* (Agavaceae) in a mexican tropical desert: The role of pollinators. *American Journal of Botany* 87(7):1101-1017.
- Arreola-Gómez, R. y Mendoza, E. 2020. Visita marsupial a las inflorescencias de la endémica *Agave cupreata* en el occidente de México. *Naturalista occidental norteamericano* 80(4).
- Ballesteros-Barrera, C. 2011. Efecto del cambio climático en la distribución de especies del Desierto Chihuahuense del pleistoceno al siglo XXI. En: Sánchez-Rojas, G., Ballesteros-Barrera, C. y Pavón, N. Eds. *Cambio climático: Aproximaciones para el estudio de su efecto sobre la biodiversidad*, pp. 88-89, Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, México.
- Balsa, C. 2017. Un paquete r para analisis masivo de modelos predictivos de regresión logística multivariante y sus medidas de discriminación y de clasificación asociadas. Tesis de maestría. Universitat Oberta de Catalunya, Catalunya, España.
- Barrientos, G. 2020. Programa de manejo para la conservación de los *Agaves angustifolia* y *cupreata* en el estado de Guerrero. Tesis Doctoral. Doctorado en Ciencias Ambientales. Universidad Autónoma de Guerrero, México.
- Bivand, R., Pebesma, E. y Gómez-Rubio, V. 2008. *Applied spatial data analysis with R*. Spring, New York.
- Bloom, T., Flower, A. y DeChaine, E. 2018. Why georeferencing matters: Introducing a practical protocol to prepare species occurrence records for spatial analysis. *Ecology and evolution* 8: 765-777.

- Cadena-Rodríguez, Y.J., Vázquez-Sánchez, M., Cruz-Cárdenas, G. y Villaseñor, J.L. 2019. Use of Ecological Niche Models of Plant Species to Optimize Placement of Apiaries. *Journal of Apicultural Science* 63(2): 10.2478/jas-2019-0017.
- Cárcano-Rico, B y Noriega-Altamirano. 2009. Producción artesanal y tradicional de mezcal. En: Estado de Desarrollo Económico y social de los pueblos indígenas de Guerrero. Publicado por Programa universitario México Nación Multicultural-UNAM y la Secretaría de asuntos indígenas del gobierno del estado de Guerrero, México.
- Carrillo-Trueba, L. 2007. Los destilados de Agave en México y su Denominación de Origen. *Revista Ciencias* 87: 39-49
- Casas, A., García-Mendoza, A., Sandoval, D. y Torres-García, I. 2020. *Agave applanata*, Maguey de Ixtle. <www.iucnredlist.org> (consultado en abril del 2021).
- Casas, A., Torres-García, I., García-Mendoza, A. y Sandoval, D. 2019. *Agave scaposa*, maguey de potrero. <www.iucnredlist.org> (consultado en abril del 2021).
- Cervera, J.C., Leinara-Alcocer, J.L. y Navarro, J. 2018. Factores ambientales relacionados con la cobertura de *Agave angustifolia* (Asparagaceae) en el matorral costero de Yucatán, México. *Acta Botánica Mexicana* 124: 5-8.
- Chapman, A.D. 2005. Principles of Data Quality. Report for the Global Biodiversity Information Facility, Copenhagen.
- Chase, J. y Leibold, M. 2003. *Ecological Niches: Linking Classical and Contemporary Approaches*. University of Chicago.
- CICY. 2021. Colecciones de Plantas del Banco de Germoplasma (BG) y su Jardín Botánico (JBBG). <<https://www.cicy.mx/sitios/Germoplasma/#coleccion-de-plantas-vivas-del-banco-de-germoplasma-cicy>> (consultado en agosto del 2021).
- Colunga García Marín, S. P. 2006. Base de datos de nombres técnicos o de uso común en el aprovechamiento de los agaves en México. Centro de Investigación Científica de Yucatán AC. Hoja de cálculo SNIB-CONABIO proyecto No. CS007. México. D. F.
- Colunga-García, P. 2006. Anexo 1A. Nombres comunes e idioma en el que se encuentran, de los taxa incluidos en la BADANAM (CS007). CONABIO.
- Colunga-GarcíaMarín, P. 2006a. Base de datos de nombres técnicos de uso común en el aprovechamiento de los agaves en México. Centro de Investigación Científica de Yucatán A.C. Anexo 1 SNIB-CONACYT proyecto No. CS007. México D.F.
- Colunga-GarcíaMarín, P. 2006b. Base de datos de nombres técnicos de uso común en el aprovechamiento de los agaves en México. Centro de Investigación Científica de Yucatán A.C. Informe Final SNIB-CONACYT proyecto No. CS007. México D.F.
- Colunga-GarcíaMarín, P. y Zizumbo-Villareal, D. 2006. Tequila and other Agave spirits from west-central Mexico: current germplasm diversity, conservation and origin. En: Hawksworth D.L., Bull, A.T. Eds. *Conservación de plantas y biodiversidad*, pp. 1653-1667, Springer, Dordrecht.
- Colunga-GarcíaMarín, P., Torres-García, I., Casas, A. y Figueredo, C. 2017. Los agaves y las prácticas mesoamericanas de aprovechamiento, manejo y domesticación. En:

Casas, A., Torres-Guevara y Parra-Rondinel, F. (eds.) Domesticación en el continente americano, pp. 273-308, UNAM/UNALM.

Colunga-GarcíaMarín, P., Zizumbo-Villarreal, D. y Martínez-Torres, J. 2007. Tradiciones en el aprovechamiento de los *Agaves* mexicanos: una aportación a la protección legal y conservación de su diversidad biológica y cultural. DOI: 10.13140/RG.2.1.5192.1441.

Colunga-GarcíaMarín, P., Zizumbo-Villarreal, D., Martínez-Torres, J. 2007. Tradiciones en el aprovechamiento de los agaves mexicanos: una aportación a la protección legal y conservación de su diversidad biológica y cultural. En: Colunga-GarcíaMarín, P., Eguiarte L, Larqué, A., Zizumbo-Villarreal, D. Eds. En lo ancestral hay futuro: del tequila, los mezcales y otros agaves, pp. 229–248, CICY-CONACYT-CONABIOINE, México.

CONABIO. 11/11/2015. Divisiones florísticas de México, edición: 1. Comisión Nacional para el Conocimiento y Biodiversidad.

CONABIO. 2006. Mezcales y diversidad, 2da edición. Comisión Nacional para el Conocimiento y el Uso de la Biodiversidad, México. <<http://200.12.166.51/janium/Documentos/5324.pdf>> (consultado en mayo del 2020).

CONABIO. 2021. Magueyes. <<https://www.biodiversidad.gob.mx/diversidad/alimentos/magueyes>> (consultado en julio del 2021)

CONACULTA. s.f. Oaxaca, sur de México. Gobierno de México. <https://patrimonioculturalyturismo.cultura.gob.mx/publi/Guias_conaculta_raices/Espanol/oaxaca.pdf> (consultado en junio 2021).

Consejo Regulador de Mezcal (C.R.M.). 2020. Informe estadístico: 2020. <http://www.crm.org.mx/PDF/INF_ACTIVIDADES/INFORME2019.pdf > (consultado en mayo del 2020).

Cruz-Cárdenas, G., López-Mata, L., Villaseñor, L. y Ortiz, E. 2014 Potential species distribution modeling and the use of principal component analysis and predictor variables. *Revista Mexicana de Biodiversidad* 85: 189-199.

Cruz-Cárdenas, G., Villaseñor, J.F., López-Mata, L., Martínez-Meyer, E. y Ortiz, E. 2014. Selección de predictores ambientales para el modelado de la distribución de especies en MaxEnt. *Revista Chapingo, Serie Ciencias Forestales y del Ambiente* 20(2):187-200.

Cruz-Cárdenas, G., López-Mata, L., Silva, J.T., Bernal-Santana, N., Estrada-Godoy, F., y López-Sandoval, J.A. 2016. Modelado de la distribución potencial de especies de Pinaceae bajo escenarios de cambio climático en Michoacán. *Revista Chapingo serie ciencias forestales y del ambiente* 22:135-148

DOF. 1994. Extracto de la solicitud de declaratoria de protección de la denominación de Origen Mezcal. 5 de septiembre de 1994, México.

- DOF. 2001. Resolución por la que se modifica la declaración general de protección de denominación de origen Mezcal publicado el 28 de noviembre de 1994. 29 de octubre del 2010, México.
- DOF. 2003. Modificación a la declaración general de protección de la denominación de origen Mezcal, 28 de noviembre de 1994.
- DOF. 2012. Modificación a la declaración general de protección de la denominación de origen Mezcal. 22 de noviembre del 2012, México.
- DOF. 2015a. Resolución por la que se modifica la declaración general de protección de denominación de origen Mezcal. 02 de octubre del 2015, México.
- DOF. 2015b. Resolución por la que se modifica la declaración general de protección de denominación de origen Mezcal. 24 de diciembre del 2015, México.
- DOF. 2018a. Resolución por la que se modifica la declaración general de protección de denominación de origen Mezcal, para incluir los municipios del Estado Aguascalientes que en la misma se indican. 08 de agosto del 2018.
- DOF. 2018b. Resolución por la que se modifica la declaración general de protección de denominación de origen Mezcal, para incluir los municipios del Estado de México que en la misma se indican. 08 de agosto del 2018.
- DOF. 2018c. Resolución por la que se modifica la declaración general de protección de denominación de origen Mezcal, para incluir los municipios del Estado de Morelos que en la misma se indican. 09 de agosto del 2018.
- DOF. 2019. Modificación del Anexo Normativo III, Lista de especies en riesgo de la Norma Oficial Mexicana NOM-059-SEMARNAT-2010, 14 de noviembre del 2019.
- Dormann, C. 2007. Effects of incorporating spatial autocorrelation into the analysis of species distribution data. *Global Ecology and Biogeography* 16:129-138.
- Eguiarte, L. E., V. Souza y A. Silva-Montellano. 2000. Evolución de la familia Agavaceae: filogenia, biología reproductiva y genética de poblaciones. *Boletín de la Sociedad Botánica de México* 66: 131-150.
- Elton, C. 1927. *Animal ecology*. Sedgwick and Jackson, Londres, Inglaterra.
- Esparza-Ibarra, E., Violante-González, J., Monks, S., Cadena, J., Araujo-Andrade, C. y Rössel-Kipping, E. 2015. Los agaves mezcaleros del altiplano Potosino y Zacatecano. En: Pulido-Flores, G., Monks, S. y López-Herrera, M. (eds.) *Estudios en Biodiversidad*.
- Estrada-Márquez, A.S. 2016. Estimación de nicho ecológico de especies vegetales con pocos registros. Tesis de Maestría. Maestría en Ciencias Biológicas, Universidad Nacional Autónoma de México.
- Felicísimo, A.M., Muñoz, J., Mateo, R.G., Villalba, C. y Mateos, E. *Bosques y cambio global*. España-México, CYTED.
- Ferrusquía-Villafranca, L. 1990. Provincias biogeográficas con base en rasgos morfotectónicos. Mapa IV. S.10. Atlas Nacional de México. Vol. III. Instituto de Geografía, UNAM. México.

- Flores-Espíndola, B.M., Espinosa-Trujillo, E., Mireles-Arriaga, A. I., Ruiz-Nieto, J.E. y Hernández- Ruíz, J. 2018. Análisis económico de áreas con potencial para el cultivo de *Agave cupreata* en el estado de Guanajuato. En: Hernández-Ruíz, J.; Isiordia-Lachica, P.C., Rucoba-García, A., Ruiz-Nieto, J.E. y Mireles-Arriaga, A.I. (eds.) Memoria resúmenes in extenso de carteles.
- Franklin, J. 2009. Mapping Species Distributions. Spatial Inference and Prediction. Cambridge University Press, Cambridge.
- FUNDESYRAM. 2011. ¿Cómo enseñar a tomar decisiones acertadas? Casa Barak, San Salvador.
- Gaiji, S., Chavan, V., Ariño, A.H., Otegui, J., Hobern, D., Sood, R. y Robles, E. 2013. Content assessment of the primary biodiversity data published through GBIF network: Status, challenges and potentials. *Biodiversity Informatics* 8:94-172
- Gámez-Pastrana, R. 2010. Guía para la elaboración de mapas de distribución potencial. Universidad Veracruzana.
- Garcilita, S. 2021. La migración del Aguillilla Gris (*Buteo plagiatus*) en la planicie costera del Golfo de México. Tesis de Licenciatura. Licenciatura en Biología, Facultad de Ciencias, UNAM.
- García Mendoza, A. J. 2003. Sistemática y distribución actual de los Agave spp mezcaleros. Universidad Nacional Autónoma de México. Instituto de Biología. Informe final SNIB-CONABIO proyecto No. V029. México D. F.
- García Mendoza, A., Sandoval, D., Torres-García, I. y Casas, A. 2019a. *Agave atrovirens*, Maguey Blanco. <www.iucnredlist.org > (consultado en abril del 2021).
- García-Mendoza, A. 2002. Distribution of Agave (Agavaceae) in Mexico. *Cactus and Succulent Journal (US)* 74(4): 177-187.
- García-Mendoza, A. 2007. Los Agaves de México. *Revista Ciencias* 87: 14-23.
- García-Mendoza, A. 2011. Flora del valle de Tehuacán-Cuicatlán, 88th ed. Ciudad de México: Universidad Nacional Autónoma de México Instituto de Biología. Departamento de Botánica.
- García-Mendoza, A. J. y Galván, R. 1995. Riqueza de las familias Agavaceae y Nolinaceae en México. *Boletín de la Sociedad Botánica de México* 56, 7-24.
- García-Mendoza, A. J., Franco Martínez, I. S., y Sandoval Gutiérrez, D. 2019b. Cuatro especies nuevas de *Agave* (Asparagaceae, Agavoideae) del sur de México. *Acta Botánica Mexicana*, 126(e1461), 1-18.
- García-Mendoza, A. y Chiag, F. 2003. La confusión de *Agave vivipara* L. y *A. angustifolia* Haw., Dos taxones distintos. *Brittonia* 55: 82-87.
- García-Mendoza, A. y Galván, R. 1995. Riqueza de las familias Agavaceae y Nolinaceae en México. *Boletín de la Sociedad Botánica de México* 56: 7-24.
- García-Mendoza, A., Casas, A., Gonzáles-Elizondo, M., Torres-García, I. Véliz-Pérez, M., Sandoval, D. y Sandoval, L. 2019c. *Agave angustifolia*, Espadín. <www.iucnredlist.org > (consultado en abril del 2021).

- García-Mendoza, A., Casas, A., Sandoval, D. y Torres-García, I. 2019d. *Agave convallis*, Maguey Escobeta. <www.iucnredlist.org > (consultado en abril del 2021).
- García-Mendoza, A., Casas, A., Torres-García, I. y Sandoval, D. 2019e. *Agave marmorata*, Maguey Curandero. <www.iucnredlist.org > (consultado en abril del 2021).
- García-Mendoza, A., Franco-Martínez, I. y Sandoval-Gutiérrez, D. 2019f. Cuatro especies nuevas de Agave (Asparagaceae, Agavoideae) del sur de México. *Acta Botánica Mexicana* 126: e1461.
- García-Mendoza, A., Sandoval, D., Casas, A. y Torres-García, I. 2019g. *Agave triangularis*. <www.iucnredlist.org > (consultado en abril del 2021).
- García-Mendoza, A., Sandoval, D., Casas, A. y Torres-García, I. 2019h. *Agave isthmensis*. <www.iucnredlist.org > (consultado en abril del 2021).
- García-Mendoza, A., Sandoval, D., Casas, A. y Torres-García, I. 2019i. *Agave rhodacantha*. <www.iucnredlist.org > (consultado en abril del 2021).
- García-Mendoza, A., Sandoval, D., Casas, A. y Torres-García, I. 2019j. *Agave vazquezgarciae*, Cola de Zorra. <www.iucnredlist.org > (consultado en abril del 2021).
- García-Mendoza, A., Sandoval, D., Casas, A. y Torres-García, I. 2019k. *Agave kerchovei*, Rabo de León. <www.iucnredlist.org > (consultado en abril del 2021).
- García-Mendoza, A., Sandoval, D., Torres-García, I. y Casas, A. 2019l. *Agave potatorum*, Tobala. <www.iucnredlist.org > (consultado en abril del 2021).
- García-Mendoza, A., Sandoval, D., Torres-García, I., Casas, A. y González-Elizondo, M. 2019m. *Agave maximiliana*, Lechuguilla. <www.iucnredlist.org > (consultado en abril del 2021).
- García-Mendoza, A., Torres-García, I., Casas, A. y Sandoval, D. 2019n. *Agave karwinskii*, Cachitún. <www.iucnredlist.org > (consultado en abril del 2021).
- García-Mendoza, A., Torres-García, I., Casas, A. y Sandoval, D. 2019o. *Agave macroacantha*. <www.iucnredlist.org > (consultado en abril del 2021).
- Garnica-Sánchez, Z.G. 2016. Las plantaciones de maguey espadín y su impacto en las selvas bajas caducifolias y sus alternativas. Comisión Nacional Forestal, México.
- Gentry, H. 1982. *Agaves of Continental North America*. The University of Arizona Press.
- Gentry, H. 1982. *Agaves of Continental North America*. The University of Arizona Press.
- Gil-Vega, K.C., Díaz-Quezada, C.E., Nava-Cedillo, A., García-Mendoza, A. y Simpson, J. 2007. Análisis AFLP del género *Agave* refleja la clasificación taxonómica basada en caracteres morfológicos y otros métodos moleculares. En: Colunga-García Marín, P., Larqué Saavedra, A., Eguiarte, L.E. y Zizumbo-Villarreal, D. Eds. *En lo ancestral hay futuro: del tequila, los mezcales y otros agaves*, pp. 23-39, Centro de Investigaciones Científicas de Yucatán, Mérida, México.
- Grinnell, J. 1917. The niche-relationships of the California Thrasher. *Auk* 34: 427-433.
- Grinnell, J. 1924. *Geography and evolution*. *Ecology* 5: 225-229.

- Guisan, A. y Zimmermann, N. 2000. Predictive habitat distribution models in ecology. *Ecological Modelling* 135(2): 147-186.
- Hammond, J.J., Keeney, R.L. y Raiffa, H. 1999. Decisiones inteligentes. Bogotá: Editorial Norma p. 1-37.
- Hamui-Sutton, A. y Varela-Ruíz, M. 2013. La técnica de grupos focales. *Investigación educ. médica* 2(1): 55-60.
- Hernandez, J.J., 2013. Las vinazas del tequila: nuevos usos, viejas prácticas en el tratamiento de las aguas residuales del tequila en los Altos de Jalisco. *Cuadernos de Los Altos*, 3: 103-118.
- Hutchinson, G.E. 1957. Concluding remarks. *Cold Spring Harbor Symposia on Quantitative Biology* 22: 415-427.
- Illsley Granich, C. 2004. Manejo campesino sustentable del maguey papalote de Chilapa. Grupo de Estudios Ambientales AC. Informe final SNIB-CONABIO proyecto No. BS002. México D. F.
- INEGI. 16/12/2016. Conjunto de Datos Vectoriales de Uso de Suelo y Vegetación. Escala 1:250 000. Serie VI (Capa Union), escala: 1:250 000. edición: 1. Instituto Nacional de Estadística y Geografía. Aguascalientes, México.
- Instituto Mexicano de la Propiedad Industrial. 2020. Declaraciones Generales de Protección de Denominaciones de Origen <<https://www.gob.mx/impi/acciones-y-programas/declaraciones-generales-de-proteccion-de-denominaciones-de-origen>> (consultado en julio del 2021)
- Instituto Mexicano de la Propiedad Industrial. 2019. Tradición e Identidad protegidas: las denominaciones de origen e indicaciones geográficas <<https://www.gob.mx/impi/articulos/tradicion-e-identidad-protegidas-las-denominaciones-de-origen-e-indicaciones-geograficas>> (consultado en junio del 2020).
- Instituto Mexicano de la Propiedad Industrial. 2017. ¿Conoces las denominaciones de origen? Gobierno de México. <<https://www.gob.mx/impi/articulos/conoces-las-denominaciones-de-origen>> (consultado en junio 2021)-
- Kean-Galeano, T. 2017. Establecimiento de un banco de germoplasma de *Agave* spp. Tesis de Licenciatura. Licenciatura en Biología, Universidad Autónoma del Estado de México, México.
- Larson, J. 2006. Indicaciones geográficas y usos sustentables de recursos biológicos, en *Diálogo Regional sobre la Propiedad Intelectual, Innovación y Desarrollo Sostenible*, Costa Rica.
- Lash, R.R., Carroll, D.S., Hughes, C.M., Nakazawa, Y., Kareem, K., Damon, I.K. y Peterson, A.T. 2012. Effects of georeferencing effort on mapping monkeypox case distributions and transmission risk. *International Journal of Health Geographics* 11, 23: 10.1186/1476-072X-11-23.

- Leibold, M. y Geddes, P. 2005. El concepto de nicho en las metacomunidades. *Ecología Austral* 15: 117-129.
- León, J. y Torres, I. 2015. Polinización del Maguey Alto en el Municipio de Morelia. En: aspectos sobre el Manejo y la conservación de Agaves Mezcaleros en Michoacán. (eds) Martínez-Palacios, A., Morales-García, J.L. y Guillén, S.
- Maderey-R, L. E. y Torres-Ruata, C. 1990. Hidrografía: extraído de Hidrografía e hidrometría, IV.6.1 (A). Atlas Nacional de México. Vol. II. Escala 1: 4000000. Instituto de Geografía, UNAM. México
- Mariles-Flores, V., Ortiz-Solorio, C.A., Gutiérrez-Castorena, M. del C., Sánchez-Guzmán, P. y Cano-García, M.A. 2016. Las clases de tierras productoras de maguey mezcalero en la Soledad Salinas, Oaxaca. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas* 7(5): 1199-1210
- Martínez, R., Ruíz-Vega, J., Caballero, M., Silva, M., y Montes, J. 2019. Agaves silvestres y cultivados empleados en la elaboración de Mezcal en Sola de Vega, Oaxaca México. *Tropical and Subtropical Agroecosystems* 22: 477-485.
- Martínez-Castro, L.E., Martínez-Palacios, A., Sánchez-Vargas, N., Lobitte, P., Álvarez, P., Martínez-Palacios, O., Villegas, J., Martínez-Ávalos, J.G. y Golubov, J. 2015. Poblaciones silvestres de Maguey Chino (*Agave cupreata*) en el estado de Michoacán. En: Aspectos sobre el Manejo y la Conservación de Agaves Mezcaleros en Michoacán. (eds) Martínez-Palacios, A., Morales-García, J.L. y Guillén Rodríguez, S.
- Martínez-Palacios, A. J. M. Gómez-Sierra, C. Sáenz-Romero, N. Pérez-Nasser y N. Sánchez-Vargas. 2011. Genetic diversity of *Agave cupreata* Trel. & Berger. Considerations for its conservation. *Rev. Fitotec. Mex.* Vol. 34 (3): 159 – 1
- Mateo, R., Felicimo, A.M. y Muñoz, J. 2011. Modelos de distribución de especies: una revisión sintética. *Revista chilena de historia natural* 84(2): 217-240.
- Mathew, C., Guntch, A., Obst, M., Vicario, S., Haines, R., Wil, Enlaces, A., de Jong, Y. y Goble, C. 2014. A semi-automated workflow for biodiversity data retrieval, cleaning, and quality control. *Biodiversity Data Journal* 2: e4221.
- Medellin, R. A., Wiederholt, R., Lopez-Hoffman, L. 2017. Conservation relevance of bat caves for biodiversity and ecosystem services. *Biological Conservation* 211: 10.1016 / j.biocon.2017.01.012
- Medellin, R., Eguiarte, L., y Trejo, R. 2017. El Tequila y el murciélago: ¡Todos somos *Leptonycteris!* *Oikos* 2(19) <web.ecologia.unam.mx/oikos3.0/index.php/articulos/plantas-arvenses/8-articulos/302-el-tequila-y-el-murcielago> (consultado en julio 2021).
- Medellin, R., y Eguirarte, E. 2016. Save Our Bats, Save Our Tequila: Industry and Science Join Forces to Help Bats and Agaves. *Natural Areas Journal* 36(4): 531–537

- Miguel-Vázquez, M.I., Espejo-Serna, M.A., Ceja-Romero, J. y Cerros-Tlatilpa, R. 2020. Las angiospermas epífitas de Puebla, México: riqueza y distribución. *Botanical Sciences* 98(3): 585-596
- modelación de nichos y modelación de áreas de distribución. *Revista Mexicana de Biodiversidad* 88: 437-441.
- Molina, F., y Eguiarte, L. 2003. The pollination biology of two paniculate agaves (Agavaceae) from northwestern Mexico: contrasting roles of bats as pollinators. *American Journal of Botany* 90(7): 1016–1024
- Morales, N. 2012. Modelos de distribución de especies: software maxent y sus aplicaciones en conservación. *Revista Conservación Ambiental* 2(1): 1-5.
- Morrone, J. 2005. Hacia una síntesis biogeográfica de México. *Revista Mexicana de Biodiversidad* 76(2).
<http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1870-34532005000200006&lng=es&tlng=es> (consultado en agosto 2020).
- Morrone, J. 2019. Regionalización biogeográfica y evolución biótica de México: encrucijada de la biodiversidad del Nuevo Mundo. *Revista Mexicana de Biodiversidad* 90 (2019): e902980.
- Mota-Vargas, C., Encarnación-Luévano, A., Ortega-Andrade, H.M., Prieto-Torres, D.A., Peña-Peniche, A. y Rojas-Soto, O.R. 2019. Una breve introducción a los modelos de nicho ecológico. En: Moreno CE (Ed) *La biodiversidad en un mundo cambiante: Fundamentos teóricos y metodológicos para su estudio*. Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo/Libermex, Ciudad de México, pp. 39-63.
- Nogales, L. 2018. Conoce las 9 especies de agaves mezcaleros de Oaxaca. <<https://mezecologia.mx/agaves-mezcaleros-de-oaxaca/>> (consultado en noviembre 2020)
- Ordóñez, M. de J. y Rodríguez, P. 2008. Oaxaca, el estado con mayor diversidad biológica y cultural de México, y sus productores rurales. *Ciencias* 91: 54-64
- Ornelas, J.F., Ordano, M., Hernández, A., López, J.C., Mendoza, L. y Perroni, Y. 2002. Nectar oasis produced by *Agave marmorata* Roetzl. (Agavaceae) lead to spatial and temporal segregation among nectarivores in the Tehuacan Valley, Mexico. *Journal of Arid Environments* 52: 37–51
- Palacios, T. 2011. Estructura y dieta del ensamble de los murciélagos nectarívoros de San Marcos Arteaga, Sierra Mixteca, Oaxaca. Tesis de Maestría. Maestría en Ciencias en Conservación y Aprovechamiento de Recursos Naturales. Centro Interdisciplinario de investigación para el desarrollo integral regional, Unidad Oaxaca, Instituto Politécnico Nacional.
- PAOT. 2002. Informe de la Situación del Medio Ambiente en México 2002: Suelos. <http://www.paot.org.mx/centro/ine-semarnat/informe02/estadisticas_2000/informe_2000/03_Suelos/3.1_Suelos/index.htm> (consultado en junio 2021).

- Pearson, R., Raxworthy, C., Nakamura, M. y Peterson, A. 2007. Predicting species distribution from small numbers of occurrence records: a test case using cryptic geckos in Madagascar. *Journal of Biogeography* 34:102-117.
- Pérez-Hernández, E., Chávez-Parga, Ma. del C. y González-Hernández, J.C. 2016. Revisión del agave y el mezcal. *Revista Colombiana de Biotecnología* 18(1):148-164.
- Pérez-Ramírez, S., Ramírez, M.I., Jaramillo-López, P.F. y Bautista, F. 2013. Contenido de carbono orgánico en el suelo bajo diferentes condiciones forestales: reserva de la biosfera mariposa monarca, México. *Revista Chapingo, Serie ciencias forestales y del ambiente* 19(1): 157-173.
- Peterson, A., Soberón, J., Pearson, R., Anderson, R., Martínez-Meyer, E., Nakamura, M. y Araújo, M. 2011. *Ecological niches and geographical distributions. Monographs in Population Biology* 49. Princeton University Press, Princeton, New Jersey.
- Phillips, S. y Dudik, M. 2008. Modeling of species distributions with MaxEnt: new extensions and a comprehensive evaluation. *Ecography* 31(2):161-175.
- Phillips, S., Anderson, R. y Schapire, R. 2006. Maximum entropy modeling of species geographic distributions. *Ecological Modeling* 190: 231-259.
- Pio-León, F., Chávez-Hernández, M.G. y Alvarado-Cárdenas, L. 2020. *Gonolobus naturalistae* (Apocynaceae; Asclepiadoideae; Gonolobeae; Gonolobinae), una nueva especie de México. *Phytotaxa* 472(3): 249–25.
- Posada, R., 2007. La toma de decisiones basada en los modelos de investigación de operaciones en algunas empresas industriales del sector agropecuario. Tesis de maestría. Maestría en Ciencias de la Administración, Universidad EAFIT, Medellín.
- Romero, A. O. 2021. La expansión del agave en Guanajuato. La denominación de origen que amenaza a los ecosistemas <<http://ru.iiec.unam.mx/5632/1/186-Romero.pdf>> (consultado en agosto 2022).
- Reynoso, R., Pérez, M., López, W., Hernández, J., Muñoz, J., Cob, J., Reynoso, M. 2018. El nicho ecológico como herramienta para predecir áreas potenciales de dos especies de pino. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales* 9: 47-70.
- Sáenz-Romero, C., Martínez-Palacios, A., Gómez-Sierra, J.M., Pérez-Nasser, N. y Sánchez-Vargas, N.M. 2012. Estimación de la disociación de *Agave cupreata* a su hábitat idóneo debido al cambio climático. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente* 18 (3): 291-301.
- Sandoval, D., Casas, A. y Torres-García, I. 2019. *Agave ghiesbreghtii*. <www.iucnredlist.org> (consultado en abril del 2021).
- SCT. 01/01/2012. Red de vías de comunicación de la Secretaría de Comunicaciones y Transportes, 2012, escala: 1:250000. edición: 1a. Secretaria de Comunicaciones y Transporte. Distrito Federal Benito Juárez.
- SEMARNAT. 2015. Dirección General de Estadística e Información Ambiental, con base en: «Acuerdo por el que se da a conocer la lista de especies y poblaciones prioritarias para la conservación», DOF, 05/03/2014. , «NORMA Oficial Mexicana NOM-059-

SEMARNAT-2010, Protección ambiental-Especies nativas de México de flora y fauna silvestres-Categorías de riesgo y especificaciones para su inclusión, exclusión o cambio-Lista de especies en riesgo», DOF, 30/12/2010.

SEMARNAT. 2021. Programa de Ordenamiento Ecológico y Territorial Regional "Paisaje Agavero" Jalisco. SEMARNAT <<https://datos.jalisco.gob.mx/dataset/programa-ordenamiento-ecologico-y-territorial-regional-paisaje-agavero-jalisco>> (consultado en agosto del 2022).

SNICS. 2017. Bancos Comunitarios de Semillas como estrategia de Conservación *in situ*. <<https://www.gob.mx/snics/acciones-y-programas/bancos-comunitarios-de-semillas-como-estrategia-de-conservacion-in-situ>> (consultado en agosto del 2021).

Soberón, J., L. Osorio-Olvera y Peterson T. 2017. Diferencias conceptuales entre modelación de nichos y modelación de áreas de distribución. *Revista Mexicana de Biodiversidad* 88: 437-441.

Soberón, J.M., Llorente, J.B. y Oñate, L. 2000. The use of specimen-label databases for conservation purposes: An example using Mexican Papilionid and Pierid butterflies. *Biodiversity and Conservation* 9(10):1441-1466.

Téllez-Valdés, O. y Dávila-Aranda, P. 2003. Protected areas and climate change: a case study of the cacti in the Tehuacan-Cuicatlán biosphere reserve, México. *Conservation Biology* 17 (3): 846-853.

Téllez-Valdés, O., Dávila-Aranda, P., Ayala, M., Gutiérrez, K. y Melchor, I. 2007. Case studies on the effect of climate on the flora of Mexico. *Journal of Botanic Gardens Conservation International* 4(2): 17-21.

Tornés, J.S. y Hernández-Sánchez, L.Y. 2015. Mezcal cupreata, fuente de admiración. *Revista Ciencia* 66(3): 40-47.

Torres, I., Blancas, J., León, A. y Casas, A. 2015. TEK, local perceptions of risk, and diversity of management practices of *Agave inaequidens* in Michoacán, Mexico. *Journal of Ethnobiology and Ethnomedicine*, 11(1).

Torres-García, I., Casas, A., García-Mendoza, A. y Gonzáles-Elizondo, M. 2019. *Agave inaequidens*, Maguey Alto. <www.iucnredlist.org> (consultado en abril del 2021).

Torres-García, I., García-Mendoza, A. y Casas, A. 2019. *Agave valenciana*. <www.iucnredlist.org> (consultado en abril del 2021).

Torres-García, I., García-Mendoza, A., Sandoval, D. y Casas, A. 2020. *Agave cupreata*, Maguey Papalote. <www.iucnredlist.org> (consultado en abril del 2021).

Trejo-Salazar, E., Scheinvar, E. y Eguiarte, L. 2015. ¿Quién poliniza realmente los agaves? Diversidad de visitantes florales en 3 especies de *Agave* (Agavoideae: Asparagaceae). *Revista Mexicana de Biodiversidad* 86(2): 358-369.

Tropicos, Jardín Botánico de Missouri. 2020. *Agave karwinskii* Zucc. <<http://legacy.tropicos.org/Name/50141680>> (consultado en mayo del 2020).

Tropicos, Jardín Botánico de Missouri. 2020. *Agave marmorata* Roetzl. <<http://legacy.tropicos.org/Name/50182737>> (consultado en mayo del 2020).

- Vázquez Pérez, N. 2015. Variación morfológica y genética de *Agave karwinskii* (Agavaceae), en los estados de Oaxaca y Puebla. Tesis de Maestría en Ciencias Biológicas. Posgrado en ciencias biológicas, Instituto de Biología Sistemática. Universidad Nacional Autónoma de México. México, D.F.
- Varela-Ruíz, M., Díaz-Bravo, L. y García-Durán. 2012. Descripción y usos del método Delphi en investigaciones del área de la salud. *Inv Ed Med*;1(2):90-95.
- Vázquez-García, J. A.; Cházaro, B. M. de J.; Hernández, V. G.; Vargas-Rodríguez Y. L. y Zamora, T. Ma. del P. 2007. Taxonomía del género *Agave* en el Occidente de México: una panorámica preliminar. En: Vázquez-García, M. J.; Cházaro, G.; Hernández, V. E.; Flores, and Vargas-Rodríguez Y. L. (Ed.) *Los Agaves del Occidente de México*. (Ed.). J. A. Universidad de Guadalajara CUCBA-CUCSH, México. 38-82 pp.
- Velasco B, E., Zamora-Martínez, M.C., Espinosa, E., Sampayo, C. y Moreno, F. 2009. Modelos Predictivos para la Producción de Productos Forestales No Maderables: *Agaves Mezcaleros*. Manual Técnico Núm. 3. CENID-COMEF. INIFAP, México.
- Vera-Guzmán, A., Santiago, P.A. y López, M.G. 2009. Compuestos volátiles aromáticos generados durante la elaboración de mezcal de *Agave angustifolia* y *Agave potatorum*. *Revista de Fitotecnología Mexicana* 32(4): 273-279.

Anexo 1: Variables del modelo de distribución potencial

BIO 1: temperatura media anual	K: potasio
BIO 2: rango diurno medio	MO: material orgánico
BIO 3: isotermalidad	Mg: magnesio
BIO 4: estacionalidad de temperatura	Na: sodio
BIO 5: temperatura máxima del mes más cálido	pH: potencial de hidrógeno
BIO 6: temperatura mínima del mes más frío	RAS: relación de absorción de sodio
BIO 7: rango anual de temperatura	Aspecto
BIO 8: temperatura media del cuarto más húmedo	Calentamiento anisotrópico
BIO 9: temperatura media del trimestre más seco	Elevación
BIO 10: temperatura media del trimestre más cálido	Escorrentía
BIO 11: temperatura media del trimestre más frío	Índice de convergencia
BIO 12: precipitación anual	Índice de humedad topográfica
BIO 13: precipitación del mes más húmedo	Índice de rugosidad del terreno
BIO 14: precipitación del mes más seco	Medición de rugosidad vectorial
BIO 15: estacionalidad de la precipitación	Pendiente
BIO 16: precipitación del trimestre más húmedo	IVNENE: índice normalizado de enero
BIO 17: precipitación del trimestre más seco	IVNFEB: índice normalizado de febrero
BIO 18: precipitación del trimestre más cálido	IVNMAR: índice normalizado de marzo
BIO 19: precipitación del trimestre más frío	IVNABR: índice normalizado de abril
ETRA: evapotranspiración anual real	IVNMAY: índice normalizado de mayo
ETRAH: evapotranspiración anual real de los meses húmedos	IVNJUN: índice normalizado de junio
ETRAS: evapotranspiración anual real de los meses secos	IVNJUL: índice normalizado de julio
PPH: precipitación de los meses húmedos	IVNAGO: índice normalizado de agosto
PPS: precipitación de los meses secos	IVNSEP: índice normalizado de septiembre
TH: temperatura media de los meses húmedos	IVNOCT: índice normalizado de octubre
TS: temperatura media de los meses secos	IVNNOV: índice normalizado de noviembre
Ca: calcio	IVNDIC: índice normalizado de diciembre
CE: conductividad eléctrica	IVNH: índice normalizado de los meses húmedos del año
CO: carbono orgánico	IVNS: índice normalizado de los meses secos del año

Anexo 2: Ficha técnica de *Agave angustifolia*

Familia: Asparagaceae Juss., Gen. Pl.: 40. 4 Aug 1789.

Subfamilia: Agavoideae Herb., Amaryllidaceae 48, 57, 67, 121. Apr 1837.

Género: Agave L., Sp. Pl. 1: 323. 1 May 1753.

Especie: *Agave angustifolia* Haw., *Syn. Pl. Succ.* 72. 1812. TIPO: México, Oaxaca, distrito Huajuapán, 3 km al norte de Tutla, A. García-Mendoza & F. Palma 5654 (Neotipo designado por García-Mendoza & Chiang (2003: 86), MEXU).

Sinonimías de *Agave angustifolia*

Agave jacquiniana Schult., *Syst. Veg.* 7(1): 727. 1829.
Agave ixtli Karw. ex Salm-Dyck, *Hort. Dyck.* 304. 1837.
Agave elongata Jacobi, *Hambuerger Garten-Blumenzeitung* 168. 1865.
Agave ixtlioides Hook., *Bot. Mag.* 3: 27, t. 5893. 1871.
Agave exselsa Baker, *Gard. Chron.* 8: 397. 1877.
Agave spectabilis Tod. *Hort. Bot. Panorm.* 2: 4, t. 25. 1878-1892.
Agave wightii J. R. Drumm. & Prain, *Beng. Agric. bull.* 8: 15. 1906.
Agave aboriginum Trel., *Trans. Acad. Sci. St. Louis* 18: 34-35. 1909.
Agave endlichiana Trel., *Trans. Acad. Sci. St. Louis* 18: 34. 1909.
Agave lespinasei Trel., *Trans. Acad. Sci. St. Louis* 18: 34-35. 1909.
Agave zapupe Trel., *Trans. Acad. Sci. St. Louis* 18: 32-33. 1909.
Agave bergeri Trel. ex A. Berger, *Agaven* 250-251. F. 74. 1915.
Agave donell-smithi Trel., *Trans. Acad. Sci. St. Louis* 23(3): 144, pls. 23-25. 1915.
Agave kirchneriana A. Berger, *Agaven* 252. 1915.
Agave prainiana A. Berger, *Agaven* 246. 1915.
Agave sicaefolia Trel. *Trans. Acad. Sci. St. Louis* 23(3): 141, t. 17. 1915.
Agave pacifica Trel., *Contr. U. S. Natl. Herb.* 23(1): 118. 11 Oct 1920.
Agave panamana Trel., *Contr. U. S. Natl. Herb.* 23(1): 114. 11 Oct 1920.
Agave yaquiana Trel., *Contr. U. S. Natl. Herb.* 23(1): 120. 1920.
Agave owenii I. M. Johnst. *Proc. Calif. Acad. Sci. ser. 4*, 12: 999. 1924.
Agave costaricana Gentry, *Allan Hancock Pacific Exped.* 13: 195. 1949.
Agave breedlovei Gentry, *Agaves Cont. N. Amer.* 567-568. 1982.

Variedades de *Agave angustifolia*

Agave angustifolia Haw. var. *angustifolia*
Agave angustifolia var. *deweyana* (Trel.) Gentry, *Agaves Cont. N. Amer.* 564, f. 20.12. 1982.
Agave angustifolia var. *letonae* (F. W. Taylor ex Trel.) Gentry, *Agaves Cont. N. Amer.* 564, f. 20.11, 20.12. 1982.
Agave angustifolia var. *marginata* Trel., *Wiesner Festschrift* 343. 1908.
Agave angustifolia var. *nivea* (Trel.) Gentry, *Agaves Cont. N. Amer.* 566, f. 20.12. 1982.
Agave angustifolia var. *rubescens* (Salm-Dyck) Gentry, *Agaves Cont. N. Amer.* 566, f. 20.12, t. 20.1. 1982.
Agave angustifolia var. *sargentii* Trel., *Rep. (Annual) Missouri Bot. Gard.* 22: 99. 1912.
Agave angustifolia var. *variegata* Trel., *Rep. (Annual) Missouri Bot. Gard.* 19: 287. 1908.

Subespecies de *Agave angustifolia*

Agave angustifolia subsp. *tequilana* (F. A. C. Weber) Valenz.-Zap. & Nabhan, *Kaktus Klub* 44: 50. 2004.

Nombre(s) común (es): Español: Agave, Agave mezcalero, Agave textil, Alista, Amole, Apanguero, Árbol Xixique Bacanora, Barranca, Cajeta, Chacaleño, Chato, Cimarrón, Criollo, Delgadillo, Espadilla, Espadín, Henequén, Garabato, Ixtero verde, Lechuguilla, Maguey, Maguey bastón, Maguey cincoañero, Maguey de campo, Maguey de flor, Maguey de ixtle, Maguey de los bosques, Maguey de monte, Maguey delgado, Maguey espadilla, Maguey espadín, Maguey liso, Maguey manso, Maguey pelón, Maguey pintillo, Maguey teteleño, Maguey mezcalero, Maguey rayado, Mezcal, Mezcal del monte, Mezcal bravo, Mezcal criollo, Mezcal de la ladera, Pata de mula, Quiote, Saguayo, Sisal, Zapupe, Zapupe silvestre. **Maya:** Bab-ki, Ch'elem-ki, Chukum-ki, Kitam-ki, Pita-ki, Xix-ki Maya. **Mayo:** Cu'u, Juya cuum.

Popoloca:

Cahrotón. **Tarahumara:** Gusime, Ku'urí. **Zapoteco:** Doba-yey. **Sin definir:** Ch eelem, Gubuk, Ixtle, Tapemete, Zapupa, Zapupe cimarrón, Zapupe de San Bernardo, Zapupe de Sierra Chontla, Zapupe de Tepezintla, Zapupe de Vincent, Zapupe verde

Rosetófilas acaules, rosetas laxas, 1-2 m alto, 1.5-2 m diámetro. **Hojas** 40-70 por individuo, 0.6-1.3 m largo, 4-8 cm ancho, lanceoladas, planas o algo cóncavas, ascendentes, verde-claras a glaucas, margen recto, dentado, dientes de la parte media de 2-5 mm largo, 2-5 mm ancho, antrorsos o rectos, pardo claros a negruzcos, con una distancia entre sí de 1-3.5 cm; espina terminal 1.5-3.5 cm longitud, 3-5 mm diámetro, cónica. **Inflorescencia** panícula, 3-8 m de alto, contorno general oblongo, ramas primarias 9-15, 25-35 cm largo, ramas secundaria 7-9 cm largo, ramas terciarias 1-1.5 cm largo; pedúnculo verde a parduzco; brácteas del pedúnculo 7-15 cm largo, 3-3.5 cm ancho, triangulares, cartáceas, margen entero, espina terminal 2-5 mm largo; pedicelos 2-3 mm largo. **Flores** 4-8 cm largo, hipocrateriformes o tubulares, verde-parduzcas a verde-amarillentas; tépalos 1.5-2.5 cm largo, 2-3 mm ancho, oblongos, erectos, cuello 1-2 mm largo, tubo del perigonio 0.7-2 cm largo, 0.8-1 cm diámetro en la porción distal; estambres con filamentos 3.5-5.0 cm largo, insertos en el cuarto superior del tubo, amarillentos o con tintes purpúreos, anteras 1.5-2.5 cm largo, ca. 1 mm ancho, amarillentas; ovario 2-3 cm largo, 3-5 mm diámetro, cilíndrico. **Fruto** cápsula 5-6 cm largo, 2-3 cm diámetro, oblongas; semillas 0.7-1 cm largo, 5-7 mm ancho, negras, sin ala. **Bulbilos** foliosos.

Fenología: Florece de junio a agosto y fructifica de septiembre a noviembre.

Altitudinal: 30 a 1770 msnm

Tipo de vegetación: Bosque de coníferas, bosque de *Quercus*, bosque espinoso, bosque tropical caducifolio y matorral xerófilo.

De acuerdo con Cervantes-Mendivil y colaboradores (2007), las principales especies vegetales asociadas con la especie (en el estado de sonora) son *Bursera laxiflora* (Torote prieto), *Cercidium floridum* (Palo verde), *Cercidium sonora* (Palo de brea), *Fouquieria macdougalli* (Ocotillo), *Haematoxylon brasiletto* (Palo brasil), *Ipomoea arborescens* (Palo blanco), *Jatropha cardiophylla* (Sangregado), *Lysiloma divaricatum* (Mauto), *Lysiloma microphylla* (Tepeguaje), *Mimosa laxiflora* (Uña de gato), *Pachycereus pecten-aboriginum* (Echo), *Sapium biloculare* (Hierba de la flecha) y *Stenocereus thurberi* (Pithaya).

Ciclo de vida: largo, alrededor de 6 a 8 años para llegar a la madurez fisiológica.

Usos:

- Comestible: las flores son comestibles, las hojas se utilizan para cocinar carne de borrego.
- Construcción: los pedúnculos (quiotes) se utilizan para construcción de cercas.
- Industrial: utilizado para elaborar jabón o para la fabricación de esteroides u otras hormonas sexuales debido al alto contenido de saponinas.
- Medicinal: hojas.
- Textil: obtención de fibras para cuerdas, hilos, mantas, tejidos usadas en la gastronomía mexicana.
- Producción de bebidas alcohólicas: mezcal, bacanora y raicilla.

Distribución Potencial en estados con Denominación de Origen Mezcal

Aguascalientes, Durango, Guanajuato, Guerrero, Jalisco, México, Michoacán, Morelos, Oaxaca, Puebla, San Luis Potosí, Tamaulipas y Zacatecas.

Referencias

1. Barrientos-Rivera, G., Esparza, I., Segura, H., Talavera, O., Sampedro, M. y Hernández, E. 2019. Caracterización morfológica de *Agave angustifolia* y su conservación en Guerrero, México. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas* 10 (3): 655-668.
2. Cervantes-Mendivil, T., Armenta-Calderón, A. D., Sánchez-Arellano, J. G. 2007. El cultivo del maguey bacanora (*Agave angustifolia* Haw.) en la sierra de Sonora. Publicación Técnica No. 1. Centro de Investigación Regional del Noroeste. Campo Experimental Costa de Hermosillo. INIFAP, Fundación Produce Sonora A.C. y Unisierra, Hermosillo, Sonora, México.
3. Colunga-García, P. 2006. Anexo 1A. Nombres comunes e idioma en el que se encuentran, de los taxa incluidos en la BADANAM (CS007). CONABIO. (<https://bit.ly/2UNIUtd>).
4. Esqueda, V. M., Coronado, A. M. L., Gutiérrez, S. A. H. & Fragoso, G. T. sin año. *Agave angustifolia* Haw. Técnicas para el trasplante de vitroplantas a condiciones de agostadero. Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación, Sistema Nacional de Recursos Fitogenéticos para la Alimentación y Agricultura, Centro de Investigación en Alimentación y Desarrollo A. C. y Universidad Estatal de Sonora. México. 18 p.
5. García-Mendoza, A. 2011. Agavaceae. En: Flora del Valle de Tehuacán-Cuicatlán. Vol. 88: 1-95. Instituto de Biología, Universidad Nacional Autónoma de México.
6. García-Mendoza, A. 2018. Proyecto NE012: Actualización de la información de las especies y subespecies de magueyes de Oaxaca, con énfasis en las especies mezcaleras. CONABIO (<https://bit.ly/37lcs4d>).
7. Gil-Vega, K. C., Díaz-Quezada, C. E., Nava-Cedillo, A., García-Mendoza, A. & Simpson, J. 2007. Análisis AFLP del género *Agave* refleja la clasificación taxonómica basada en caracteres morfológicos y otros métodos moleculares. En: Colunga-García Marín, P., Larqué Saavedra, A., Eguiarte, L. E. y Zizumbo-Villarreal, D. (eds.) En lo ancestral hay futuro: del tequila, los mezcales y otros agaves. Centro de Investigaciones Científicas de Yucatán, Mérida, México, pp. 23–39.
8. Tropicos.org, Missouri Botanical Garden. www.tropicos.org, consultado 3 agosto 2020.

Anexo 3: Ficha técnica de *Agave cupreata*

Familia: Asparagaceae Juss., Gen. Pl.: 40. 4 Aug 1789.

Subfamilia: Agavoideae Herb., Amaryllidaceae 48, 57, 67, 121. Apr 1837.

Género: Agave L., Sp. Pl. 1: 323. 1 May 1753

Especie: *Agave cupreata* Trel. & A. Berger, *Agaven* 197. 1915. TIPO: México, Michoacán & Guerrero: Sierra madre, versant oriental, 15-17000 m, 15 Feb 1899, *Langlasse 867* (B; IT: MEXU, US).

Nombre (es) común (es): español: Agave mariposa, Agave papalote, Agave pulquero, Agave tobalá, Maguey, Maguey ancho, Maguey bravo, Maguey de mezcal, Maguey papalote

Rosetófila acaule, rosetas laxas 0.8-1.3 m alto, 0.4 - 1 m diámetro. **Hojas** 40-70 por individuo, 40-80 cm largo, 18-20 cm ancho, lanceoladas, cóncavas, ascendentes o reflejas, glaucas, margen recto o ligeramente ondulado a crenado dentado; dientes 0.5-1 cm largo, 0.6-1.2 cm ancho, rectos o recurvados, parduzcos o grisáceos, distancia entre sí 3-6.5 cm, espina apical 3.5-4 cm largo, 4-5 mm diámetro, cónica. **Inflorescencia** panícula, 5-9 m alto, contorno ovalado, ramas primarias 20-35, 1-1.2 m largo, ramas secundarias 1-1.5 m largo, ramas terciarias 3 cm largo; pedúnculo verde-glaucos, brácteas del pedúnculo 30-60 cm largo, 10 cm ancho, triangulares, cartáceas, margen entero o con algunos dienteillos menores 1 mm largo, espina 1-1.5 mm largo, parda; pedicelos 0.7-1 cm largo. **Flores** 7-10 cm largo, hipocrateriformes a tubulares, verde-amarillentas; tépalos 2.2-3.5 cm largo, 3-5 mm ancho, oblongos, erectos, los internos 2-3 mm más cortos que los externos, cuello ca. 5 mm largo, tubo del perigonio 1-2 cm largo, 1.5-2 cm diámetro en la porción distal; estambres con filamentos 7-9 cm largo, insertos en la parte media del tubo, verde-amarillentos, anteras 3-3.5 cm de largo, amarillas; ovario 3-4 cm largo, ca. 5 mm diámetro, fusiforme, estilo ca. 9 cm largo. **Frutos** cápsulas 4-5.5 cm largo, 2-2.5 cm diámetro, oblongas; semillas 9-10 mm largo, 7-8 mm ancho, negras, ala presente.

Fenología: Florece de noviembre a enero y fructificación de febrero a marzo.

Altitud: 1220 a 1860 *msnm*

Tipo de vegetación: Bosque de coníferas, bosque de Quercus, bosque tropical caducifolio y bosque tropical subcaducifolio

Ciclo de vida: largo, alrededor de 7 a 15 años para llegar a la madurez fisiológica.

Usos:

- Producción de bebida alcohólica: mezcal; ornamental.
- Comestible: flores utilizadas.
- Construcción: los pedúnculos (quiotes) utilizados
- Combustible: los pedúnculos (quiotes) son utilizados como leña.

Distribución potencial en estados con Denominación de Origen Mezcal: Michoacán de Ocampo, Guerrero, Morelos, Estado de México, Oaxaca y Puebla.

Referencias

1. Avendaño-Arrazate, C. H., Iracheta-Donjuan, L., Gódinez-Aguilar, J. C., López-Gómez, P. & Barrios-Ayala, A. 2015. Caracterización morfológica de *Agave cupreata*, especie endémica de México. *Phyton* 84: 148-162.
2. Colunga-García, P. 2006. Anexo 1A. Nombres comunes e idioma en el que se encuentran, de los taxa incluidos en la BADANAM (CS007). CONABIO. (<https://bit.ly/2UNIUtd>).
3. Gil-Vega, K. C., Díaz-Quezada, C. E., Nava-Cedillo, A., García-Mendoza, A. & Simpson, J. 2007. Análisis AFLP del género *Agave* refleja la clasificación taxonómica basada en caracteres morfológicos y otros métodos moleculares. En: Colunga-García M., P., Larqué Saavedra, A., Eguiarte, L. E. & Zizumbo-Villarreal, D. (Eds.) En lo ancestral hay futuro: del tequila, los mezcales y otros agaves. Centro de Investigaciones Científicas de Yucatán, Mérida, México, pp. 23–39.
4. Illsley Granich, C. 2004. Manejo campesino sustentable del maguey papalote de Chilapa. Grupo de Estudios Ambientales AC. Informe final SNIB-CONABIO proyecto No. BS002. México D. F (<https://bit.ly/38mhA9s>).
5. Salas, T. J. & Hernández, S. L. Y. 2015. Mezcal *cupreata*, fuente de admiración. *Ciencia* 66 (3): 40-47.
6. Tropicos.org, Missouri Botanical Garden. www.tropicos.org, consultado 3 agosto 2020.

Anexo 4: Ficha técnica de *Agave marmorata*

Familia: Asparagaceae Juss., Gen. Pl.: 40. 4 Aug 1789.

Subfamilia: Agavoideae Herb., Amaryllidaceae 48, 57, 67, 121. Apr 1837.

Género: Agave L., Sp. Pl. 1: 323. 1 May 1753

Especie: *Agave marmorata* Roezl, *Belgique Hort.* 33: 238. 1883. TIPO: Mexico: Puebla, B. Roezl (Neotipo designado por Gentry (1982: 512) *Curtis Bot. Mag.* t. 8442).

Sinonimia de *Agave marmorata*

Agave todaroi Baker, *Handb. Amaryll.* 195. 1888.

Nombre(s) común (es): Español: Huiscole, Maguey curandero, Maguey de cerdo, Maguey de monte, Maguey tepeztate, Pichometl o Pichu o Pichumel o Pitchomel, Tepeztate. **Náhuatl:** Pitzometl, pitchometl.

Rosetófilas acaules, rosetas laxas, 1-2 m alto, 1.5-2.5 m diámetro. **Hojas** 16-50 por individuo, 0.6-1.3 m largo, 0.2-0.4 m ancho, ampliamente lanceoladas, verde-amarillentas con bandas glaucas transversales, margen crenado, papiloso, con mamilas 1-2.5 cm alto, 1-1.5 cm ancho, dentado, dientes 0.7-1.5 cm largo, 0.7-1.5 cm ancho, rectos, distantes entre sí 1.5-6 cm, espina terminal 1.5-4 cm largo, 4-8 mm ancho, cónica. **Inflorescencia** panícula, 5.5-10 m alto, contorno general oblongo, ramas primarias 20-50, 30-50 cm largo, ramas secundarias 8-12 cm largo, terciarias 2-4 cm largo, a veces cuaternarias 1-2 cm largo; pedúnculo verde; brácteas 10-27 cm largo, 6-12 cm ancho en la base, triangulares, cartáceas, margen entero o con algunos denticillos en el cuarto superior, espina terminal 2-8 mm largo; pedicelos 5-8 mm largo. **Flores** 3-5 cm largo, campanuladas, amarillas; tépalos 1.2-2 cm largo, 2-5 mm ancho, oblongos, erectos, cuello 1-3 mm largo, tubo del perigonio 3-5 mm largo, 0.7-1.2 cm diámetro en la porción distal; estambres con filamentos 3-3.5 cm largo, insertos a la mitad del tubo o en la base de los tépalos, amarillos, anteras 1-1.3 cm largo, 1-2 mm ancho, amarillas; ovario 1.7-2.5 cm largo, 3-5 mm ancho, cilíndrico, estilo ca. 3 cm largo. **Frutos** cápsulas 2.5-4 cm largo, 1.5-2.5 cm ancho, oblongas; semillas 5-7 mm largo, 3-5 mm ancho, negras, ala presente.

Fenología: Florece de marzo a abril y fructifica de mayo a julio.

Ciclo de vida: largo, alrededor de 25 a 35 años para llegar a la madurez fisiológica en forma silvestre y aproximadamente 12 años de forma cultivada.

Altitud: 340 a 2112 msnm

Tipo de vegetación: Bosque de *Quercus*, bosque tropical caducifolio y matorral xerófilo.

Usos:

- Comestible: los tallos y flores jóvenes se utilizan como alimento; los botones florales sirven como forraje para el ganado.
- Construcción: el pedúnculo seco se utiliza para proteger corrales.
- Ornamental: toda la planta.
- Producción de bebidas: aguamiel, pulque y mezcal

- Religioso: las flores son ornamento en los arreglos de Semana Santa.
- Utensilio: el pedúnculo seco se utiliza para fabricar nidos de aves.

Distribución potencial en estados con Denominación de Origen Mezcal: Oaxaca, Puebla, San Luis Potosí.

Referencias

1. Colunga-García, P. 2006. Anexo 1A. Nombres comunes e idioma en el que se encuentran, de los taxa incluidos en la BADANAM (CS007). CONABIO. (<https://bit.ly/2UNIUtd>).
2. García-Mendoza, A. 2011. Agavaceae. En: Flora del Valle de Tehuacán-Cuicatlán. Vol. 88: 1-95. Instituto de Biología, Universidad Nacional Autónoma de México.
3. Gil-Vega, K. C., Díaz-Quezada, C. E., Nava-Cedillo, A., García-Mendoza, A. & Simpson, J. 2007. Análisis *AFLP* del género *Agave* refleja la clasificación taxonómica basada en caracteres morfológicos y otros métodos moleculares. En: Colunga-García Marín, P., Larqué Saavedra, A., Eguiarte, L. E. y Zizumbo-Villarreal, D. (eds.) En lo ancestral hay futuro: del tequila, los mezcales y otros agaves. Centro de Investigaciones Científicas de Yucatán, Mérida, México, pp. 23–39.
4. Tropicos.org, Missouri Botanical Garden. www.tropicos.org, consultado 3 agosto 2020.

Anexo 5: Área accesible de las especies de *Agave* estudiadas

El área accesible más pequeña le corresponde a la especie *A. marmorata* (Figura 45) mientras que el área más grande es la de *A. angustifolia* (Figura 43). Las tres especies comparten el área de las provincias morfotectónicas: Neovolcanense, Jalisco-Guerreresense, Oaxaquense, Sierra Madre Occidentalense y la N3 (Figura 46 - 47).

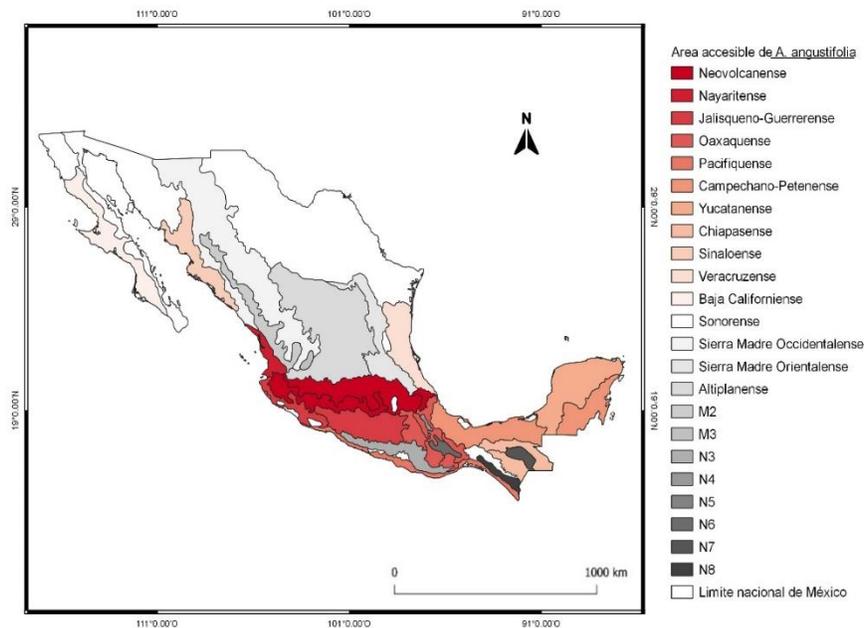


Figura 45. Provincias morfotectónicas en las que se ubica *A. angustifolia*.
Elaboración propia

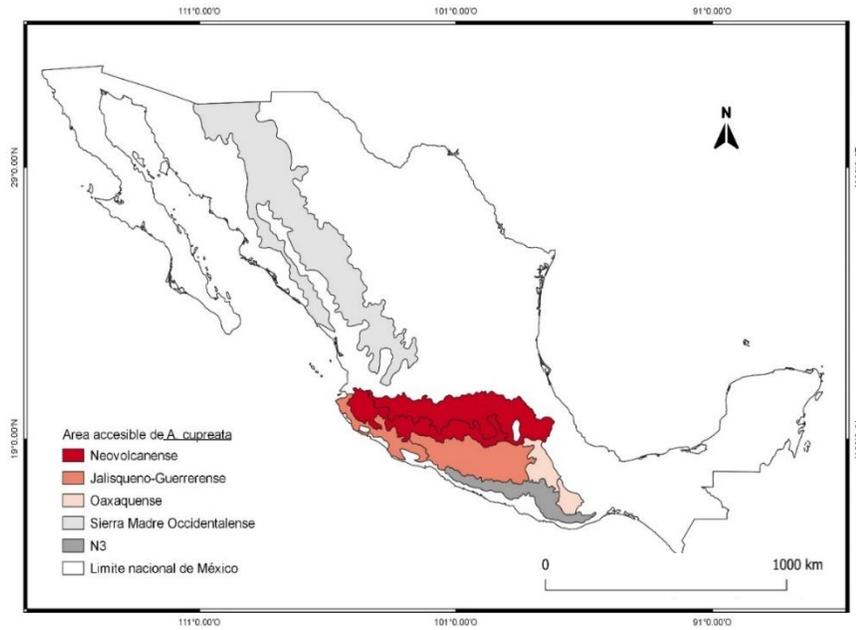


Figura 46. Provincias morfotectónicas en las que se ubica *A. cupreata*.
Elaboración propia

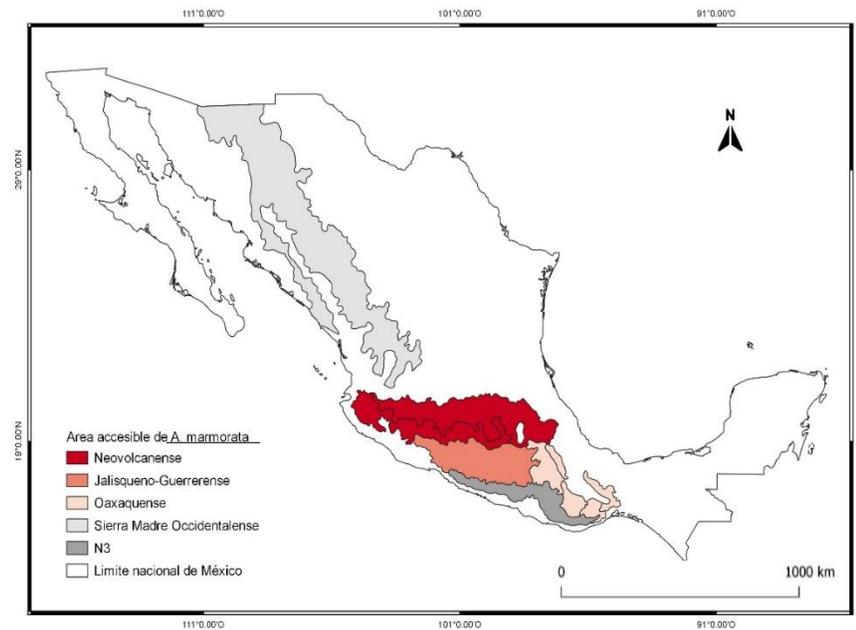


Figura 47. Provincias morfotectónicas en las que se ubica *A. marmorata*.
Elaboración propia

Anexo 6: Guion entrevista

Entrevistados: Anónimos

Objetivo: Conocer la perspectiva de las problemáticas actuales de la cadena de valor de la industria mezcalera, incluyendo de manera específica la producción de su materia prima (*Agave*).

Presentación: Hola, gracias por proporcionarme este espacio para poder platicar sobre la industria mezcalera y los agaves. Te comento que esta entrevista se mantendrá en el anonimato y tus respuestas serán confidenciales.

Preguntas:

Para comenzar, ¿Cómo consideras qué es la situación actual de la industria? ¿Existen áreas de oportunidad y cuáles son?

Respecto a los agaves, ¿cuáles consideras que son los grandes retos que enfrentamos los interesados en salvaguardar la especie?

¿Cuál es tu postura respecto a los residuos del agave, producidos en el proceso de producción del mezcal? ¿Existe la manera correcta de desecharlos? ¿Hay áreas de oportunidad / retos?

Pensando en los productores, ¿Cuáles consideras que son las mayores dificultades que enfrentan?

La denominación de origen abarca distintas especies, pero se ha considerado que debido a que se está utilizando una especie prioritariamente, esta pueda cambiar como la DO del tequila, ¿cómo afectaría esto a la industria y a las plantas?

De acuerdo con los mapas presentados, ¿considera viable extender la DO?