



EDUCACIÓN

SECRETARÍA DE EDUCACIÓN PÚBLICA



TECNOLÓGICO
NACIONAL DE MÉXICO

TECNOLÓGICO NACIONAL DE MÉXICO

Instituto Tecnológico del Valle de Oaxaca

DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN

**REGENERACIÓN ASISTIDA DE *Agave potatorum* EN EL CARRIZAL PAXTLÁN,
MIAHUATLÁN, OAXACA**

TESIS QUE PRESENTA

Virgen Antonio Hernández

COMO REQUISITO PARCIAL PARA OBTENER EL GRADO DE:

MAESTRA EN CIENCIAS EN PRODUCTIVIDAD EN AGROECOSISTEMAS

DIRECTORA

Dra. Gisela Virginia Campos Angeles

Ex – Hacienda de Nazareno Xoxocotlán, Oaxaca.
Febrero de 2023.





EDUCACIÓN
SECRETARÍA DE EDUCACIÓN PÚBLICA



TECNOLÓGICO
NACIONAL DE MÉXICO

TECNOLÓGICO NACIONAL DE MÉXICO

Instituto Tecnológico del Valle de Oaxaca

DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN

REGENERACIÓN ASISTIDA DE *Agave potatorum* EN EL CARRIZAL

PAXTLÁN, MIAHUATLÁN, OAXACA

TESIS QUE PRESENTA

Virgen Antonio Hernández

COMO REQUISITO PARCIAL PARA OBTENER EL GRADO DE:

MAESTRA EN CIENCIAS EN PRODUCTIVIDAD EN AGROECOSISTEMAS

DIRECTORA

Dra. Gisela Virginia Campos Angeles

Ex – Hacienda de Nazareno Xoxocotlán, Oaxaca.

Febrero de 2023



La presente tesis titulada: **REGENERACIÓN ASISTIDA DE *Agave potatorum* EN EL CARRIZAL PAXTLÁN, MIAHUATLÁN, OAXACA**, se realizó bajo la dirección del Comité Tutorial indicado, ha sido aprobada por el mismo y aceptada como requisito parcial para obtener el grado de:

MAESTRA EN CIENCIAS EN PRODUCTIVIDAD EN AGROECOSISTEMAS

DIRECTORA

DRA. GISELA V. CAMPOS ANGELES



CO-DIRECTOR

DR. VALENTÍN JOSÉ REYES HERNÁNDEZ



ASESOR

DR. GERARDO RODRÍGUEZ ORTIZ




ASESOR

DR. JOSÉ RAYMUNDO ENRÍQUEZ DEL VALLE



Ex-Hacienda de Nazareno, Xoxocotlán, Oaxaca.
Febrero de 2023.

	Nombre de la Información Documentada:	Código: ITVO-AC-PR-08-02
	Formato Autorización del comité para entrega de tesis.	Revisión: 1
	Referencia a la Norma ISO 9001:2015 8.2.1, 8.2.2, 8.2.3, 8.5.2	Página 1 de 1

Nazareno Xocotlán Oaxaca 08 de febrero del 2023

OFICIO No DEPI/01 1/23

C. VIRGEN ANTONIO HERNANDEZ
ESTUDIANTE DEL PROGRAMA DE MAESTRÍA EN CIENCIAS
EN PRODUCTIVIDAD EN AGROECOSISTEMAS
P R E S E N T E

Los que suscriben, miembros de su Comité Tutorial, le comunicamos que hemos revisado el contenido de su tesis "Regeneración asistida de *Agave potatorum* en el Carrizal Paxtlán, Miahuatlán, Oaxaca". Por lo que con base en los lineamientos para la Operación de Estudios de Posgrado en el Tecnológico Nacional de México se le otorga la **AUTORIZACIÓN** para que proceda a la entrega del documento final de la misma en formato digital (PDF), para continuar con su trámite y asignarle la fecha de su examen de grado

Sin más por el momento nos permitimos reconocer su esfuerzo y felicitarle por el logro de su documento de tesis

ATENTAMENTE
"Ciencia y Tecnología para el Campo"



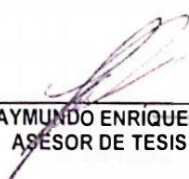
DRA. GISELA V. CAMPOS ANGELES
DIRECTORA DE TESIS



DR. VALENTIN JOSE REYES HERNANDEZ
ASESOR DE TESIS




DR. GERARDO RODRÍGUEZ ORTIZ
ASESOR DE TESIS



DR. JOSÉ RAYMUNDO ENRIQUEZ DEL VALLE
ASESOR DE TESIS



DR. GUSTAVO OMAR DIAZ ZORRILLA
JEFE DE LA DIVISIÓN DE ESTUDIOS
DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN

	Nombre de la Información Documentada:	Código: ITVO-AC-PR-08-03
	Formato Autorización de DEPI para entrega de Tesis.	Revisión: 1
	Referencia a la Norma ISO 9001:2015 8.2.1, 8.2.2, 8.2.3, 8.5.2	Página 1 de 1

Nazareno Xoxocotlan, Oaxaca, 08/Febrero/2023

OFICIO No. DEPI/0130/2023

C. VIRGEN ANTONIO HERNÁNDEZ
ESTUDIANTE DEL PROGRAMA DE MAESTRÍA EN CIENCIAS
EN PRODUCTIVIDAD EN AGROECOSISTEMAS
P R E S E N T E

Con base en los Lineamientos para la Operación de Estudios de Posgrado en el Tecnológico Nacional de México, respecto a la presentación del examen de grado, me es muy grato comunicarle que esta División de Estudios de Posgrado e Investigación a mi cargo, **AUTORIZA** la entrega del documento final de su tesis en formato digital (PDF) titulada: "**Regeneración asistida de *Agave potatorum* en el Carrizal Paxtlán, Miahuatlán, Oaxaca**".

Cuyo contenido ha sido revisado y aprobado por su Comité Tutorial y cumple en lo general con el formato establecido para este documento, como requisito parcial para obtener el grado de Maestro en Ciencias en Productividad de Agroecosistemas.

Sin más por el momento le felicito cordialmente por el logro de esta meta y le reitero el respaldo institucional de su Alma Mater.

ATENTAMENTE
"Ciencia y Tecnología para el Campo"



DR. GUSTAVO OMAR DIAZ ZORRILLA
JEFE DE LA DIVISIÓN DE ESTUDIOS
DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN

 **EDUCACIÓN** | 
DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE
POSGRADO E INVESTIGACIÓN

El presente trabajo se llevó a cabo con el apoyo del Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT), a través del número de becario 779904, con el tema de investigación **“REGENERACIÓN ASISTIDA DE *Agave potatorum* EN EL CARRIZAL PAXTLÁN, MIAHUATLÁN, OAXACA**

ÍNDICE GENERAL

	Página
ÍNDICE DE CUADROS.....	lii
ÍNDICE DE FIGURAS.....	lv
RESUMEN.....	v
SUMMARY.....	vi
CAPÍTULO I INTRODUCCIÓN.....	1
CAPÍTULO II REVISIÓN DE LITERATURA	4
2.1 Género <i>Agave</i>	4
2.1.1 Generalidades.....	4
2.1.2 Diversidad y distribución.....	6
2.1.3 Vegetación asociada a los agaves.....	7
2.1.4 Condiciones en las que se desarrollan los agaves.....	8
2.2 Descripción botánica.....	9
2.2.1 <i>Agave potatorum</i>	9
2.3 Reproducción	10
2.3.1 Germinación de semillas	11
2.4 Regeneración de <i>Agave potatorum</i>	13
2.5 Importancia de obras de conservación de suelo.....	15
CAPÍTULO III CRECIMIENTO DE <i>Agave potatorum</i> EN UNA PLANTACIÓN EN EL CARRIZAL PAXTLÁN, MIAHUATLÁN, OAXACA.....	17
3.1 Resumen.....	17

3.2 Abstract.....	18
3.3 Introducción.....	19
3.4 Materiales y métodos.....	21
3.4.1 Área de estudio.....	21
3.4.2 Sitios de estudio y fecha de plantación de <i>Agave potatorum</i>	22
3.4.3 Establecimiento del experimento	23
3.4.4 Análisis de datos.....	24
3.5 Resultados y discusión.....	25
3.5.1 Características de variables morfológicas.....	25
3.5.2 Tasa de crecimiento relativo.....	27
3.6 Conclusiones.....	32
3.7 Literatura citada.....	32
CAPÍTULO IV DISTRIBUCIÓN, REPRODUCCIÓN Y CONSERVACIÓN DE <i>Agave</i>	39
CAPÍTULO V CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	77
CAPÍTULO VI LITERATURA CITADA.....	78

ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro	Pág.
1 Propiedades físicas y químicas del suelo de los sitios de plantación.....	23
2 Análisis de varianza para las variables morfológicas con base en los tratamientos y registros en diferentes fechas.....	26
3 Tasa de crecimiento relativo (cm mes^{-1}) en altura en plantas de <i>Agave potatorum</i> durante seis meses en respuesta a la práctica obras de conservación de humedad.....	28

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura		Pág.
1	<i>Agave potatorum</i> localizado en El Carrizal Paxtlán, distrito de Miahuatlán, Oaxaca.....	10
2	Semillas de <i>Agave potatorum</i>	11
3	Tasa de crecimiento relativo (TCR) de altura de <i>Agave potatorum</i> con regeneración asistida.....	30
4	Tasa de crecimiento relativo (TCR) de altura de <i>Agave potatorum</i> con regeneración natural.....	31

RESUMEN

El género *Agave* es ampliamente reconocido por su importancia en la elaboración de bebidas destiladas. *Agave potatorum* es la especie silvestre que más ha sido impactada debido a su extracción sin ningún manejo, por su alta demanda. Por lo tanto, el objetivo fue evaluar la sobrevivencia y el crecimiento inicial de plantas de *Agave potatorum* producidas en vivero y establecidas en campo con la implementación de obras de conservación de suelo para favorecer la retención de humedad en El Carrizal Paxtlán, Miahuatlán, Oaxaca. Se registraron las variables morfológicas: altura de la planta, diámetro de roseta, largo y ancho de la hoja, longitud de la espina marginal y terminal y número de hojas. El análisis de varianza mostró diferencias significativas en los efectos de los tratamientos sobre la altura de la planta y longitud de la hoja. La tasa de crecimiento relativo y la altura de la planta no mostró diferencia significativa entre las fechas de registro debido a que el tiempo de la evaluación fue muy corto. La reintroducción de plantas de agave en sitios donde antes existieron poblaciones silvestres, es indispensable y puede apoyarse con técnicas que permitan la retención de humedad y la conservación del suelo. Se documentó la distribución, reproducción y conservación del género *Agave*.

Palabras clave: Aprovechamiento sustentable, poblaciones silvestres, reintroducción.

SUMMARY

The *Agave* genus is widely recognized for its importance in the production of distilled beverages. *Agave potatorum* is the wild species that has been most impacted due to its extraction without any management, because of its high demand. Therefore, the objective was to evaluate the survival and initial growth of *Agave potatorum* plants produced in nursery and established in the field with the implementation of soil conservation works to favor moisture retention in El Carrizal Paxtlán, Miahuatlán, Oaxaca. Morphological variables were recorded: plant height, rosette diameter, leaf length and width, marginal and terminal spine length and number of leaves. The analysis of variance showed significant differences in the effects of treatments on plant height and leaf length. Relative growth rate and plant height showed no significant difference between recording dates due to the short evaluation time. The reintroduction of agave plants in sites where wild populations once existed is indispensable and can be supported with techniques that allow moisture retention and soil conservation. The distribution, reproduction and conservation of the genus *Agave* was documented.

Key words: sustainable use, wild populations, reintroduction.

CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN

El género *Agave* se extiende en áreas con condiciones de alta variabilidad en clima, temperatura y precipitación, el resultado de ello es la gran diversidad de especies que lo representa. Se estima que México cuenta con 159 especies de las cuales 129 son endémicas (García-Mendoza *et al.*, 2019). La permanencia de agaves se caracteriza por su capacidad y resiliencia para adaptarse a condiciones de suelos pobres y tolerar fuertes cambios ambientales. El agave es de crecimiento lento y una vez que alcanza la madurez fisiológica muere (Colunga-GarcíaMarín *et al.*, 2017). Para la producción de mezcal se usan tanto especies silvestres como cultivadas como materia prima; de la cual, en el año 2020 el 14.2 % se obtuvo de agaves silvestres, destacando el *Agave potatorum* que aportó 164 335.9 L (CRM, 2020).

La disponibilidad de *Agave potatorum* en poblaciones silvestres es escasa debido a que cuando se usa para producir mezcal, se evita su reproducción ya que su

único mecanismo de reproducción es por semillas. Dentro de las zonas con mayor aprovechamiento, están las poblaciones de Sola de Vega y Miahuatlán de Porfirio Díaz (Illsley-Granich *et al.*, 2018; Martínez-Jiménez *et al.*, 2019). Como estrategia de conservación un grupo de productores en la Sierra Sur, realizaron la colecta de semillas para su reproducción en vivero y establecimiento como cultivo (Enríquez del Valle, 2008; Martínez-Ramírez *et al.*, 2012). Al habilitar la reintroducción de plantas desarrolladas en vivero o invernadero, se podrían asegurar, conservar y recuperar las poblaciones silvestres de agave, que han sido disminuidas por el saqueo y la destrucción del hábitat (Delgado-Lemus *et al.*, 2014; Reynoso-Santos *et al.*, 2012).

La pérdida de especies vegetales, se debe a diferentes aspectos como 1) la eliminación de bosques para la expansión de cultivos agrícolas, aprovechamiento maderable y no maderable y la construcción de infraestructura; 2) introducción de especies invasoras que alteran el hábitat natural; 3) la sobreexplotación de flora y fauna silvestre; 4) la contaminación ambiental por el uso de agroquímicos y de residuos generados por las grandes industrias y 5) el cambio climático por la presencia de altas temperaturas, sequías prolongadas y eventos propios de la naturaleza (Pérez-García *et al.*, 2020). En casos graves, cuando las poblaciones silvestres han desaparecido o están cerca de ello, es necesario reintroducirlas, lo cual tendrá muchos más beneficios que tan solo la conservación de la especie (Delgado-Lemus *et al.*, 2014, Serio, 2011, Vargas, 2011).

Debido a la problemática que enfrentan las poblaciones silvestres de *Agave* especialmente en la sierra sur de Oaxaca, el objetivo del estudio fue evaluar la regeneración asistida de *Agave potatorum* para su reintroducción en áreas de El Carrizal Paxtlán, Miahuatlán, Oaxaca.

CAPÍTULO II

REVISIÓN DE LITERATURA

2.1 Género *Agave*

2.1.1 Generalidades

Los agaves son plantas xerófitas que presentan características únicas como la succulencia de las hojas, cutículas gruesas en la epidermis de la hoja, acumulación de cera, hojas en disposición de rosetas, bordes de espina terminal y marginal para tolerar periodos de sequía, salinidad en el suelo y las temperaturas altas en el ambiente (García-Mendoza y Franco-Martínez, 2018; Tamayo-Ordóñez *et al.*, 2018), su sistema de raíz superficial y fibrosa se localiza a 30 cm de profundidad (Nava-Cruz, 2014). Los agaves silvestres tienen mayor contenido de cera epicuticular, lo cual es importante para resistir las condiciones extremas de sus hábitats y tolerancia a los patógenos (Monja-Mio *et al.*, 2019). Además, presentan el Metabolismo Ácido de las Crasuláceas (CAM), que

consiste en que las hojas abren sus estomas por la noche para fijar CO₂ para usarlo durante la fotosíntesis (Nobel, 1988, Ruíz-García, 2014).

Las plantas CAM evolucionaron para disminuir la pérdida de energía asociada a la fotorrespiración (Andrade *et al.*, 2007; Griffiths, 1988, Keeley and Rundel, 2003). Durante el proceso de la fotosíntesis se utiliza fosfoenolpiruvato carboxilasa (PEPC) para fijar CO₂, dicha enzima se encuentra en todas las células vegetales. Las células estomáticas tienen una alta concentración de PEPC y vacuolas de gran tamaño, estas son características específicas de las plantas CAM. Ello incluye a dos grupos de plantas vasculares que son xerofitas e hidrófilas (Andrade *et al.*, 2007; Cockburn, 1981; Cockburn, 1985; Keeley and Rundel, 2003). Asimismo, se menciona que el complejo estomático es importante para las plantas de esta naturaleza, por lo que el género *Agave*, está conformado por cuatro células epidérmicas asociadas a células oclusivas, que tiene la estructura de tipo tetracístico; además sus estomas están hundidas para reducir la pérdida de vapor de agua (Niechayev *et al.*, 2019; Hernández-Valencia *et al.*, 2005). Sus raíces laterales y pocos profundos, junto con la succulencia de tejidos permiten maximizar la captación y almacenamiento de agua para ampliar la supervivencia durante la estación seca (February *et al.*, 2013; Niechayev *et al.*, 2019). Por estas razones, los agaves habitan en territorios de matorral xerófilos, bosque templado y bosque subcaducifolio.

2.1.2 Diversidad y distribución

El género *Agave* se distribuye desde el sur de los Estados Unidos de América hasta el norte de Sudamérica (García-Mendoza 2002). Incluye aproximadamente 210 especies, 159 están presentes en México (75% del total) y 129 de ellas son endémicas, representan el 61% de las especies del mundo y 81% de las que se distribuyen en México (García-Mendoza *et al.*, 2019). Su presencia entre las regiones es altamente asimétrica, en el centro y norte, el número de especies es mayor que en la parte sur en los estados de Tabasco, Campeche y Quintana Roo (Pérez *et al.*, 2016). La presencia de especies de agave a largo de México está influenciada por la heterogeneidad de hábitats naturales, la capacidad de dispersión, la tolerancia ecológica y plasticidad genética (Avendaño-Arrazate *et al.*, 2015). El mayor número de especies de agaves se encuentran en Jalisco y en la Reserva de la Biósfera Tehuacán-Cuicatlán (García-Mendoza *et al.*, 2019).

En 2007, Oaxaca ocupó el primer lugar dentro de los estados con presencia de agaves con 52 especies (Golubov *et al.*, 2007). En 2019, la cifra se actualizó a 58 especies, de los cuales 13 son endémicos (Martínez-Jiménez, 2019). La diversidad de especies está dada por la altitud y condiciones topográficas para cada población silvestre. El *Agave potatorum* se encuentra de 1240 a 2400 m, la cual se extiende en una franja territorial que abarca la Sierra Sur, los Valles Centrales y la Mixteca, formando parte de la vegetación de bosque de encino (Gutiérrez-Hernández *et al.*, 2020, Martínez-Ramírez *et al.*, 2014). El *Agave*

marmorata Roetzl., *A. karwinski*, *A. potatorum*, *A. americana* L. y *A. convallis* Trel, se localizan de 1620 a 2035 m de altitud en San Miguel Tilquiapam, Ocotlán (León-Vázquez *et al.* 2013).

En el año 2019, se han dado a conocer nuevas especies, *Agave iyobaa* García-Mend. & S. Franco, sp. nov, con distribución en Valles Centrales encontrado de 1550 a 1900 m; *Agave gypsicola* García-Mend. & D. Sandoval, sp. nov se desarrolla de 1350 a 1600 m de altitud, con distribución única en la cuenca alta del río Verde, Tlaxiaco; *Agave quiotepecensis* García-Mend. & S. Franco, sp. nov. cuya distribución de 525 a 845 m, en la cuenca del río Papaloapan y el *Agave megalodonta* García-Mend. & D. Sandoval, sp. nov cuya distribución en la cuenca del río Balsas, de 1000 a 1600 m (García-Mendoza *et al.* 2019).

2.1.3 Vegetación asociada con los agaves

La vegetación es una comunidad de plantas presentes en la superficie del suelo. La interacción de los factores bióticos y abióticos proporcionan una diversidad florística en diferentes ecosistemas. Los agaves por ser resistentes a las condiciones de alta radiación y escasez de nutrientes en el suelo, son elementales dentro la vegetación del matorral xerófilo (Cervera-Herrera *et al.*, 2018). A pesar de que este ecosistema se caracteriza por tener largos periodos de sequías y suelos pobres, es el más importante con el mayor número de especies de plantas asociadas a fauna (Alanis-Rodríguez *et al.*, 2015; Reyna-

González *et al.*, 2021). Las especies de *Agave* están presentes en el bosque espinoso, el matorral y el pastizal (Rojas *et al.*, 2013).

Dentro de los bosques templados de encino, encino-pino, y chaparrales, se demuestra que la complejidad fisiográfica, alta heterogeneidad ambiental y climática favorece a la diversificación de plantas, entre las cuales se hace presente el género *Agave* (Salinas-Rodríguez *et al.*, 2022). El *Agave potatorum* y *Agave salmiana* Otto. ex Salm, comparten sitio con las especies de la familia Asteraceae, Poaceae y Fabaceae (Encina-Domínguez *et al.*, 2009, Pompa-Castillo *et al.*, 2021). Con bajo número de especies en la selva baja caducifolia (García-Mendoza *et al.*, 2019).

2.1.4 Condiciones en las que se desarrollan los agaves

La disponibilidad de los elementos; suelo, agua, luz, clima y temperatura, son determinantes para el ciclo de vida de los vegetales. Los agaves tienen características particulares para desarrollarse en condiciones de estrés (agua y temperatura) y edafológicas variables. El *Agave salmiana* Otto y *Agave tequilana* Weber Var. Azul, tienen un desarrollo óptimo en suelos delgados o profundos de textura media que tienen un buen drenaje (Ruiz-Corral *et al.*, 2013). Asimismo, los cultivos de agave responden bien en los suelos; luvisoles, vertisoles y feozems, cuyas propiedades químicas varían en elementos esenciales de la fertilidad del suelo, para el caso del *Agave tequilana* Weber requiere de suelos

con pH menor a 5.5 (Álvarez-Sánchez, 2010). Mientras que *Agave potatorum* Zucc, prefiere el suelo con presencia de rocas calizas y terrenos con pendiente.

Tratándose del establecimiento de plántulas es necesario la implementación de riego y fertilización para acelerar el crecimiento y desarrollo de las plantas, condiciones que no pueden proporcionarse en el caso de repoblaciones en sitios de los cuales han desaparecido (Martínez-Ramírez *et al.*, 2012). Las plantas jóvenes son capaces de sobrevivir hasta 14 meses enfrentando condiciones extremas de falta de humedad en el suelo y valores de potencial hídrico de hasta de -6 MPa (Ramírez-Tobías *et al.*, 2014). En el área en donde se desarrollan las poblaciones de agave, las temperaturas oscilan de 15 a 25 °C durante el día y de 10 a 15 °C durante la noche, pero de -6 °C perjudica al desarrollo de las plantas jóvenes. Asimismo, las plantas pueden proliferar en zonas con escasa precipitación (Arreola *et al.*, 2020).

2.2 Descripción botánica

2.2.1 *Agave potatorum*

El *Agave potatorum* fue descrito por Zuccarini en 1832, es conocido como agave tobalá, es parte de la familia Agavaceae (García-Mendoza, 2010). Son plantas monocárpicas y perennes que tardan de 8 a 12 años en florecer (Torres *et al.*, 2015). Presentan rosetas pequeñas y compactas que tienen de 30 a 50 cm de

altura y de 40 a 60 cm de diámetro de la roseta (Figura 1). Varios autores mencionan que sus hojas varían de 25 a 80 hojas por planta, de 15 a 35 cm de largo, de 8 a 10 cm de ancho, su forma va de forma ovaladas, oblongas o lanceoladas; con margen sinuado a crenado. Sus espinas terminales miden de 3 a 4.5 cm de largo, de 0.4 a 0.7 cm de ancho (García-Mendoza, 2010; Gentry, 1982; Torres *et al.*, 2015). Exhiben inflorescencia paniculada en un largo pedúnculo erecto, con ramas de 10 a 30 cm de largo, separadas entre sí de 15 a 30 cm, de color amarillo. Sus cápsulas miden de 4 a 6 cm de largo y de 1.5 a 2 cm de ancho, son oblongas, estipitadas y rostradas (Figura 1). Las semillas de *Agave potatorum* miden de 5 a 6 mm de largo y de 4 a 5 mm de ancho, estas son lacrimiformes, planas de color negro brillante (Figura 2) (Gentry, 1982; García-Mendoza, 2010; Vázquez-Díaz *et al.*, 2011).



Figura 1. *Agave potatorum*, localizado en El Carrizal Paxtlán, distrito de Miahuatlán, Oaxaca



Figura 2. Semillas de *Agave potatorum*

2.3 Reproducción

Agave potatorum es monocárpico, tiene una vida útil de 10 años o más (Torres *et al.* 2013; Torres *et al.* 2015) y se reproduce únicamente por semillas (García-Mendoza, 2010; Ramírez-Tobías *et al.*, 2012). La obtención del germoplasma implica esperar por varios años, una vez que el agave está por concluir su ciclo de vida, ocurre la floración entre agosto a diciembre y empieza a fructificarse de noviembre a marzo, las primeras estructuras en desarrollarse y madurar son las masculinas y posteriormente las femeninas. La floración ocurre de manera asincrónica, es decir, que una vez que fructifica la roseta empieza a disminuir el tamaño y las hojas pierden turgencia (León, 2013). Entre las causas que afectan a la población de agaves para la obtención de semillas están; la extracción para la producción de mezcal, la presencia de fuertes vientos que tiran los quiotes; los animales se comen las flores y semillas; la falta de polinizadores; presencia de

incendios y la eliminación del desarrollo de escapo floral para ser aprovechados como materia prima (Illsley-Granich *et al.*, 2018).

2.3.1 Germinación de semillas

De la gran cantidad de semillas que libera el *Agave potatorum*, sólo una proporción es viable, de las cuales se han reportado que el índice de germinación es bajo, y conforme crecen las plántulas, la sobrevivencia es baja, debido a los cambios ambientales *in situ* y también por el impacto de las actividades del ser humano sobre los recursos naturales (Ignacio-Torres *et al.*, 2013; Rangel-Landa *et al.*, 2015).

El proceso de germinación de las semillas está influenciado por mecanismos metabólicos y morfogenéticos. Los cuales consideran la viabilidad del embrión, la reserva que contiene la semilla, disponibilidad de agua, la temperatura y luz para efectuar en el desarrollo y crecimiento de la plántula de manera sexual. Para que el agave se reproduzca en ambientes áridos y semiáridos, es importante las condiciones óptimas de suelo y de la calidad de semillas durante las primeras etapas de germinación. Por ello, la composición química es fundamental para germinación de semillas de *Agave potatorum*, siendo reportado el contenido de lípidos (Gutiérrez-Hernández *et al.*, 2020). Por otro lado, la temperatura ambiental incide en la emergencia de los cotiledones (Vázquez-Díaz *et al.*, 2011).

La eliminación del escapo floral de *Agave potatorum* afecta la producción de semillas y su germinación *in situ*. Por ello, surge la iniciativa de colectas de semillas en poblaciones silvestres, las cuales son germinadas bajo condiciones controladas y se establecen en campo dos años después (Ignacio-Torres *et al.*, 2013; Rangel-Landa *et al.*, 2015).

2.4 Regeneración de *Agave potatorum*

La regeneración natural es un mecanismo en donde se da la renovación de plantas a través de semillas auto sembradas o por medios vegetativos (Muñoz, 2014). El establecimiento de nuevas plántulas comprende procesos ecológicos y factores: 1) bióticos (interacciones que pueden sostener las especies vegetales con especies microbianas, vegetales o animales) y 2) abióticos (condiciones ambientales del suelo, microclima y el uso del espacio para enfrentar y relacionarse con los factores bióticos) (Pérez-López *et al.*, 2013).

La reproducción de nuevas plantas depende de las condiciones edafológicas y del proceso fisiológico de la semilla. Por lo tanto, algunas características idóneas para la germinación de semillas en el suelo son; suficiente humedad, disponibilidad de nutrientes, materia orgánica, luz y bajo grado de compactación (Pérez-López *et al.*, 2013; Muñoz, 2014; Panna y Sundriyal 2013). Además, los hongos micorrízicos juegan un papel importante en la fertilidad de los suelos, su presencia en las raíces de plantas vasculares presentes en suelos salinos,

beneficia la regeneración de las plantas (List *et al.*, 2017; Montañaño *et al.*, 2012). Asimismo, la presencia de perturbaciones causadas por inundaciones, sequías, viento y fuego afecta la renovación de bosques, selvas y matorrales (Pérez-López *et al.*, 2013; Norden, 2014; Ramírez-Marcial, 2003).

Con la recolección de agaves silvestres se interrumpe el ciclo de reproducción de semillas, en consecuencia, decrece la capacidad regenerativa de la especie (Illsley-Granich *et al.*, 2018). La reproducción de semillas desde un ambiente controlado, se considera una alternativa de gran importancia para conservar y asegurar la respuesta a la demanda de materia prima para la producción de mezcal (Delgado-Lemus, 2008; Ignacio-Torres *et al.*, 2013).

Para llegar al establecimiento de plantas de agave, es necesario seguir con los siguientes pasos (León, 2013; Torres *et al.*, 2013); 1) recolección de semillas con la ayuda de una tijera de garrocha, 2) siembra de semillas en vivero, 3) trasplantar los individuos en bolsas de plástico en donde se mantienen menos de dos años, 4) seis meses antes del establecimiento, los agaves se someten a la etapa de endurecimiento (retirarle el riego, quitarle la tierra para exponer las raíces al sol o incluso cortarlas) y 5) establecimiento en campo.

2.5 Importancia de obras conservación de suelo

La conservación de suelo se refiere a un conjunto de técnicas y prácticas agrícolas que evitan la degradación y erosión. La implementación de obras de conservación busca recuperar y mejorar la calidad de los suelos. En los sistemas de producción agrícola y forestal, se han probado prácticas de conservación de suelo como estrategia de reducción de erosión, retención de humedad, a través de la construcción de terrazas (Cotler *et al.*, 2015).

Algunas prácticas son; el uso del maguey y nopal como muros vivos, permite retener suelos y controlar la erosión (Zapata-Carreño, 2018). El uso de bordos de piedras y terrazas, permite la retención de humedad, captación de agua en épocas de lluvia y la pérdida de suelo; al realizarse cerca de las plantas o cultivos contribuye al crecimiento y desarrollo de las especies vegetales (Gisbert-Blanquer *et al.*, 2012). La implementación de zanjas trincheras propicia el almacenamiento de agua de lluvia en zonas áridas y semi-áridas, estas podrían aplicarse como el uso eficiente del recurso hídrico y favorecer la producción de biomasa (Cotler *et al.*, 2015, Singh *et al.*, 2013).

Las obras de suelo de mayor uso y aplicación en las plantaciones y reforestaciones, según la pendiente del terreno, el tipo de suelo y factores ambientales es la construcción de terraza individual por cada especie plantada. La posición de apertura depende de la textura del suelo y precipitación del lugar,

por lo que las terrazas se clasifican en individuales e individuales en media luna (CONAFOR, 2018).

Terrazas individuales. Son terraplenes circulares con una profundidad mínima de 10 cm, medida aguas abajo. Con la excavación se forma un bordo en media luna aguas abajo. Se realiza en pendientes menores o iguales a 30%.

Terrazas individuales en media luna. Terraplenes para terrenos con pendientes mayores de 30%, de 1.2 m de largo construidas a nivel o en contrapendiente, con una profundidad de corte de 10 cm aguas abajo y la profundidad de corte necesaria para estar a nivel aguas arriba.

Las funciones de las terrazas individuales son (CONAFOR, 2018): 1) permiten el control de la erosión; 2) retienen y conservan la humedad; 3) favorecen el aprovechamiento de fertilizantes; 4) incrementan la supervivencia de árboles en la reforestación y 5) aceleran el desarrollo de especies vegetales. Asimismo, se recomienda para zonas con alta precipitación, que su construcción dependerá de la profundidad del suelo permisible a excavar, y además deberá estabilizarse taludes de la terraza, mediante la colocación de piedras o material muerto para evitar destrucción.

CAPÍTULO III

CRECIMIENTO DE *Agave potatorum* EN UNA PLANTACIÓN EN EL CARRIZAL PAXTLÁN, MIAHUATLÁN, OAXACA

3.1 Resumen

En Oaxaca, el *Agave potatorum*, es una especie silvestre de crecimiento lento que se propaga por semillas. Su aprovechamiento no controlado ha ocasionado la disminución de individuos. El objetivo del estudio fue evaluar la sobrevivencia y el crecimiento inicial de *Agave potatorum* en dos tipos de cepas que favorecen la retención de humedad. Se evaluaron dos factores: 1) Año de siembra (2020 y 2021); y 2) Obras de conservación de humedad y retención de suelo: a) Cepa media luna (CML), b) Bordo de piedra (BP) y c) Testigo. En tres fechas diferentes se registraron, las variables morfológicas, altura de la planta, diámetro de roseta, número de hojas, longitud y ancho de dos hojas de la parte media de la roseta, longitud de la espina marginal y terminal; además, se calculó la tasa de crecimiento relativo (TCR). Se realizó el análisis de varianza y prueba de medias (Duncan, 0.05). Los tratamientos provocaron efectos significativamente diferentes sobre la altura de la planta y la longitud de la hoja. Mientras que la TCR presentó diferencias significativas en los meses de septiembre, octubre y noviembre de 2021 con valores de 0.367, 0.379 y 0.367 cm respectivamente. Debido a la duración del estudio se recomienda la evaluación posterior de las obras de conservación de humedad para determinar su efectividad en el crecimiento y desarrollo del agave.

Palabras claves: Crecimiento, obras de conservación, plantas cultivadas.

3.2 Abstract

In Oaxaca, *Agave potatorum* is a slow-growing wild species that propagates by seed. Its uncontrolled harvesting has caused a decrease in the number of individuals. The objective of the study was to evaluate the survival and initial growth of *Agave potatorum* in two types of strains that favor moisture retention. Two factors were evaluated: 1) Planting year (2020 and 2021); and 2) Moisture conservation and soil retention works: a) Half moon strain (CML), b) Stone border (BP) and c) Control. On three different dates, the morphological variables, plant height, rosette diameter, number of leaves, length and width of two leaves of the middle part of the rosette, length of the marginal and terminal spine were recorded; in addition, the relative growth rate (RGR) was calculated. Analysis of variance and test of means (Duncan, 0.05) were performed. The treatments had significantly different effects on plant height and leaf length. While the TCR presented significant differences in the months of September, October and November 2021 with values of 0.367, 0.379 and 0.367 cm respectively. Due to the duration of the study, further evaluation of the moisture conservation works is recommended to determine their effectiveness on agave growth and development.

Key words: Growth, conservation works, cultivated plants.

3.3 Introducción

La disponibilidad de agave silvestre como materia prima implica tiempos de espera prolongados, ya que, dependiendo de la especie, las plantas tardan entre 5 a 28 años para alcanzar la madurez (Colunga-GarcíaMarín *et al.*, 2017). Datos del Consejo Regulador del Mezcal (CRM) muestran que durante el año 2019, se produjeron 164 335.9 L de mezcal a partir de materia prima de agave silvestre que fue 14.2 %, de la producción total de mezcal y que el 2.3% de la producción fue a partir de *Agave potatorum* (CRM, 2020). Silva y Caballero (2004) y Caballero *et al* (2013) señalan que para producir un litro de mezcal se requieren de 9.6 a 12.7 kg de maguey verde según la especie.

Agave potatorum crece tanto en suelos arenosos derivados de rocas calizas de sitios planos (García-Mendoza, 2010), como en terrenos pedregosos en sitios con pendiente asociados a vegetación de *Quercus* (Enríquez del Valle, 2008, Enríquez del Valle *et al.*, 2016). Algunos autores reportan que tanto el crecimiento como la sobrevivencia de *Agave potatorum* son altos bajo protección de plantas nodrizas, tales como las especies *Rhus chondroloma*, *Wimmeria microphylla* y *Pterostemon rotundifolius* en localidades de San Francisco Xochiltepec y San Luis Atlotitlán, Puebla, por lo que podría considerarse como una técnica de recuperación de poblaciones silvestres (Rangel-Landa *et al.*, 2015).

Aunque son pocos los trabajos documentados al respecto, observaciones de campo muestran que la extracción de *Agave potatorum* de poblaciones silvestres, se realiza sin planes de manejo sustentable, lo que conlleva a la disminución de individuos maduros y generalmente se supera la capacidad de regeneración natural. Por ejemplo, la disminución de poblaciones de *Agave potatorum* en San Luis Atolotitlan, Puebla, es severa a causa de la alta extracción de individuos reproductivos (Delgado-Lemus, 2008). Aunque la producción de semillas es alta en algunas poblaciones naturales, una proporción elevada de ella no es viable y se tienen índices de germinación bajos (Ignacio-Torres *et al.*, 2013, Rangel-Landa, 2015), así como sobrevivencia baja de las plántulas (Muñoz *et al.*, 2014). Datos tomados en el Valle de Tehuacán, Puebla, sugieren que la reintroducción de plántulas en áreas naturales y degradadas puede ser una estrategia adecuada para asegurar y mantener poblaciones silvestres de agave (Delgado-Lemus *et al.*, 2014).

La extracción de plantas de poblaciones de agave silvestres en el estado de Oaxaca, en respuesta a una presión cada día más alta para la elaboración de bebidas alcohólicas y otros subproductos, pone en riesgo su conservación. Reynoso-Santos *et al* (2012), Delgado-Lemus *et al* (2014), Cabrera-Toledo, *et al* (2020), Lara-Ávila y Alpuche-Solís (2016) señalan que, con el establecimiento en campo de plantas jóvenes de aproximadamente 3 años de edad, producidas en invernaderos y viveros, se podría garantizar la conservación de la especie, la repoblación de las poblaciones silvestres y asegurar el abastecimiento de materia

prima para la agroindustria. En el caso del *Agave potatorum*, en la sierra sur de Oaxaca no existe información sobre el crecimiento y desarrollo de agaves de manera silvestres y cultivadas. Por lo que el objetivo fue evaluar la sobrevivencia y el crecimiento inicial de *Agave potatorum* en dos tipos de cepas que favorecen la retención de humedad en El Carrizal, San Andrés Paxtlán, Miahuatlán, Oaxaca.

3.4 Materiales y métodos

3.4.1 Área de estudio

La comunidad de El Carrizal Paxtlán pertenece al municipio de San Andrés Paxtlán, del distrito de Miahuatlán, región Sierra Sur del estado de Oaxaca. Se sitúa en las coordenadas 16° 6' 49.68" de latitud norte y 96° 19' 57.72" de longitud oeste. El clima, de acuerdo con la clasificación propuesta por Köppen y modificada por García (1988), corresponde a un C(w2), semicálido, templado subhúmedo, con temperatura media anual entre 12° C y 18° C con lluvias de verano, precipitación de 700 a 1200 mm. La altitud promedio es de 2 123 m.

3.4.2 Sitios de estudio y fecha de plantación de *Agave potatorum*

El experimento se realizó en la propiedad del productor cooperante en la comunidad El Carrizal. Se eligieron las plantas en dos sitios, el primero de ellos

se estableció en junio del 2020 entre las coordenadas 16°11'31.14'' de latitud norte y 96°33'55.81'' de longitud oeste, a 2030 m de altitud. El segundo en agosto del 2021 entre los 16°11'28.9'' de latitud norte y 96°33'44.60'' de latitud oeste, con altitud de 1910 m. Ambos sitios presentan exposición sureste y pendiente de 10 a 25 %. Las plantas que se utilizaron fueron obtenidas a partir de la germinación de semillas nativas, y se mantuvieron en vivero por un año hasta alcanzar una altura de 8 a 12 cm sin la aplicación de fertilización.

Las plantas en ambos sitios se desarrollaron en un suelo franco arcilloso arenoso (Cuadro 1), de acuerdo con el resultado de su análisis que fue realizado en el Laboratorio de Diagnóstico Ambiental del Instituto Tecnológico del Valle de Oaxaca, de acuerdo a la NOM-021-RECNAT-2000.

Cuadro 1. Propiedades físicas y químicas del suelo de los sitios de plantación.

Sitio	Textura			pH	CE dSm ⁻¹	MO (%)	N (%) estimado
	Arena (%)	Arcilla (%)	Limo (%)				
1	53.52	26.48	20	5.1	1.1	3.3	0.2
2	45.52	30.48	24	6.6	0.9	2.6	0.1

CE= Conductividad eléctrica, MO= Materia orgánica, N= Nitrógeno

3.4.3 Establecimiento del experimento

Se utilizó un diseño completamente al azar con arreglo factorial, en el cual se evaluaron dos factores: a) fecha de establecimiento de las plantas, con dos niveles 1) año 2020, y 2) año 2021; y b) sistema de plantación con tres niveles que corresponden a las obras de conservación de humedad: 1) cepa media luna (CML) de 30 cm de profundidad, 2) bordo de piedra (BP) de 20 cm de longitud y 3) plantas testigo. Las obras de conservación de suelo se realizaron durante el mes de julio y agosto del año 2021. La unidad experimental fue de 5 plantas con 10 repeticiones por tratamiento, con un total de 300 plantas. A cada una de las plantas, se les aplicó una de las obras de conservación; 1) Se trazó y cavó una cepa en forma de media luna (CML) a 30 cm de distancia de la planta, con 20 cm de profundidad en la parte pendiente arriba de la planta; 2) Se construyó un bordo con piedras (BP) pendiente abajo de la planta y 3) Se dejó un grupo de plantas testigo (TES), en cuya cercanía no se realizó obra alguna.

Los registros (*i.e.* toma de datos) se realizaron cuando las plantas alcanzaron los 24 (plantación 2020), y 12 meses (plantación 2021) de edad (fecha I). A partir de entonces en ambos sitios los datos se registraron a los tres (fecha II) y seis meses (fecha III). Las variables consideradas en las tres ocasiones fueron el número de hojas (NH); la longitud de la espina terminal (LET) y longitud de la espina marginal (LEM) en mm; además de registrar en cm la altura total de la planta (ALTP); diámetro de roseta (DIAM), longitud (LH) y ancho (AH) de dos hojas ubicadas en

la parte media de la roseta, para lo que se empleó un vernier Manual trupper y una regla de 30 cm.

3.4.4 Análisis de datos

Para los análisis estadísticos se utilizó el software SAS® 9.4. Se evaluó la normalidad de las variables con las pruebas de Shapiro-Wilk y de Bartlett ($\alpha=0.05$). Las que no cumplieron con el supuesto de normalidad se transformaron con $\log(\sqrt{X})$ y \sqrt{X} . Para comparar las variables morfológicas en relación con los tratamientos y la interacción de tratamientos con el sitio se utilizó el PROC GLM, y se aplicó además una prueba de comparación de medias (Duncan, $\alpha=0.05$). Para el número de hojas se utilizó la prueba de Kruskal-Wallis ($\alpha=0.05$) mediante el procedimiento no paramétrico PROC NPAR1WAY.

Se calculó la tasa de crecimiento relativo (TCR), utilizando los valores de altura de la planta, mediante la fórmula adaptada por Moreno-Betancur y Cuartas-Hernández (2014). Se realizó la comparación de medias (Duncan, $\alpha=0.05$) con los datos originales. Para diferenciar el comportamiento en crecimiento, se graficaron las TCR por tratamiento en los meses evaluados.

$$TCR = \frac{x_2 - x_1}{Meses}$$

Donde X_2 : altura final; X_1 : altura inicial.

3.5 Resultados y discusión

3.5.1 Características de variables morfológicas

El análisis de varianza, mostró que existen diferencias estadísticas significativas en el crecimiento inicial de *Agave potatorum* por el efecto de los tratamientos de obras de conservación de humedad. Las variables morfológicas altura de la planta, diámetro de la roseta y longitud de la hoja mostraron diferencias altamente significativas entre las fechas de registro II y III. Mientras que, para el ancho de la hoja, longitud de la espina terminal y longitud de la espina marginal no hubo diferencias (Cuadro 2). Dicha respuesta se le podría atribuir a la diferencia en el tiempo de establecimiento y no necesariamente a la respuesta del tratamiento, ya que otros estudios han mostrado que con la implementación de zanjas para retención de humedad el efecto se da después de dos años en las plantaciones analizadas (Cotler *et al.*, 2015; Pizarro *et al.*, 2004). Además, el crecimiento de *Agave potatorum* no presentó diferencias significativas en altura de la planta a pesar de la aplicación de riego que garantizara humedad (Martínez-Ramírez *et al.*, 2012). Por otra parte, los procesos fisiológico y bioquímico son importantes para incrementar la longitud de hojas en condiciones de sequía edáfica, tal como se demostró en las respuestas de crecimiento en *Agave salmiana* y *Agave tequilana* (Sánchez *et al.*, 2004; Pimienta-Barrios *et al.*, 2005).

Cuadro 2. Análisis de varianza para las variables morfológicas con base en tratamientos aplicados y mediciones en diferentes fechas.

Cuadrados medios y significancia				
Altura de la planta[§]				
F.V	Gl	F1	F2	F3
Sitio	1	0.006 ^{ns}	0.0008 ^{ns}	0.0005 ^{ns}
Trat	2	0.008*	0.007**	0.006**
TratxSitio	2	0.008*	0.016**	0.017**
Error	294	0.002	0.001	0.001
Diámetro de roseta[§]				
Sitio	1	0.009 ^{ns}	0.072**	0.073**
Trat	2	0.005 ^{ns}	0.060**	0.042**
TratxSitio	2	0.015**	0.010 ^{ns}	0.011 ^{ns}
Error	294	0.002	0.004	0.005
Longitud de la hoja^{§§}				
Sitio	1	0.0002 ^{ns}	0.786**	0.670**
Trat	2	0.236 ^{ns}	0.609**	0.666**
TratxSitio	2	1.117**	0.493**	0.340**
Error	294	0.117	0.058	0.057

F.V= fuente de variación, Gl=grados de libertad, Trat=sistema de plantación, S=sitio, TratxSitio=interacción, F1, F2, F3=fechas, *=significativo ($p \leq 0.05$), **=altamente significativo ($p \leq 0.01$), ^{ns}=no significativo ($p > 0.05$), las variables fueron transformadas [§]log(\sqrt{X}) y ^{§§} \sqrt{X} .

El análisis de varianza no paramétrico de Kruskal-Wallis indicó que el número de hojas mostró diferencias significativas ($H=11.02$, $p=0.05$) entre los tratamientos durante la F1 de registro, en contraste, no se presentaron diferencias significativas en la F2 ($H=5.14$, $p=0.05$) ni en la F3 ($H=0.97$, $p=0.05$). Las hojas se despliegan conforme se da el crecimiento en altura, sin embargo, en otros experimentos se ha señalado que el mayor despliegue de hojas se da a los cinco años de edad (Martínez-Ramírez *et al.*, 2012). Mientras que Zúñiga-Estrada *et al* (2018) registraron que durante un año se despliegan tres hojas, pero conforme avanza el ciclo de la planta (formación de la piña) tiende a disminuir la producción de hojas.

3.5.2 Tasa de crecimiento relativo

La tasa de crecimiento relativo en altura de *Agave potatorum* no mostró diferencias significativas ($p>0.05$), durante los meses evaluados (Cuadro 3). Esta respuesta se le puede atribuir a los tratamientos aplicados a las plantas, al corto tiempo de evaluación del efecto de conservación de humedad, ya que el experimento transcurrió durante los meses de agosto a febrero, en que ocurren fuertes lluvias que mantuvo el suelo a capacidad de campo para las plantas. En diversos trabajos se ha demostrado que el desarrollo de la vegetación, al implementarse sistemas de obras de retención de humedad, depende en mayor medida de las condiciones del suelo y la topografía (terrenos $<20\%$ de pendiente)

(Cotler *et al.*, 2015; Reyes-Carrillo *et al.*, 2019). Además, el crecimiento de plantas con metabolismo CAM depende de la radiación solar y humedad, obteniéndose, por ejemplo, una mayor TCR en *Opuntia jaliscana* (0.022 ± 0.0006) y *Opuntia streptacantha* (0.023 ± 0.0007) (Romo-Campos *et al.*, 2013). Asimismo, en las plantas de *Agave salmiana* el crecimiento responde a la radiación solar directa, misma que podría acelerar la tasa de crecimiento en *Agave potatorum* una vez que se aclimate a las condiciones *in situ* (Pérez-Sánchez *et al.*, 2015, Ruedas *et al.*, 2000). En el presente trabajo, las mayores TCR en altura ocurrieron durante los meses de octubre y noviembre, y disminuyeron durante los meses de enero a febrero. Así también, durante los meses de septiembre a noviembre las plantas que cercanas a éstas se realizó la cepa de media luna, mostraron TCR de $0.367 \text{ cm mes}^{-1}$, que fueron significativamente mayores a los 0.20 cm mes^{-1} que las plantas situadas en lugares donde no se realizaron zanjas (Cuadro 3).

Cuadro 3. Tasa de crecimiento relativo (cm mes^{-1}) en altura en plantas de *Agave potatorum* durante seis meses en respuesta a la práctica obras de conservación de humedad.

	CML	BP	TES
Septiembre	0.367 ± 0.045^a	0.202 ± 0.02^b	0.201 ± 0.028^b
Octubre	0.379 ± 0.047^a	0.208 ± 0.03^b	0.207 ± 0.029^b
Noviembre	0.367 ± 0.045^a	0.202 ± 0.02^b	0.201 ± 0.028^b
Diciembre	0.192 ± 0.019^a	0.163 ± 0.01^a	0.151 ± 0.012^a

Enero	0.192±0.0195 ^a	0.163±0.01 ^a	0.151±0.012 ^a
Febrero	0.173±0.017 ^a	0.147±0.01 ^a	0.136±0.011 ^a

CML=cepa media luna, BP=bordo de piedra, TES=testigo, fila con la misma letra no son significativas (Duncan, $\alpha=0.05$). Media aritmética±error estándar.

En el comportamiento del crecimiento de las plantas con edades diferentes, se encontró la diferencia en su TCR de 0.10 cm a 0.24 cm entre los tratamientos durante los meses SEP, OCT y NOV, mientras que en los valores se mantuvieron en meses posteriores (DIC, ENE y FEB) (Figura 3). En tanto, los valores máximos de TCR se presentaron en las plantas de 12 meses de edad, lo cual podría estar relacionado al manejo previo al establecimiento y a la disponibilidad de humedad y nutrientes en el suelo al momento de la siembra. Por otra parte, el tratamiento cepas de media luna (CML) benefició relativamente al conservar la humedad para el crecimiento de *Agave potatorum*, obteniendo TRC de 0.46 cm mes⁻¹ y 0.48 cm mes⁻¹. Mientras que con el bordo de piedra (BP) se obtuvieron valores de 0.25 cm mes⁻¹ y 0.26 cm mes⁻¹. Por otro lado, en las plantas testigo, a la edad de 24 meses, sus valores fueron de 0.24 cm mes⁻¹ y 0.25 cm mes⁻¹. Sin embargo, se observa que los tratamientos de conservación de humedad y retención de suelo influenciaron poco en el crecimiento de las plantas.

La actividad fotosintética CAM tiene importancia en el crecimiento de las hojas y el tallo de plantas suculentas y además garantiza la supervivencia en condiciones ambientales desfavorables (Ortiz-Cano *et al.*, 2020). Asimismo, al analizar el patrón de crecimiento de plantas con arreglo en forma de roseta, en un estudio

de bromelias que son especies CAM, se observó que la transición de hojas viejas a hojas jóvenes sucede con la movilización de agua secándose las hojas viejas (Rodrigues *et al.*, 2016). Además, el ácido abscísico (ABA) en hojas jóvenes (*Arabidopsis thaliana*) tiene importancia como regulador del crecimiento y que conforma la arquitectura en roseta (Pantín *et al.*, 2013, Pantín *et al.*, 2012).

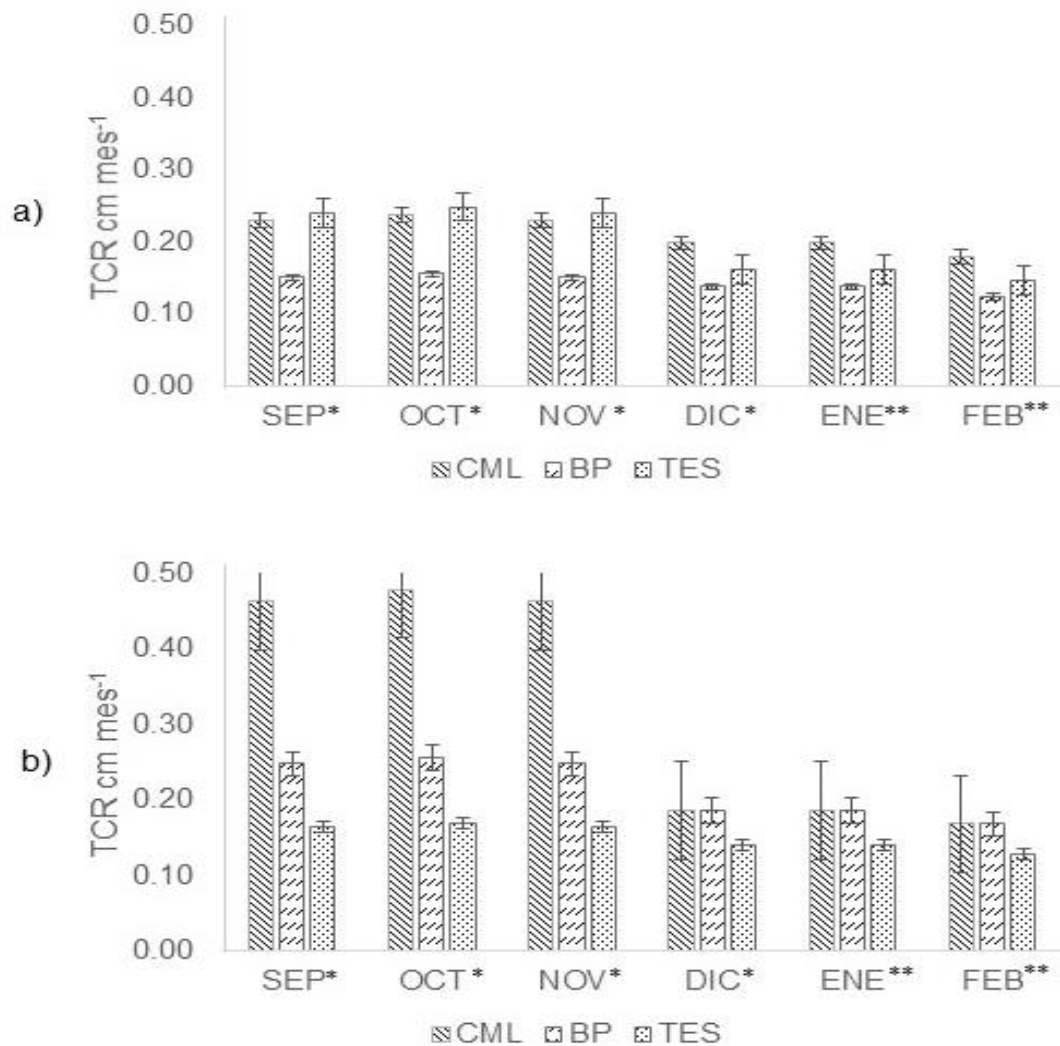


Figura 3. Tasa de crecimiento relativo (TCR) en altura de *Agave potatorum* con regeneración asistida. CML=cepa media luna, BP=bordo de piedra, Tes=testigo, *Año 2021, **Año 2022, a) Plantación de 2020 y b) Plantación de 2021.

Por otro lado, la TCR de *Agave potatorum* con regeneración natural mostró valores altos en DIC y ENE, con 0.33 cm mes^{-1} (Figura 4); dicho comportamiento podría asociarse a la fisiología y morfología de la planta, y al tiempo de exposición a la radiación solar. Sin embargo, esto contrasta con los resultados reportados por varios autores en donde el crecimiento en plantas de *Furcraea hezapetalo* bajo el sol directo incrementó en 87%, y en plantas de *Mammillaria magnimamma* las cuales mostraron mayor tasa de crecimiento con 100% de exposición a la luz solar, por lo que la magnitud de crecimiento no depende únicamente de la disponibilidad de humedad (Casierra-Posada *et al.*, 2017; Ruedas *et al.*, 2000).

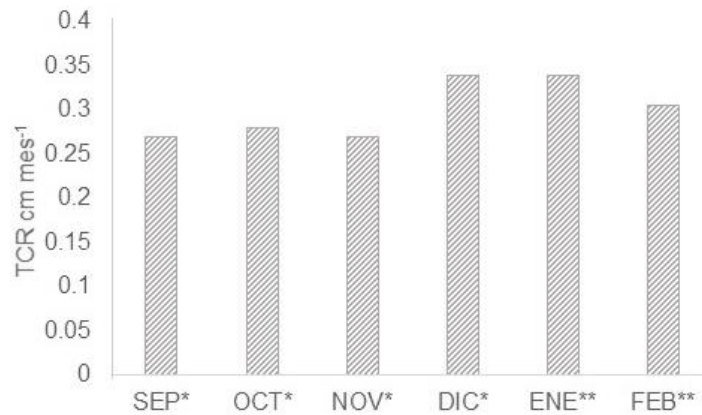


Figura 4. Tasa de crecimiento relativo (TCR) en altura de *Agave potatorum* con regeneración natural. *Año 2021 y **Año 2022.

3.6 Conclusiones

En dos parcelas en que se establecieron plantas de *Agave potatorum* producidas en vivero de 12 meses, y que se complementó con obras de conservación de humedad y retención de suelo, mayor porcentaje (95%) de plantas sobrevivió y alcanzaron la mayor altura y longitud de la hoja en las fechas de registro de datos, cuando se acompañaron con obras de conservación de suelo y agua, en comparación a plantas no acompañadas con obras de conservación. La tasa de crecimiento relativo en altura de la planta fue superior en individuos de 24 meses en comparación con los de 12 meses. Las plantas cultivadas en contraste con las de regeneración natural, se adaptaron de manera rápida a las condiciones ambientales del sitio.

3.7 Literatura citada

- Caballero C. M., J. L. Montes-Bernabé y M. E. Silva-Rivera. 2013. Innovación de un molino de agave cocido para la producción de mezcal. *Ciencias Técnicas Agropecuarias* 22: 45-49.
<https://www.redalyc.org/pdf/932/93231387008.pdf>
- Cabrera-Toledo, D., O., S Vargas-Ponce, L. Ascencio-Ramírez, M. Valadez-Sandoval, J. Pérez-Alquicira, J. Morales-Saavedra, y O. F. Huerta-Galván. 2020. Morphological and Genetic Variation in Monocultures, Forestry Systems and Wild Populations of *Agave maximiliana* of Western Mexico:

Implications for Its Conservation. *Frontiers in Plant Science* 11(817): 1-19.
doi:10.3389/fpls.2020.00817

Casierra-Posada, F., J. D. Cortés-Bayona, y J. Cutler. 2017. Effect of Iron Excess on Growth of Sisal Plants (*Furcraea hexapetala*). *Gesunde Pflanzen*. 69(3), 123-129.

Consejo Regular del Mezcal (CMR). 2020. El mezcal la cultura líquida de México. Oaxaca, México.

Colunga-GarcíaMarín P. I. C., A. Torres-García, U. C. J. Casas, S. Figueredo, A. Rangel-Landa, O. Delgado-Lemus, D. Vargas, D. Cabrera-Toledo, X. Zizumbo-Villarreal, L. E. Aguirre-Dugua, G. Eguiarte y G. Carrillo-Galván. 2017. Los agaves y las prácticas mesoamericanas de aprovechamiento, manejo y domesticación. En Casas A, Torres-Guevara J, Parra-Rondinel F. Domesticación en el Continente Americano. Pp. 273-308.

Cotler, H., S. Cram, S. Martínez-Trinidad y V. Bunge. 2015. Evaluación de prácticas de conservación de suelos forestales en México: caso de las zanjas trinchera. *Investigaciones Geográficas*, 6-18.
doi:10.14350/rig.47378.

Delgado-Lemus, A. M. 2008. Aprovechamiento y disponibilidad espacial de *Agave potatorum* (papalometl) en San Luis Atolotitlán, Puebla, México. Universidad Nacional Autónoma de México, México. Tesis maestría 102 p.

- Delgado-Lemus, A, I. Torres, J. Blancas, and A. Casas. 2014. Vulnerability and risk management of *Agave* species in the Tehuacán Valley, México. *Journal of Ethnobiology and Ethnomedicine*. 10(53): 53-67. DOI: 10.1186/1746-4269-10-53.
- Enríquez del Valle, J. R. 2008. La propagación y crecimiento de agaves. Fundación Produce Oaxaca, A. C. Instituto Tecnológico del Valle de Oaxaca. México. 46 p.
- Enríquez del Valle, J. R., S. E. Alcará-Vázquez, G. Rodríguez-Ortiz, M. E. Miguel-Luna, y C. M. Vázquez. 2016. Fertirriego en vivero a plantas de *Agave potatorum* Zucc micropropagadas-aclimatizadas. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas* 7 (5): 1167-1177.
- García-Mendoza, A. J. 2010. Revisión taxonómica del complejo *Agave potatorum* Zucc. (Agavaceae). Nuevos taxa y neotificación. *Acta Botánica Mexicana*. 91: 71-93.
- Ignacio-Torres, A. C., A. Delgado-Lemus, S. Rangel-Landa. 2013. Aprovechamiento, demografía y establecimiento de *Agave potatorum* en el Valle de Tehuacán, México: Aportes ecológicos y etnobiológicos para su manejo sustentable. *Zonas Áridas*. 15(1): 92-109.
- Lara-Ávila, J. P. y A. G. Alpuche-Solís. 2016. Análisis de la diversidad genética de agaves mezcaleros del centro de México. *Revista Fitotecnia Mexicana*. 39(3): 323-330. <https://doi.org/10.35196/rfm.2016.3.323-330>

- Martínez-Ramírez, S., A. Trinidad-Santos, C. Robles, A. Galvis-Spinola, T. M. Hernández-Mendoza, J. A. Santizo-Rincón y E. C. Pedro-Santos. 2012. Crecimiento y sólidos solubles de *Agave potatorum* Zucc. inducidos por riego y fertilización. *Revista Fitotecnia Mexicana*. 35(1): 61-68.
- Moreno-Betancur, D. J., S. E. Cuartas-Hernández. 2014. Supervivencia y crecimiento de plántulas de tres especies arbóreas en áreas de bosque montano andino degradadas por ganadería en Colombia. *Acta Biológica Colombiana*. 20(2): 85-10. doi: <http://dx.doi.org/10.15446/abc.v20n2.46057>
- Muñoz, F. H. J., M. J. García, A. V. Coria, A. H. Hernández y R. J. Hernández. 2014. Selección de plantas madre de *K Trel et Berg* en Axaxacualco Guerrero, México. *Foresta Veracruzana*. 16(1): 1-8.
- Ortiz-Cano, H., J. A. Hernández-Herrera, N. C. Hansen, S. L. Petersen, M. T. Searcy, R. Mata-González, T. Cervantes-Mendivil, A. Villanueva-Morales, P. M. Park y J. R. Stewart. 2020. Pre-Columbian Rock Mulching as a Strategy for Modern Agave Cultivation in Arid Marginal Lands. *Frontiers in Agronomy*, 10 (2): 1 -16.
- Pantin F., J. Renaud, F. Barbier, A. Vavasseur, D. Le Thiec, C. Rose, T. Barlac, S. Casson, D. H. McLachlan, A. M. Hetherington, B. Muller and T. Simonneau. 2013. Developmental priming of stomatal sensitivity to abscisic acid by leaf microclimate. *Current Biology*. 23(18):1805–1811. doi:10.1016/j.cub.2013.07.050

- Pantin F., T. Simonneau, B. Muller. 2012. Coming of leaf age: control of growth by hydraulics and metabolics during leaf ontogeny. *New Phytologist*. 196: 349–366. Doi: 10.1111/j.1469-8137.2012.04273.x
- Pérez-Sánchez, R. M., J. Flores, E. Jurado and C. González-Salvatierra. 2015. Growth and ecophysiology of succulent seedlings under the protection of nurse plants in the Southern Chihuahuan Desert. *Ecosphere*. 6(3): 36 <https://doi.org/10.1890/ES14-00408.1>
- Pimienta-Barrios E., J. Zañudo-Hernández, P. S. Nobel y J. García-Galindo. 2005. Respuesta fisiológica a factores ambientales del agave azul (*Agave tequilana* Weber). *Scientía-CUCBA*. 7: 85-97.
- Pizarro, T. R., V. J. P. Flores, P. C. Sangüesa y A. E. Martínez. 2004. Monografía de zanjas de infiltración. Universidad de Talca, Bosques de Chile, Terranova, Bosque Villanueva Lrda. Chile.
- Rangel-Landa S, A. Casas y P. Dávila. 2015. Facilitation of *Agave potatorum* Zucc.: An ecological approach for assisted population recovery. *Forest Ecology and Management*. 347: 57-74. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2015.03.003>
- Reyes-Carrillo, A., M. R. Martínez-Menez†, E. Rubio-Granados, E. García-Moya y A. A. Exebio-García. 2019. Impacto del sistema zanja bordo sobre la cobertura vegetal en pastizales de la región Mixteca, estado de Oaxaca.

<https://doi.org/10.28940/terra.v37i3.327>

Reynoso-Santos, R., A. J. García-Mendoza, W. López-Baéz, A. López-Luna, P. Cadena Iñiguez, M. A. Pérez-Ferrera y M. H. Domínguez Gutiérrez. 2012. Identificación taxonómica de agaves (*Agave spp.*) utilizados para la elaboración del licor comiteco en Chiapas, México. *Agroproductividad*. 5(4): 9-17. <https://revista-agroproductividad.org/index.php/agroproductividad/article/view/408>

Rodrigues, M. A., L. Hamachi, P. T. Mito, E. Purgatto and H. Mercier. 2016. Implications of leaf ontogeny on drought-induced gradients of CAM expression and ABA levels in rosettes of the epiphytic tank bromeliad *Guzmania monostachia*. *Plant Physiology and Biochemistry*. 108: 400–411. doi:10.1016/j.plaphy.2016.08.010

Romo-Campos, R., J. L. Flores-Flores, J. Flores y G. Álvarez-Fuentes. 2013. Factores abióticos involucrados en la facilitación entre leñosas y suculentas en el altiplano mexicano. *Botanical Sciences*. 91(3): 319-333. http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2007-42982013000300007&lng=es&tlng=es

Ruedas, M., T. Valverde y A. S. Castillo. 2000. Respuesta germinativa y crecimiento de plántulas de *Mannillaria magnimamma* (Cactaceae) bajo diferentes condiciones ambientales. *Boletín de la Sociedad Botánica de México*. 66: 25-35. DOI: 10.17129/botsci.1608

- Sánchez, U. A. B., C. B. Peña, J. R. Aguirre, C. Trejo y E. Cárdenas. 2004. Efectos del potencial de agua en el crecimiento radical de plántulas de *Agave salmiana* Otto. Ex Salm-Dyck. *Interciencia* 29: 626-231.
- Silva S. y L., M. Caballero 2004. Desarrollo de tecnologías adecuadas para el proceso de producción del mezcal en el Estado de Oaxaca, Premio a la investigación en el IPN, México.
- Zúñiga-Estrada, L., E. Rosales-Robles, M. de J. Yáñez-Morales y C. Jacques-Hernández. 2018. Características y productividad de una planta MAC, *Agave tequilana* desarrollada con fertigación en Tamaulipas, México. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*. 9(3): 553-564.

CAPÍTULO IV

DISTRIBUCIÓN, REPRODUCCIÓN Y CONSERVACIÓN DE *Agave*

5.1 Resumen

El género *Agave* representa una alta riqueza dentro de la composición florística mexicana. Estas plantas presentan adaptaciones morfológicas y fisiológicas que le permiten el uso eficiente del agua para prosperar en condiciones con precipitación baja, escasez de agua y temperaturas altas. Por lo que los agaves se extienden en zonas áridas, semiáridas, climas templados y subhúmedos, en donde varía el número de especies. Por su diversidad de especies de agaves, Puebla y Oaxaca representan el 75% de esta diversidad para México, ya que son las entidades con mayor representatividad. Por otra parte, el mecanismo de reproducción es de gran importancia para mantener y conservar la población silvestre y cultivada de agave, estas son mediante semillas, hijuelos, bulbillos y propagación *in vitro*. El aprovechamiento de agave silvestre como materia prima es constante por lo que su permanencia se podría garantizar con las técnicas y prácticas de conservación. Se documentó en diferentes estudios las generalidades del agave para tolerar las condiciones de estrés de sequía y temperatura, así como también las estrategias que podrían garantizar el aprovechamiento sustentable.

Palabras clave: *Agave*, conservación, diversidad, morfología, semillas.

4.2 Abstract

The genus *Agave* represents a high richness within the Mexican floristic composition. These plants present morphological and physiological adaptations that allow the efficient use of water to thrive in conditions with low rainfall, water scarcity and high temperatures. Therefore, agaves are found in arid, semi-arid, temperate and sub-humid climates, where the number of species varies. In terms of agave species diversity, Puebla and Oaxaca represent 75% of this diversity for Mexico, as they are the entities with the greatest representation. Moreover, the reproduction mechanism is of great importance to maintain and conserve the wild and cultivated agave population; these are by means of seeds, hyjuelos, bulbils and in vitro propagation. The use of wild agave as raw material is constant, so its permanence could be guaranteed with conservation techniques and practices. Different studies have documented the general characteristics of agave to tolerate drought and temperature stress conditions, as well as the strategies that could guarantee sustainable use.

Key words: *Agave*, conservation, diversity, morphology, seeds.

4.3 Introducción

En las regiones áridas y semiáridas de México se observa gran riqueza y diversidad de especies del género *Agave*, ya que sus especies tienen una capacidad de resiliencia, gracias a sus propiedades genéticas, mecanismos de producción y la capacidad de dispersión para adaptarse y sobrevivir en condiciones desfavorables de suelo, clima, temperatura y precipitación (Avendaño-Arrazate *et al.*, 2015). Algunas especies silvestres de este género alcanzan su madurez sexual entre 7 a 15 años (*Agave cupreata* y *Agave potatorum*), mientras que las cultivadas alcanzan madurez de 6 a 8 años (*Agave angustifolia*), una vez que florecen y producen semillas su ciclo de vida termina (Avendaño-Arrazate *et al.*, 2015; Colunga-GarcíaMarín *et al.*, 2017).

Actualmente, los agaves han tomado importancia gracias a su uso para la elaboración de bebidas fermentadas y destiladas, tal es el caso del mezcal y el tequila. Para la elaboración del mezcal se utilizan diferentes especies de agaves, dentro de las más comunes sobresalen el *Agave angustifolia*, *Agave cupreata*, *Agave potatorum* y *Agave inaequidens* (Consejo Regulador del Mezcal 2020). El aprovechamiento de las plantas se realiza en su última etapa de vida, cuando emite su escapo floral, lo que trae consecuencias negativas dentro de la población silvestre, ya que los campesinos no priorizan en dejar plantas para la producción semillas, la germinación y el establecimiento de nuevos individuos de

forma silvestre. Mientras, la propagación por hijuelos o bulbillos, es la más practicada y domesticada por el hombre.

El objetivo de este trabajo fue describir las principales características del agave y su adaptación a los principales factores ambientales estresantes por ser considerados como plantas CAM que son más eficientes para captar, almacenar y usar el agua en comparación a plantas C3 Y C4. Además, integrar algunos de los aspectos más importantes de los estudios realizados sobre la reproducción sexual, y proporcionar alternativas para su aprovechamiento y conservación.

4.4 Generalidades del *Agave*

El género *Agave* fue descrito por Linneo en 1753. Diversos autores lo ubican como un grupo de plantas del orden Asparagales, y se encuentran en la familia Agavaceae (Eguiarte *et al.*, 2013; Flores-Abreu *et al.*, 2019; García-Mendoza, 2019), son conocidos comúnmente como magueyes. Los agaves son plantas monocárpicas, tolerantes a sequía, a suelos pobres, salinos y a temperaturas altas, debido a adaptaciones morfológicas como la succulencia de las hojas, cutículas gruesas con presencia de cera, hojas en disposición de rosetas, la acumulación de hojas en la base de la planta, bordes con espinas y sus raíces ramificadas fibrosa y superficiales las cuales les permiten aprovechar la poca cantidad de agua (García-Mendoza y Franco-Martínez, 2018; Gschaedler *et al.*, 2017; Stewart, 2015; Tamayo-Ordóñez *et al.*, 2018). Una vez que emiten su

escapo floral empiezan a producirse inflorescencias a mitad del tallo, las cuales son polinizadas por murciélagos, colibríes, abejas, avispas, y otros insectos (Eguiarte *et al.*, 2000; Eguiarte *et al.*, 2013; Slauson, 2001,). Sus frutos son en forma de cápsula que contiene semillas aplanadas de color negro (Gentry, 1982, Esparza-Ibarra *et al.*, 2015).

Los agaves realizan el proceso de la fotosíntesis llamado Metabolismo del Ácido de las Crasuláceas (CAM), el cual se realiza en las hojas suculentas y se caracteriza por abrir los estomas para el intercambio de gases CO₂ y O₂ en la noche para evitar la pérdida de agua, el CO₂ fijado es almacenado en sus vacuolas en forma de ácido málico, para ser utilizado al día siguiente en el ciclo de Calvin, y dar como resultado la producción de azúcares (Barrera *et al.*, 2014; García-Moya *et al.*, 2011; Nava-Cruz, 2014, Luna-Luna *et al.*, 2017). Asimismo, las especies de este género son utilizadas con diversos fines, las hojas de especies *Agave fourcroydes*, *Agave sisalana* y *Agave angustifolia* poseen fibras es posible usarla en la obtención de cuerdas, canastas y sacos (Espinoza, 2015, Barrientos-Rivera *et al.*, 2020), los tallos y bases de hojas se almacenan carbohidratos la cual es utilizada para la elaboración de mezcal y tequila empleando especies *Agave angustifolia*, *Agave tequilana*, *Agave potatorum*, *Agave cupreata*, *Agave salmiana*, *Agave karwinskii* y *Agave americana* (Colunga-GarcíaMarín *et al.*, 2017; Hernández, 2018), los escapos florales y hojas de *Agave salmiana*, *Agave marmorata* y *Agave potatorum* suelen utilizarse para la construcción de viviendas, además los agaves producen sapogeninas

esteroidales las cuales tienen importancia farmacéutica siendo utilizada *Agave fourcroydes*, *Agave tequilana*, *Agave salmiana*, *Agave celsii*, *Agave lechuguilla*, *Agave mapisaga* (Ayón, 2007).

A pesar de que los agaves se consideran tolerantes a la escasez de agua y a temperaturas extremas, en su etapa de plántula, es decir, cuando apenas empiezan a crecer sus hojas, espinas y raíces, su fisiología no está desarrollada para regular dichos cambios, por lo que en campo es común que se encuentren con la presencia de plantas que se denominan nodrizas, que les ayudan a garantizar su sobrevivencia y crecimiento, debido a que atenúan la radiación directa al suelo y planta por lo que se aminora la evapotranspiración y se crean condiciones favorables para que la planta acumule materia orgánica (Valiente-Banuet *et al.*, 2006). Por ejemplo, se reporta la presencia de *Agave deserti* bajo dosel de *Hilaria rigida*, alcanzando la sobrevivencia a pesar de altas temperaturas, siendo la clave del éxito el sistema radical de la planta nodriza que realiza la captación de agua (Augusto and Park 1988).

4.4.1 Adaptaciones al estrés: sequía y temperatura

Las plantas de agave evitan daños fisiológicos usando un metabolismo variante de la fotosíntesis llamado Metabolismo Ácido de las Crasuláceas (CAM) el cual consiste en la apertura de sus estomas por la noche, favoreciendo la captura CO₂ y minimizando la pérdida de agua por transpiración, por lo que las plantas están

adaptadas para sobrevivir en ambientes donde se presentan periodos prolongados de sequía (Holtum y Winter, 2014; Matiz *et al.*, 2013; Pimienta-Barrios *et al.*, 2005; Stewart, 2015). Al analizar la disponibilidad de humedad para el crecimiento, biomasa, el grosor foliar y el contenido de prolina se reporta que potenciales hídricos de -0.7 a -3.5 MPa afectaron a *Agave americana* var. *marginata*, *Agave angustifolia* subsp. *tequilana*, *Agave asperrima*, *Agave cupreata*, *Agave durangensis* y *Agave salmiana*. Sin embargo, aquellos individuos que toleraron la escasez de agua, se distinguieron al mantener el número de hojas y la cobertura de la planta (*Agave angustifolia* subsp. *tequilana*, *Agave durangensis*, *Agave lechuguilla* y *Agave salmiana*), con lo cual se concluye que las respuestas fisiológicas y bioquímicas son variadas a las condiciones ambientales, en tanto que las plantas jóvenes de agave son capaces de sobrevivir hasta 14 meses a condiciones de sequía (Ramírez-Tobías *et al.*, 2014; Gschaedler *et al.*, 2017).

El efecto del déficit prolongado de agua en el crecimiento y desarrollo de plantas jóvenes de agave, mediante el experimento de implementación de riego y suspensión en *Agave salmiana* Otto ex Salm-Dyck de 6 meses de edad, mostró que al no realizarse el riego durante 30 días, la biomasa de la raíz y longitud de las hojas se incrementó, si bien en un tercer periodo sin riego se detuvo el crecimiento pero incrementó la clorofila; asimismo, refieren que ocurrió la acumulación de prolina en la raíz que aumenta la capacidad de la raíz para

absorber agua ésta es más escasa en el suelo (Peña-Valdivia and Sánchez-Urdaneta, 2009; Ruíz *et al.*, 2007).

Los agaves varían sus niveles de asimilación de CO₂ en función de altas y bajas temperaturas. En *Agave tequilana* Weber la temperatura promedio de 25 °C de día y 17 °C de noche, mostraron que el valor de asimilación neta diaria de CO₂ fue de 664 mmol m⁻² d⁻¹, mientras que en *Agave angustifolia* Haw la asimilación de CO₂ disminuye a temperaturas mayores de 20 °C; sin embargo, en condiciones enriquecidas de 800 ppm de CO₂, se demostró que la fijación de CO₂ incrementa en 62% (Holtum y Winter, 2014; Pimienta-Barrios *et al.*, 2001). Otra de las características para evitar el calentamiento de la lámina foliar es la importancia de la filotaxia y orientación de las hojas, ya que la sombra de unas hojas sobre otras, les favorece, así como también evita la evapotranspiración durante los periodos de sequía (García-Mendoza, 2007).

4.5 Diversidad y distribución de agaves en México

El género *Agave* se distribuye desde del sur de los Estados Unidos, América Central, el Caribe, y el norte de América del sur. Se trata de un género “megadiverso”, debido a que sus especies se localizan en diferentes hábitats, desde matorral xerófilo, desierto, bosque de coníferas y encinos, bosque tropical caducifolio, hasta bosque espinoso, pastizales, bosque de niebla, y bosque subcaducifolio, por lo que México se considera como el centro de origen de la

familia Agavaceae, actualmente con 159 especies (75%), de ellas 129 son endémicas (García, 2002; García-Mendoza *et al.*, 2019). El norte y centro del país son las regiones en donde se documentó un mayor número de especies, mientras que en los estados del sureste (Tabasco, Campeche y Quintana Roo) el número de especies disminuye por las condiciones de alta humedad, dado que las plantas son características de zonas áridas y semiáridas (Pérez *et al.*, 2016; García-Mendoza, 2007). La distribución de agaves en Áreas Naturales Protegidas (ANP), fue contabilizada por entidad (Cuadro 1), dando como resultado que Oaxaca ocupa el primer lugar con 52 especies, en años recientes aumentaron a 58 especies de las cuales 13 son endémicas (Golubov *et al.*, 2007; Martínez-Jiménez, 2019).

Cuadro 1. Diversidad de especies de agaves entre las entidades federativas

Entidad federativa	Especies de agave	Áreas Naturales Protegidas (ANP)
Oaxaca	52	Tehuacán-Cuicatlán (RB) Lagunas de Chacahua (PN) Huatulco (PN) Benito Juárez (PN) Yagul (MN)
Puebla	43	Tehuacán-Cuicatlán (RB) Iztaccíhuatl-Popocatépetl (PN)

		La Malinche (PN)
		Pico de Orizaba (PN)
Durango	43	La Michilia (RB)
		Mapimí (RB)
Sonora	40	El Pinacate y Gran Desierto de Altar (RB)
		Alto Golfo de California (RB)
		Delta del Río Colorado (RB)
		Sierra de Álamos-Río Cuchujaqui
		Isla San Pedro Mártir (RB)
Jalisco	40	Sierra de Manantlán (RB)
		La Primavera (APFF)
		Sierra De Quila
		Chamela-Cuixmala (RB)
Coahuila	35	Maderas Del Carmen (APFF)
		Mapimí (RB)
		Cuatrociénegas (APFF)
		Los Novillos (PN)
Chihuahua	34	Tutuaca (APFF)
		Cañón de Santa Elena (APFF)
		Papigochic (APFF)
		Mapimí (RB)
		Campo Verde (APFF)

		Cascada de Bassaseachic (PN)
		Cumbres de Majalca (PN)
San Luis	33	Gogorrón (PN)
Potosí		Sierra de Abra Tanchipa (RB)
		Sierra de Álvarez (APFF)
		Sierra la Mojonera (APFF)
		El Potosí (PN)
Nuevo	29	Cumbres de Monterrey (PN)
León		Cerro de la Silla (MN)
Zacatecas	29	Sierra de Órganos (PN)
Hidalgo	27	Barranca de Metztitlán (RB)
		Los Mármoles (PN)
		El Chico (PN)
		Tula (PN)

Fuente: Inventarios de Agavaceae (Golubov *et al.*, 2007).

Las exploraciones en poblaciones de agaves silvestres en Oaxaca se han intensificado, siendo el *Agave potatorum* el más reportado por ser la principal especie utilizada en la elaboración del mezcal artesanal; que se distribuye en un intervalo altitudinal entre 1240 m 2400 m, encontrándose en la Sierra Sur, Valles Centrales y la Mixteca, formando parte de la vegetación de bosque de encino (Gutiérrez-Hernández *et al.*, 2020; Martínez-Ramírez *et al.*, 2014). En el estudio de la diversidad de agave realizado en San Miguel Tilquiapam, Ocotlán Oaxaca,

se identificaron las siguientes especies: *Agave marmorata* Roezl., *Agave karwinski*, *Agave potatorum*, *Agave americana* L., y *Agave convallis* Trel, las cuales están restringidas a un determinado rango altitudinal que va de 1620 m a 2035 m, debido a la estructura del suelo, topografía y clima (León-Vázquez *et al.*, 2013). De igual forma, en la documentación de agaves en Sola de Vega, Oaxaca se identificó que para la producción del mezcal se utilizan diversas especies silvestres y cultivadas que son encontradas en la región (Martínez-Jiménez *et al.*, 2019). Se ha demostrado que en Oaxaca y Puebla están distribuidas especies endémicas a determinadas rangos altitudinales estas son: *Agave lyobaa* García-Mend. & S. Franco, sp. nov, de 1550 a 1900 m, *Agave gypsicola* García-Mend. & D. Sandoval, sp. nov se desarrolla de 1350 a 1600 m, *Agave quiotepecensis* García-Mend. & S. Franco, sp. nov. de 525 a 845 m, y *Agave megalodonta* García-Mend. & D. Sandoval, sp. nov localizado de 1000 a 1600 m (García-Mendoza *et al.*, 2019).

En Puebla, las especies de *Agave* están distribuidas al sur del estado, en las regiones de la Mixteca, Tehuacán y Sierra Negra, y entre las características ambientales asociadas a estas regiones la temperatura es determinante, ya que en promedio es de 29.5 °C y la máxima de 40 °C, mientras que, la precipitación oscila de 68 mm a 727 mm (Saldaña, 2022; Scheinvar, 2018). La diversidad climática y las características geográficas han favorecido la composición de vegetación, lo que ha permitido la proliferación de agaves en el estado de Michoacán, en donde se registraron 23 especies de agaves, teniendo diversidad

y gran potencial en la parte Occidental (Hernández *et al.*, 2007). En Jalisco, a través del inventario enfocado sobre el género *Agave*, se citan ocho especies: *Agave cupreata* Trel, *Agave hookeri* Jalicobi, *Agave inaequidens* K. Koch, *Agave filifera* Salm-Dyck, *Agave salmiana* y *Agave angustifolia*, *Agave schidigera* Lem y *Agave tequilana*; en un estudio sobre diversidad de condiciones de riesgo y prácticas de manejo, la especie de mayor uso es *Agave inaequidens* para la producción de mezcal, y también se realizan prácticas de selección de agaves para la producción de semillas, propagación en vivero y establecimiento en campo (Figueredo *et al.*, 2014; Torres *et al.*, 2015).

4.6 Reproducción de agaves

4.6.1 Reproducción sexual

La reproducción sexual de agaves es de tipo monocárpico, es decir, las plantas mueren después de reproducirse. La producción de frutos y semillas, ocurre en las inflorescencias paniculadas mediante la polinización realizada por polinizadores primarios, los murciélagos nectarívoros de las especies *Leptonycteris yerbabuena*, *Leptonycteris nivalis*, *Leptonycteris curasoae*, *Choeronycteris mexicana* y *Glossophaga sp*, mientras que los polinizadores secundarios se considera a polillas o esfíngidos *Erinnyis ello* y la abeja *Apis mellifera*, así como también los colibríes (García-Mendoza 2007, Trejo-Salazar *et al.*, 2015). Según la especie, el agave tarda más de 5 años para la emisión del

escapo floral, una vez que la planta alcanza la madurez esta adelgaza su centro provocando la disminución de azúcares, para la salida del qurote y conforme transcurre su crecimiento en altura a la mitad superior de este qurote desarrollan los brazos que sostienen a los racimos de flores que son polinizadas para la formación de frutos y semillas.

El fruto es una cápsula que aloja entre trescientos y dos mil semillas según la especie, si bien esto no garantiza que todas germinen, debido a que muchas son vanas y no viables, además de que éstas pueden ser comidas por animales como roedores y hormigas, y la flor forma parte de la alimentación de ganado caprino e incluso el propio ser humano lo consume; además, suele ocurrir la dispersión de las semillas y caer en rocas y sitios con condiciones desfavorables, obteniéndose muy baja geminación y en consecuencia por la falta de agua, pisoteos y consumo por ganado, se disminuye la sobrevivencia de plantas silvestres (Eguiarte *et al.*, 2000; García-Mendoza 2007; Ignacio *et al.*, 2013; Illsley-Granich *et al.*, 2018; Rangel-Landa, 2015; Vázquez-Díaz *et al.*, 2011). Es bien sabido que los agaves tienen etapas de reproducción que comprenden, la germinación de la semilla, establecimiento de la plántula, crecimiento vegetativo, liberación del qurote, floración, fructificación y muerte (García-Mendoza, 2010; Ramírez-Tobías *et al.*, 2012).

Para la germinación de semillas son importantes las características fisiológicas, bioquímicas y su reacción a las condiciones de humedad en el suelo y la

temperatura ambiente (Peña-Valdivia *et al.*, 2013). Además, se involucran mecanismos metabólicos y morfogenéticos que se resumen en fases: I. La absorción de agua por imbibición, causando su hinchamiento y la ruptura final de la testa; II. Inicio de la actividad enzimática y del metabolismo respiratorio, translocación y asimilación de las reservas alimentarias en las regiones en crecimiento del embrión, y III. Elongación del embrión y ruptura de la testa a través de la cual se observa la salida de radícula (Suárez y Melgarano, 2010). Por otra parte, la cantidad de reservas (carbohidratos, proteínas y humedad) de las semillas determina su potencial de germinar (Doria, 2010, Monroy-Vázquez *et al.*, 2017).

Datos experimentales de germinación de semillas de agave, han mostrado que para el *Agave potatorum* la germinación de semillas dependió directamente de la concentración de lípidos, proteínas y humedad de las semillas, para semillas recolectadas en poblaciones silvestre de agaves en la Sierra Sur, la Mixteca y los Valles Centrales del estado de Oaxaca (Gutiérrez-Hernández *et al.*, 2020). Es importante mencionar que el resguardar semillas por largo tiempo suele disminuir dichas reservas, y esto a su vez genera bajo porcentaje de germinación (Carlos *et al.*, 2019). La germinación dentro de las áreas silvestres, muestran un alto porcentaje bajo cobertura de *Dodonaea viscosa*, que funge como cobertura biótica (arbustos), mientras que en la cobertura abiótica (rocas), se obtuvo menor índice de germinación (Candia-Acosta *et al.*, 2019). De los factores climáticos depende el éxito de la germinación (Cuadro 2).

Cuadro 2. Germinación de especies de agaves (Temperatura de germinación (TG), porcentaje de germinación (PG), temperatura de germinación máxima (TGM)).

Especie	Nombre común	TG (°C)	PG (%)	TGM (°C)	Referencias
<i>Agave americana</i>	Maguey blanco	25	85	23	(Pritchard & Miller 2017; Ramírez-Tobías <i>et al.</i> , 2012, 2014)
<i>Agave angustifolia</i>	Maguey espadín	30	25	30	(Flores <i>et al.</i> , 2016, Hernández-Castro <i>et al.</i> , 2022; Niño Vázquez, 2013, Ramírez-Tobías <i>et al.</i> , 2012; Ramírez-Tobías <i>et al.</i> , 2016)
<i>Agave mapisaga</i>	Maguey manso	30	75	30	(Niño Vázquez, 2013, Ramírez-Tobías <i>et al.</i> , 2016)
<i>Agave marmorata</i>	Maguey tepeztate	25	100	Nd	Godínez-Álvarez <i>et al.</i> , 2012
<i>Agave salmiana</i>	Maguey pulquero	40	83	25	(Peña-Valdivia <i>et al.</i> , 2006; Pérez-Sánchez <i>et</i>

4.6.2 Reproducción asexual

La reproducción asexual ocurre a partir de tallos, raíces, hojas y de la inflorescencia, obteniéndose clones. La primera forma de reproducirse es por hijuelos o rizomas, los cuales se desarrollan en la base de la planta madre mediante estolones que liberan raíces y con el tiempo crecen de manera independiente. Esta propagación es la más utilizada en agaves, porque conserva las características genéticas de la planta madre, y el desarrollo de la planta es más rápido y vigoroso.

Otra forma de reproducción asexual es mediante bulbillos, los cuales se dan en la inflorescencia; los bulbillos desarrollan a partir de yemas adventicias que, después de un determinado tiempo se tiene una nueva planta en la que se observan las iniciales de raíz y entonces al desprenderse de la rama caen al suelo e inician su desarrollo (Duque, 2013; García-Mendoza, 2007). Por otro lado, con el avance de la tecnología se hace presente la micropropagación *in vitro* que consiste en el cultivo de partes seleccionadas (explantes) en un medio de cultivo compuesto de macro y micronutrientes, reguladores de crecimiento y condiciones óptimas de temperatura y luz (Duque, 2013). Algunas de las ventajas de esta propagación son la transmisión genética “intacta”, mantenimiento del vástago de

la planta madre, rápida proliferación, colonización y desarrollo para alcanzar la madurez sexual, y la multiplicación vegetativa en ambientes limitados.

4.6.3 Crecimiento y desarrollo

El crecimiento y desarrollo de las plantas está influenciado por la interacción del ambiente abiótico y biótico (Martínez-Ramírez *et al.* 2014), así como también por un conjunto de elementos presentes en el suelo y por los procesos físicos, químicos y ecológicos. Por ello, la importancia de los hongos micorrizógenos arbusculares, al estar en simbiosis con las plantas, ya que éstos ayudan a la captación y absorción de nutrimentos escasos y poco móviles en el suelo como el fósforo, nitrógeno, cobre, zinc y hierro, y a cambio reciben carbohidratos y lípidos (Reyrd-Jaramillo *et al.*, 2019). El agave crece en suelos de tipo luvisol, vertisol y feozem, los cuales presentan deficiencias nutrimentales causando problemas de acidez por el exceso de manganeso (Mn) y hierro (Fe), que afecta el crecimiento y desarrollo de *Agave tequilana* en cultivo, por lo que se sugiere la práctica de encalado (Álvarez-Sánchez *et al.*, 2010).

Los suelos con textura franco-arcillosa o franco-arenosa, y terrenos con alta pendiente favorecen la adaptación de agaves. En el caso del *Agave tequilana* Weber Var. Azul, el cual crece en suelos delgados, no muy fértiles (Arreola *et al.*, 2020). Mientras, el *Agave potatorum* predominan en suelos arenosos derivados de rocas calizas, y la radiación solar es importante para la concentración de

azúcares en la planta (Martínez-Ramírez y Bautista-Sánchez, 2013). La diversidad de organismos procariotas en *Agave* aumenta su abundancia en condiciones de sequía, estos son encontrados en la endosfera de la raíz e impactan directamente en la salud de las plantas y la adaptación al estrés ambiental (Desgarenes *et al.*, 2014). El comportamiento de las comunidades microbianas asociadas a la rizosfera ha demostrado que éstas son promotores del crecimiento de la planta y ayudan a ser tolerantes a la sequía (Coleman-Derr *et al.*, 2015).

4.7 Aprovechamiento y conservación de agave

Los agaves han sido domesticados por el hombre desde hace 10 mil años debido a su diversificación de usos, y actualmente son de gran importancia para la elaboración de bebidas destiladas (tequila y mezcal). Debido al auge de dichas bebidas en mercados local, nacional e internacional, se incrementó la producción, lo que trajo aumentos en la demanda de materia prima (piña de agave), y por consiguiente, se ejerce impacto negativo sobre las poblaciones de agaves silvestres de distintas especies y al medio ambiente. La contribución de las especies de maguey a la producción de mezcal en el estado de Oaxaca, se presenta en el Cuadro 3; se observa que los magueyes silvestres contribuyen con el 14.2% y para los cultivados constituyen el mayor porcentaje, principalmente de *Agave angustifolia* (Cuadro 3).

Cuadro 3. Especies de magueyes utilizadas para la producción de mezcal en el año 2019.

Especie	Nombre común	Litros	Porcentaje
<i>Agave angustifolia</i>	Maguey espadín	6,130,443	85.8
<i>Agave potatorum</i>	Maguey tobalá	164,336	2.3
<i>Agave durangensis</i>	Maguey cenizo	150,046	2.1
<i>Agave cupreata</i>	Maguey verde	128,611	1.8
<i>Agave marmorata</i>	Maguey tepeztate	71,450	1.0
<i>Agave karwinskii</i>	Maguey cuishe	71,450	1.0
<i>Agave tequilana</i>	Maguey azul	64,305	0.9
<i>Agave cupreata</i>	Maguey papalote	64,305	0.9
<i>Agave spp</i>	Magueyes distintos	300,092	4.2

Fuente. Elaboración con datos de CRM 2020

Entre los impactos de mayor frecuencia encontrados sobre las poblaciones silvestres de agave, se señalan que la regeneración natural disminuyó, hay presencia de deforestación y se tiene la pérdida de recurso genético de la especie (Colunga-GarcíaMarín *et al.*, 2011; Eguiarte *et al.*, 2013). En los diferentes estudios de ecología, genética y cosecha de *Agave potatorum* y *Agave cupreata*, los cuáles se han considerado como los más utilizados para la elaboración del mezcal. Cada una de estas especies ha experimentado una disminución del 2% al 5% anual, a pesar de que se tiene pocos años empezar a conservarlas a través

del manejo de las poblaciones silvestres (Aguirre-Dugua y Eguiarte, 2013; Delgado-Lemus, 2008; Delgado-Lemus *et al.*, 2014; Félix-Valdez *et al.*, 2016; Illsley *et al.*, 2007; Torres-García *et al.*, 2019, Torres *et al.*, 2015; Torres *et al.*, 2016). Las dos especies mencionadas anteriormente, se reproducen solamente por semillas, y presentan un menor índice de germinación, por lo tanto, se recomienda germinar las semillas en condiciones controladas para obtener un alto porcentaje de sobrevivencia y que durante los primeros dos años desarrollen en vivero antes de establecerlas en campo (Ignacio *et al.*, 2013, Rangel-Landa, 2015). Además, el *Agave potatorum* Zucc, cultivado con riego y fertilización en tierras marginales de la Mixteca Baja de Oaxaca, mostró una alta concentración de azúcares, indicador de que se debe contemplar como cultivo en las condiciones edafoclimáticas (Martínez *et al.*, 2012).

El reconocimiento de las problemáticas que enfrentan las poblaciones silvestres de agaves debe considerarse como prioridad para la sociedad en general para incidir en un plan de aprovechamiento sustentable, para así disminuir la pérdida de biodiversidad. Entre los proyectos que se concibe una propuesta y que se le está dando continuidad para cumplir un objetivo a largo plazo está el siguiente “Fortalecer el manejo campesino como una estrategia esencial para la conservación, recuperación y manejo de estos recursos genéticos”, que desde el año 2007 es realizado por un Grupo de Estudios Ambientales (GEA), el cual comenzó con productores de mezcal de *Agave cupreata* en el estado de Guerrero, y continuando con su evaluación en el Laboratorio de Manejo y

Evolución de Recursos Genéticos (MARGEN) (Casas *et al.*, 2016, Illsley *et al.*, 2007). Para la conservación de polinizadores del agave y la conservación de recursos genéticos y poblaciones de agave, en el Instituto de Ecología de la Universidad Autónoma de México (UNAM) se realiza el proyecto “Amigo de los murciélagos”, tiene inicio desde el 2015 en donde participan productores de tequila y mezcal del estado de Guerrero y Michoacán, se resalta la importancia de dejar el 5% de plantas madre para la producción de inflorescencias y con la ayuda de los polinizadores se produzcan las semillas para la recuperación de poblaciones silvestres (Trejo-Salazar *et al.*, 2016; Trejo-Salazar *et al.*, 2017). Además, la reforestación con agaves, deberá considerarse como una iniciativa más para asegurar la disponibilidad de plantas para todos los años de extracción (Muñoz *et al.*, 2014, Reynoso-Santos *et al.*, 2012). Por otro lado, el cambio climático cada vez es más notorio debido a las altas temperaturas y la escasez de agua, por lo que es necesario llevar a cabo estrategias de producción de plántulas en vivero mediante semillas y establecerlas cerca de donde se realicen la colectas (Sáenz-Romero *et al.*, 2015).

4.8 Comentarios finales

En México, el género *Agave* es muy representativo en las diferentes regiones, debido a sus características morfológicas y fisiológicas para tolerar la escasez de agua, temperaturas altas y suelos pobres de nutrientes. Estas características han permitido que la planta tenga diferentes formas de encontrarse en el campo tanto

silvestre como cultivado. Es evidente que existe una escasa documentación sobre el manejo sustentable de poblaciones silvestres de *Agave potatorum*, en particular respecto a su regeneración debido a que su mecanismo de reproducción está limitado a la propagación sexual.

4.9 Literatura citada

- Aguirre-Dugua, X., and L. E. Eguiarte. 2013. Genetic diversity, conservation and sustainable use of wild *Agave cupreata* and *Agave potatorum* extracted for mezcal production in Mexico. *Journal of Arid Environments*. 90: 36–44.
- Álvarez-Sánchez, M. E., J. Velázquez-Mendoza, R. Maldonado-Torres, G. Almaguer-Vargas, y A. L. Solano-Agama. 2010. Diagnóstico de la fertilidad y requerimiento de cal de suelos cultivados con agave azul (*Agave tequilana* Weber). *Terra Latinoamericana*. 28(3): 287-293.
<https://www.scielo.org.mx/pdf/tl/v28n3/v28n3a12.pdf>
- Arreola, T., J. M., J. V. M. Montoya., N. J. M. Arreola, V. X. Castillo, A. E. A. Olivares y P. A. Báez. 2020. Efecto de la aplicación de levasa (mosto de caña de azúcar) en la producción y calidad de *Agave tequilana* Weber. *Revista Mexicana Ciencias Agrícolas*. 11(6): 1311-1324.
doi:<https://doi.org/10.29312/remexca.v11i6.2216>
- Avendaño-Arrazate, CH., L. Iracheta-Donjuan, J. C. Gódinez-Aguilar, P. López-Gómez, y A. Barrios-Ayala, A. 2015. Caracterización morfológica de *Agave cupreata*, especie endémica de México. *Revista Internacional de Botánica Experimental International*. 84(1): 148-162.
- Augusto C, F., and Park S, N. 1988. Interactions between seedlings of *Agave deserti* and the nurse plant *Hilaria rigida*. *Ecology*. 69:1731-1740.
<https://doi.org/10.2307/1941151>

- Ayón, Y. 2007. Estudio etnofarmacológico de las diferentes especies endémicas de agave en la medicina tradicional del estado de Hidalgo. Universidad Autónoma de Hidalgo, Tesis de licenciatura. 85p.
- Barrera, V. A., T. Lawson, E. Olmos, N. Fernández-García and A. M. Borland. 2014. Leaf anatomical traits which accommodate the facultative engagement of crassulacean acid metabolism in tropical trees of the genus *Clusia*. *Journal of Experimental Botany*, 65(13), 3513-3523. doi:10.1093/jxb/eru022
- Barrientos-Rivera, G., E. Hernández-Castro, M. Sampedro-Rosas, y H. R. Segura-Pacheco. 2020. Conocimiento tradicional y academia: productores de maguey y mezcal de pequeña escala en las regiones Norte y Centro de Guerrero, México. *Sociedad y Ambiente*. 23: 1-28. doi: 10.31840/sya.vi23.2173
- Candia-Acosta, J. A., M. Díaz-Vázquez, S. D. Torres-Herrera, J. A. Quiroz-Arratia y P. A. Domínguez-Calleros. 2019. Germinación de semillas de *Agave durangensis* bajo diferentes coberturas en Durango, México. *Revista Mexicana de Agroecosistemas*. 6(1):18-27.
- Carlos, F. W., G. I. Morales, G. G. A. Martínez y S. H. Lustre. 2019. Tamaño de semilla y tratamientos pregerminativos en la germinación de *Agave potatorum* Zucc. *Contribución al Conocimiento Científico y Tecnológico en Oaxaca* 5-11.

- Hernández, G., M. Cházaro y E. Flores. 2007. Inventario, distribución y hábitat del género *Agave* en Jalisco, Agaves del Occidente de México. Guadalajara, México: CUCBA-CUCSH, p 6-12.
- Coleman-Derr, D., D. Desgarennes, C. Fonseca-García, S. Gross, S. Clingenped, T. Woyke, end S. Tringe. 2015. Plant compartment and biogeography affect microbiome composition in cultivated and native *Agave* species. *New Phytologist*, 209: 798-811. doi:10.1111/nph.13697
- Colunga-GarcíaMarín P, I. Torres-García, A. Casas, UCJ Figueredo, S. Rangel-Landa, A. Delgado-Lemus, O. Vargas, D. Cabrera-Toledo, D. Zizumbo-Villarreal, X. Aguirre-Dugua, LE. Eguiarte y G. Carrillo-Galván. 2017. Los agaves y las prácticas mesoamericanas de aprovechamiento, manejo y domesticación. En Casas A, Torres-Guevara J, Parra-Rondinel F. Domesticación en el Continente Americano. Pp. 273-308.
- Delgado-Lemus, A. M., 2008. Aprovechamiento y disponibilidad espacial de *Agave potatorum* (papalometl) en San Luis Atlotitlán, Puebla, México. Universidad Nacional Autónoma de México, México. Tesis de maestría. 103 p.
- Delgado-Lemus, A, Torres, I, Blancas, J and Casas, A. 2014. Vulnerability and risk management of *Agave* species in the Tehuacán Valley, México. *Journal of Ethnobiology and Ethnomedicine*, 10: 53-67. DOI: 10.1186/1746-4269-10-53.

- Desgarenes, D, E. Garrido, M. J. Torres-Gómez, J. Peña-Cabriales y L. P. Partida-Martínez. 2014. Potencial diazotrófico entre las comunidades bacterianas asociadas con especies de *Agave* silvestres y cultivadas. *FEMS Microbiology Ecology*. 90: 844 - 857.
- Doria, J. 2010. Generalidades sobre las semillas: su producción, conservación y almacenamiento. *Cultivos Tropicales*. 31(1): 74-85.
- Duque S., J. C. 2013. Evaluación de tres métodos de reproducción del penco azul (*Agave americana*), en la parroquia Tocachi, Cantón Pedro Moncayo Provincia Pichincha. Universidad Politécnica Salesiana Ecuador. Tesis Licenciatura. 72 p.
- Eguiarte, L., V. Souza and A. Silva Montellano. 2000. Evolución de la familia Agavaceae: filogenia, biología reproductiva y genética de poblaciones. *Boletín de la Sociedad Botánica de México*. 66:131–151.
- Eguiarte, L. E., E. Aguirre-Planter, X. Aguirre, R. Colín, A. González, M. Rocha, V. Souza. 2013. De las isoenzimas a la genómica: genética de poblaciones y conservación del agave en México. *Revisión Botánica* 79: 483 – 506.
- Esparza-Ibarra, E. L., J. Violante-González, S. Monks, I. J. Cadena, C. Araujo-Andrade y E. D. Rössel-Kipping. 2015. Los agaves mezcaleros del Altiplano Potosino y Zacatecano. *Estudios en Biodiversidad*. University of Nebraska-Lincoln. 227-245 pp.

- Espinoza, L. 2015. Generalidades e importancia de los agaves en México. Herbario CICY. 1(7): 161-164. http://www.cicy.mx/sitios/desde_herbario/
- Félix-Valdez, L. I., O. Vargas-Ponce, A. Cabrera-Toledo, A. Casas, A. Cibrián-Jaramillo y L. de la Cruz-Larios. 2015. Effects of traditional management for mescal production on the diversity and genetic structure of *Agave potatorum* (Asparagaceae) in central México. Genetic Resources and Crop Evolution. 63: 1255–1271. DOI 10.1007/s10722-015-0315-6
- Figueredo, C., A. Casas, P. Colunga-GarcíaMarín, M. Jafet and A. González-Rodríguez. 2014. Morphological variation, management and domestication of ‘maguey alto’ (*Agave inaequidens*) and ‘maguey manso’ (*A. hookeri*) in Michoacán, México. Journal of Ethnobiology and Ethnomedicine, 10 (66): 1-12.
- Flores-Abreu, I. N., R. E. Trejo-Salazar, L. L. Sánchez-Reyes, S. V. Good, S. Magallón, A. García-Mendoza and L. E. Eguiarte. 2019. Tempo and mode in coevolution of *Agave* sensu lato (Agavoideae, Asparagaceae) and its bat pollinators, Glossophaginae (Phyllostomidae). Molecular Phylogenetics and Evolution. doi:10.1016/j.ympev.2019.01.00
- Flores, A. N. and E. Scheinvar. 2008. La familia Agavaceae. En L. Eguiarte and E. Scheinvar, Agaves y Cactáceas de Metztitlán: Ecología, Evolución y Conservación. México: Pp 29-58.

- García-Mendoza, A. 2002. Distribution of *Agave* (Agavaceae) in México. *Cactus and Succulent Journal*. 74(4): 177-188.
- García-Mendoza, A. 2007. Los agaves de México. *Ciencias, Universidad Autónoma de México*. 87: 14-23.
- García-Mendoza, A. J. 2010. Revisión taxonómica del complejo *Agave potatorum* Zucc. (Agavaceae). Nuevos taxa y neotificación. *Acta Botánica Mexicana*, 71-93.
- García-Mendoza A. J. y I. S. Franco-Martínez. 2018. Actualización de la información de las especies y subespecies de magueyes de Oaxaca, con énfasis en las especies mezcaleras., Proyecto NE012.CONABIO. Instituto de Biología. Universidad Nacional Autónoma de México.
- García-Mendoza, A. J., I. S. Franco y D. Sandoval. 2019. Cuatro especies nuevas de *Agave* (Asparagaceae, Agavoideae) del sur de México. *Acta Botánica Mexicana*. 126: e1461
- García-Moya, E., A. Romero-Manzanares and P. Nobel, 2011. Highlights for *Agave* Productivity. *Global Change Biology*. 3(1): 4-14. Doi 10.1111/j.1757-1707.2010.01078.x
- Gentry, H.S. 1982. *Agaves of Continental North América*. Arizona, University Press, Tucson. 670 pp.
- Godínez-Álvarez, H., M. Jiménez, M. Mendoza, F. Pérez, P. Roldán, L. Ríos-Casanova y R. Lira. 2008. Densidad, estructura poblacional, reproducción

- y supervivencia de cuatro especies de plantas útiles en el Valle de Tehuacán, México. *Revista Mexicana de Biodiversidad*. 79(2): 393–403.
- Golubov, J., M. Mandujano, S. Arizaga, A. Martínez-Palacios y P. Koleff. 2007. Inventarios y conservación de Agavaceae y Nolinaceae. En P. Colunga-GarcíaMarín, A. Larqué Saavedra, L. Eguiarte, y D. Zizumbo-Villareal, En lo ancestral hay futuro del tequila, los mezcales y otros agaves (págs. 133-152). México: CICY-CONACYT-CONABIO-INE.
- Gutiérrez-Hernández, G. F., Y. D. Ortiz-Hernández., L. J. Corzo-Ríos y T. Aquino-Bolaños. 2020. Composición química y germinación de semillas de tobalá (*Agave potatorum*). *Interciencia*. 45(5): 223-228.
- Gschaedler, A. C., A. Gutiérrez-Mora, S. M. Contreras-Ramos, G. Dávila-Vázquez y Gallardo-Valdés, J. 2017. Panorama del aprovechamiento de los agaves en México. Ed. CIATEJ. Guadalajara, México. 302 p.
- Hernández-Castro, E., Y. Y. López-Sandoval, J. L. Escobar-Álvarez, O. Ramírez-Reynoso, M. Maldonado-Peralta and J. L. Valenzuela-Lagarda. 2022. Análisis morfométrico de semilla y desarrollo de plántulas de maguey sacatoro (*Agave angustifolia* Haw.). *Ecosistemas y Recursos Agropecuarios*. 8(3): 1–10. <https://doi.org/10.19136/era.a8n3.2964>
- Hernández L., J. D. 2018. El mezcal como patrimonio social: de indicaciones geográficas genéricas a denominaciones de origen regionales. Em *Questão*. 24(2): 404-433. doi:10.19132/1808-5245242.404-433.

- Holtum, J. A. and K. Winter. 2014. Limited photosynthetic plasticity in the leaf-succulent CAM plant *Agave angustifolia* grown at different temperatures. *Functional Plant Biology*. 41(8): 843-849. DOI: 10.1071/FP13284.
- Ignacio, A. C., A. Delgado-Lemus, S. Rangel-Landa. 2013. Aprovechamiento, demografía y establecimiento de *Agave potatorum* en el Valle de Tehuacán, México: Aportes ecológicos y etnobiológicos para su manejo sustentable. *Zonas Áridas*. 15(1): 92-109.
- Illsley-Granich, C., I. Torres-García, J. D. Hernández López, P. Morales Moreno, R. Varela Álvarez, I. Ibáñez Couoh y H. Nava Xinol. 2018. Manual de manejo campesino de magueyes mezcaleros. México: Grupo de Estudios Ambientales, AC.
- Illsley, C., E. Vega, I. Pisanty, A. Tlacotempa, P. García, P. Morales, G. Rivera, J. García, V. Jiménez, F. Castro, M. Calzada. 2007. Maguey papalote: hacia el manejo campesino sustentable de un recurso colectivo en el trópico seco de Guerrero, México. In: Colunga-GarcíaMarín, P., Larqué Saavedra, A., Eguiarte, L.E., Zizumbo-Villarreal, D. En lo ancestral hay futuro, del tequila, los mezcales y otros agaves. Pp. 319-338.
- León-Vázquez, N. I., G. V. Campos-Ángeles, J. R. Enríquez-del Valle, V. A. Velasco-Velasco, F. Marini-Zúñiga y G. Rodríguez-Ortiz. 2013. Diversidad de especies de agave en San Miguel Tilquiapan Ocotlán. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*. 6: 1185-1195.

- Luna-Luna, S., J. R. Enríquez-del Valle, G. Rodríguez-Ortiz, J. C. Carrillo-Rodríguez y V. A. Velasco-Velasco. 2017. Anatomía y morfología de plantas micropropagadas-aclimatadas de *Agave potatorum* Zucc fertirrigadas en vivero. *Revista Fitotecnia Mexicana*. 40(4): 491-494.
- Martínez R. S., A. Trinidad, C. Robles, A. Galvis, T. M. Hernández, J. A. Santizo, G. Bautista y E. C. Pedro. 2012. Crecimiento y sólidos solubles de *Agave potatorum* Zucc. inducidos por riego y fertilización. *Revista Fitotecnia Mexicana*. 35: 61-68.
- Martínez-Jiménez, R., J. Ruíz-Vega, C. M. Caballero, M. Silva-Rivera y J. L. Montes-Bernabé. 2019. Agaves silvestres y cultivadas empleados en la elaboración de mezcal en Sola de Vega, Oaxaca, México. *Tropical and Subtropical Agroecosystems*. 22(2): 477-485.
- Martínez-Ramírez, S. y Bautista-Sánchez, G. 2013. Adaptabilidad de *Agave potatorum* Zucc. a las condiciones ambientales y socioeconómicas de río azucena, San Juan Mixtepec, Oaxaca. *Temas de Ciencia y Tecnología*. 17(50):3-12.
- Martínez-Ramírez, S., G. Bautista-Sánchez, E. C. Pedro-Santos y P. Guerrero-Cruz. 2014. Crecimiento y contenido de clorofila del maguey mezcalero (*Agave potatorum* Zucc.) en policultivo con maíz y frijol. *Revista Fitotecnia Mexicana*. 297-304.

- Matiz, A., P. T. Mito, A. Y. Mayorga, L. Freschi and H. Mercier. 2013. CAM photosynthesis in bromeliads and agaves: What can we learn from these plants?. *Photosynthesis*. 91–134. <http://dx.doi.org/10.5772/56219>
- Monroy-Vázquez, M. E., C. B. Peña-Valdivia, J. R. García-Nava, E. Solano-Camacho, H. Campos y E. García-Villanueva. 2017. Imbibición, viabilidad y vigor de semillas de cuatro especies de *Opuntia* con grado distinto de domesticación. *Agrociencia*. 5(1): 27-42.
- Muñoz F. H. J., M. J. García, A. V. Coria, A. H. Hernández y R. J. Hernández. 2014. Selección de plantas madre de K Trel et Berg en Axaxacualco Guerrero, México. *Foresta Veracruzana*. 16(1): 1-8.
- Nava-Cruz, N. Y., M. A. Medina-Morales, J. L. Martínez y C. N. Aguilar. 2014. Agave biotechnology: an overview. *Critical Reviews in Biotechnology*. 1-14. doi:10.3109/07388551.2014.923813
- Niño Vázquez, R. 2013. Germinación y viabilidad seminal de *Agave angustifolia* subsp. tequilana y *Agave mapisaga*. Universidad Autónoma de San Luis Potosí.
- Peña-Valdivia, C. B., A. B. Sánchez-Urdaneta, J. R. Aguirre R., C. Trejo, E. Cárdenas y A. Villegas M. 2006. Temperature and mechanical scarification on seed germination of “maguey” (*Agave salmiana* Otto ex Salm-Dyck). *Seed Science and Technology*. 34(1): 47–56. <https://doi.org/10.15258/sst.2006.34.1.06>

- Peña-Valdivia C. B. y A. B. Sánchez-Urdaneta. 2009. Effects of substrate water potential in root growth of *Agave salmiana* otto ex Salm-Dyck seedlings. *Biological Research*. 42: 239-248.
- Peña-Valdivia, C. B., C. Trejo, R. Celis-Velázquez y O. A. López. 2013. Reacción del frijol silvestre (*Phaseolus vulgaris* L.) a la profundidad de siembra. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*. 4: 89-102.
- Pérez H. E., P. M. D. Chávez y J. C. González Hernández. 2016. Revisión del agave y el mezcal. *Revista Colombiana de Biotecnología*. 28(1): 148-164. doi:10.15446/rev.colomb.biote.v18n1.49552
- Pérez-Sánchez, R. M., E. Jurado, L. Chapa-Vargas and J. Flores. 2011. Seed germination of Southern Chihuahuan Desert plants in response to elevated temperatures. *Journal of Arid Environments*. 75(10): 978–980. <https://doi.org/10.1016/j.jaridenv.2011.04.020>
- Pimienta-Barrios, E., C. Robles-Murguía and P. S. Nobel. 2001. Net CO₂ Uptake for *Agave tequilana* in a Warm and a Temperate Environment¹. *Biotropica*. 33(2): 312–318. doi:10.1111/j.1744-7429.2001.tb00181.x
- Pimienta-Barrios E., J. Zañudo-Hernández, P. S. Nobel, J. García-Galindo. 2005. Respuesta fisiológica a factores ambientales del agave azul (*Agave tequilana* Weber). *Scientia-CUCBA*. 7: 85-97.
- Pritchard, H. W. and A. P. Miller. 2017. Los efectos de las temperaturas constantes, luz y calidad de la semilla en las características de la

germinación de *Agave americana*. Botanical Sciences. 14(57): 11.
<https://doi.org/10.17129/botsci.1472>

Ramírez-Tobías H. M, C.B Peña-Valdivia, R. R. Aguirre, J. A. Reyes-Agüero, A. B. Sánchez-Urdaneta, G. S. Valle, 2012. Seed germination temperatures of eight Mexican *Agave* species with economic importance. Plant Species Biology 27: 124-137. <https://doi.org/10.1111/j.1442-1984.2011.00341.x>

Ramírez-Tobías, H. M., C. B. Peña-Valdivia, C. Trejo, R. J. R. Aguirre R and H. H. Vaquera. 2014. Seed germination of *Agave* species as influenced by substrate water potential. Biological Research, 47(1): 1–9.
<https://doi.org/10.1186/0717-6287-47-11>

Ramírez-Tobías, H. M., C. B. Peña-Valdivia y J. Rogelio Aguirre. 2014. Respuestas bioquímico-fisiológicas de especies de *Agave* a la restricción de humedad. Botanical Sciences, 131-139.

Ramírez Tobías, H. M., R. Niño Vázquez, J. R. Aguirre Rivera, J. Flores, J. A. De-Nova Vázquez and R. Jarquín Gálvez. 2016. Seed viability and effect of temperature on germination of *Agave angustifolia* subsp. tequilana and *A. mapisaga*; two useful *Agave* species. Genetic Resources and Crop Evolution, 63(5): 881–888. <https://doi.org/10.1007/s10722-015-0291-x>

Ramírez-Tobías, H. M., R. A. R. A., Cedillo de la Rosa, J. Flores, y P. C. López Palacios, 2020. Seedlings from two *Agave* species differing in microhabitat

evolve different tolerance mechanisms to drought and shade under nurse plants. *Flora*. 2-9. doi:<https://doi.org/10.1016/j.flora.2020.151729>

Rangel-Landa S, A. Casas y P. Dávila. 2015. Facilitation of *Agave potatorum* Zucc.: An ecological approach for assisted population recovery. *Forest Ecology and Management* 347: 57-74. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2015.03.003>

Reynoso-Santos, R., A. J. García-Mendoza, W. López-Báez, A. López-Luna, I. P. Cadena, M. Pérez-Farrera y G. M. Domínguez. 2012. Identificación taxonómica de agaves (*Agave spp.*) utilizados para la elaboración del licor comiteco en Chiapas, México. *Agroproductividad*. 9-17.

Reyrd-Jaramillo, I., E. Chimal-Sánchez, J. Y. Salmerón-Castro, N. Vázquez-Pérez y L. Varela-Fregoso. 2019. Comunidad de hongos micorrizógenos arbusculares (Glomeromycota) asociada con agaves mezcaleros de Oaxaca y su relación con algunas propiedades edáficas. *Revista Mexicana de Biodiversidad*. 90:1-16. doi:<https://doi.org/10.22201/ib.20078706e.2019.90.277>

Ruíz, G., C. Peña-Valdivia, L. Trejo y A. Sánchez. 2007. Reacción fisiológica del maguey (*Agave salmiana* Otto ex Salm-Dyck) a la sequía intermitente. *Revista de la Facultad de Agronomía de la Universidad del Zulia*, 24(1): 318-325. Obtenido de <https://produccioncientificaluz.org/index.php/agronomia/article/view/26729>

- Sáenz-Romero, C., A. Martínez-Palacios, J. M. Gómez-Sierra, y N. Pérez-Nasser. 2015. Adaptación de las plantaciones de *Agave cupreata* al cambio climático. En A. Martínez-Palacios, J. L. Morales-García, & R. S. Guillen, Aspectos sobre el manejo y la conservación de Agaves Mezcaleros en Michoacán. Michoacán, Morelia. Pp. 9-13.
- Saldaña-Vázquez, R. A., O. R. Rojas-Soto, F. A. Toro-Cardona, S. Ortega-García y T. Pérez-García. 2022. Bases ecológicas para la propagación. Puebla. DOI:10.13140/RG.2.2.28783.10403
- Scheinvar, E. 2018. Filogeografía de *Agave lechuguilla* y patrones de distribución de *Agave* en México. Ph.D. dissertation, Instituto de Ecología, Universidad Nacional Autónoma de México, D.F., México.
- Siauson, L. A. 2011, Insights on the pollination biology of *Agave* (Agavaceae). *Haseltonia* 8: 10-13.
- Stewart J. R. 2015. *Agave* as a model CAM crop system for a warming and drying world. *Frontiers in Plant Science*. 6(684): 1-20. 10.3389/fpls.2015.00684
- Suárez, D., y L. M. Melgarejo. 2010. Biología y germinación de semillas. Experimentos en Fisiología Vegetal. Universidad Nacional de Colombia. Bogotá, Colombia. 13-24
- Torres, I., 2016. Aprovechamiento de Agaves Mezcaleros en el centro de México: Una aproximación socio-ecológica para su manejo sustentable. Tesis de Doctorado en Ciencias Biológicas, UNAM, Morelia, Michoacán. pp. 183.

- Tamayo-Ordóñez, M., B. Ayil-Gutiérrez, Y. Tamayo-Ordóñez, L. Rodríguez-Zapata, M. Monferte-González, E. De la Cruz-Arguijo y L. Sánchez-Teyer. 2018. Review and in silico analysis of fermentation, bioenergy, fiber, and biopolymer genes of biotechnological interest in *Agave* L. for genetic improvement and biocatalysis. *Biotechnology Progress*, 1-66.
- Torres-García, I., F. J. Rendón-Sandoval, J. Blancas, A. Casas, and A. I. Moreno-Calles. 2019. The genus *Agave* in agroforestry systems of Mexico. *Botanical Sciences* 97: 263–290.
- Torres, I., J. Blancas, A. León, y A. Casas. 2015. TEK, local perceptions of risk, and diversity of management practices of *Agave inaequidens* in Michoacán, Mexico. *Journal of Ethnobiology and Ethnomedicine*, 11(1), 1. DOI 10.1186/s13002-015-0043-1
- Trejo-Salazar, R. E., E. Scheinvar y L. E. Eguiarte. 2015. ¿Quién poliniza realmente los agaves? Diversidad de visitantes florales en 3 especies de *Agave* (Agavoideae: Asparagaceae). *Revista Mexicana de Biodiversidad*. 86: 358-369. doi:<http://dx.doi.org/10.1016/j.rmb.2015.04.007>
- Trejo-Salazar, R. E., L. E. Eguiarte, and R. A. Medellín. 2017. El tequila y el murciélago: ¡todos somos *Leptonycteris*!. *Oikos* 18: 20–23.
- Trejo-Salazar, R. E., L. E. Eguiarte, D. Suro-Piñera, and R. A. Medellín. 2016. Save our bats, save our tequila: industry and science join forces to help bats and agaves. *Natural Areas Journal* 36: 523–530.

Valiente-Banuet, A., R. A. Vital, M. Verdu and R. M. Callaway. 2006. Modern quaternary plant lineages promote diversity through facilitation of ancient tertiary lineages. *The national Academy of Sciences*, 16812–16817.

Vázquez-Díaz, E., R. J. García-Nava, C. B. Peña-Valdivia, H. M. Ramírez-Tobías y V. Morales-Ramos. 2011. Tamaño de la semilla, emergencia y desarrollo de la plántula de maguey (*Agave salmiana* Otto ex Salm–Dyck). *Revista Fitotecnia Mexicana*. 167-173.

CAPÍTULO V

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

La reintroducción de *Agave potatorum* en zonas en donde han desaparecido las poblaciones silvestres puede ser posible utilizando obras de conservación de suelo que favorecieron significativamente la regeneración asistida de individuos de 12 y 24 meses de edad. Además de que las obras de conservación implementadas traen beneficios adicionales a los sitios como la conservación de humedad y retención de suelo para favorecer la formación de suelos en sitios pobres. Se recomienda la evaluación en periodos más largo a los comprendidos en este estudio debido al lento crecimiento de la especie

CAPÍTULO VI

LITERATURA CITADA

- Alanis-Rodríguez, E., J. Jiménez-Pérez, A. Mora-Olivo, J. Martínez-Ávalos, J. Mata-Balderas, A. Chávez-Costa y E. A. Rubio-Camacho. 2015. Estructura y diversidad del matorral submontano contiguo al área metropolitana de Monterrey, Nuevo León, México. *Acta Botánica mexicana*. 1-19.
- Álvarez-Sánchez, M. E., J. Velázquez-Mendoza, R. Maldonado-Torres, G. Almaguer-Vargas y A. L. Solano-Agama. 2010. Diagnóstico de la fertilidad y requerimiento de cal de suelos cultivados con agave azul (*Agave tequilana* Weber). *Terra Latinoamericana*. 287-293.
- Andrade, J. L., E. de la Barrera, C. Reyes-García, M. F. Ricalde, G. Vargas-Soto y J. C. Cervera. 2007. El metabolismo ácido de las crasuláceas: diversidad, fisiología ambiental y productividad. *Boletín de la Sociedad Botánica de México*. 81:31-50.
<https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=57708102>

Arreola T., J. M., V. M. Montoya Jasso, J. M. Arreola Nava, X. Castillo Valdés, E. A. Olivares Arreola y A. Baéz Pérez. 2020. Efecto de la aplicación de levadura (mosto de caña de azúcar) en la producción y calidad de *Agave tequilana* Weber. *Revista Mexicana Ciencias Agrícolas*. 1311-1324. doi:10.29312/remexca.v11i6.2216

Avendaño-Arrazate, CH., L. Iracheta-Donjuan, J. C. Gódinez-Aguilar, P. López-Gómez, y A. Barrios-Ayala. 2015. Caracterización morfológica de *Agave cupreata*, especie endémica de México. *Revista Internacional de Botánica Experimental International Journal of Experimental Botany*. 84(1): 148-162.

Cervera-Herrera, J. C., J. L. Leirana-Alcocer y J. A. Navarro-Alberto. 2018. Factores ambientales relacionados con la cobertura de *Agave angustifolia* (Asparagaceae) en el matorral costero de Yucatán, México. *Acta Botánica Mexicana*. 75-84. doi:10.21829/abm124.2018.1252

Consejo Regular de Mezcal (CRM). 2020. El mezcal la cultura líquida de México. Oaxaca, México.

Colunga-GarcíaMarín P. I. C., A. Torres-García, U. C. J. Casas, S. Figueredo, A. Rangel-Landa, O. Delgado-Lemus, D. Vargas, D. Cabrera-Toledo, X. Zizumbo-Villarreal, L. E. Aguirre-Dugua, G. Eguiarte y G. Carrillo-Galván. 2017. Los agaves y las prácticas mesoamericanas de aprovechamiento, manejo y domesticación. En Casas A, Torres-Guevara J, Parra-Rondinel F. Domesticación en el Continente Americano. Pp. 273-308.

- Cockburn W. 1981. The evolutionary relationship between stomatal mechanism, crassulacean acid metabolism and C4 photosynthesis. *Plant, Cell and Environment* 4: 417-418.
- Cockburn W. 1985. Stomatal mechanism as the basis of evolution of crassulacean acid metabolism. *Nature* 314:200
- Comisión Nacional Forestal (CONAFOR). 2018. Protección, restauración y conservación de suelos forestales. Manual de obras y prácticas. 295 p.
- Cotler, H., S. Cram, S. Martínez-Trinidad y V. Bunge. 2015. Evaluación de prácticas de conservación de suelos forestales en México: caso de las zanjas trinchera. *Investigaciones Geográficas*. 6-18. doi:10.14350/rig.47378.
- Delgado-Lemus, A. M. 2008. Aprovechamiento y disponibilidad espacial de *Agave potatorum* (papalometl) en San Luis Atlotitlán, Puebla, México. MSc dissertation, Universidad Nacional Autónoma de México, México.
- Delgado-Lemus, A., I. Torres, J. Blancas y A. Casas. 2014. Vulnerability and risk management of Agave species in the Tehuacán Valley, México. *Journal of Ethnobiology and Ethnomedicine*. 10: 53-67. DOI: 10.1186/1746-4269-10-53.
- Encina-Domínguez, J., A. Zárate-Lupercio, C. E. Estrada, J. Valdés-Reyna y J. Villareal-Quintanilla, 2009. Composición y aspectos estructurales de los

- bosques de encino de la Sierra de Zapalinamé, Coahuila, México. *Acta Botánica Mexicana*. 71-108.
- Enríquez del Valle, J. R. 2008. La propagación y crecimiento de agaves. Fundación Produce Oaxaca, A. C. Instituto Tecnológico del Valle de Oaxaca. México. 46 p.
- February E. C., I. Matimati, T. A. Hedderson and C. F. Musil. 2013. Root niche partitioning between shallow rooted succulents in a South African semi desert: implications for diversity. *Plant Ecology*. 214(9): 1181-1187. 10.1007/s11258-013-0242-6
- García-Mendoza, A. 2002. Distribution of Agave (Agavaceae) in México. *Cactus and Succulent Journal*. 74(4): 177-188.
- García-Mendoza, A. J. 2010. Revisión taxonómica del complejo *Agave potatorum* Zucc. (Agavaceae). Nuevos taxa y neotificación. *Acta Botánica Mexicana*, 71-93.
- García-Mendoza, A. J., I. S. Franco y D. Sandoval. 2019. Cuatro especies nuevas de Agave (Asparagaceae, Agavoideae) del sur de México. *Acta Botánica Mexicana*. 126: e1461
- García-Mendoza A. J. y I. S. Franco-Martínez. 2018. Actualización de la información de las especies y subespecies de magueyes de Oaxaca, con énfasis en las especies mezcaleras., Proyecto NE012.CONABIO. Instituto de Biología. Universidad Nacional Autónoma de México.

- Gentry, H.S. 1982. *Agaves of Continental North América*. Arizona, University Press, Tucson, 670 pp.
- Gisbert-Blanquer, J. M., S. Ibáñez Asensio y H. Moreno Ramón. 2012. Medidas mecánicas extraordinarias de conservación de suelos. <http://hdl.handle.net/10251/16853>
- Golubov, J., M. Mandujano, S. Arizaga, A. Martínez-Palacios y P. Koleff. 2007. Inventarios y conservación de Agavaceae y Nolinaceae. En P. Colunga-GarcíaMarín, A. Larqué Saavedra, L. Eguiarte, y D. Zizumbo-Villareal, En lo ancestral hay futuro del tequila, los mezcales y otros agaves (págs. 133-152). México: CICY-CONACYT-CONABIO-INE.
- Gutiérrez-Hernández, G. F., Y. D. Ortiz-Hernández., L. J. Corzo-Ríos y T. Aquino-Bolaños. 2020. Composición química y germinación de semillas de tobalá (*Agave potatorum*). *Interciencia*. 45(5): 223-228.
- Hernández-Valencia, R. E. M. 2005. Micromorfología de la epidermis foliar de plantas sanas y enfermas de *Agave tequilana* Weber. Tesis: Doctorado. Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro
- Illsley-Granich, C., I. Torres-García, J. D. Hernández-López, P. Morales-Moreno, R. Varela-Álvarez, I. Ibáñez-Couoh y H. Nava-Xinol. 2018. Manual de manejo campesino de magueyes mezcaleros. México: Grupo de Estudios Ambientales, A. C.

- Ignacio-Torres, A. C., A. Delgado-Lemus, S. Rangel-Landa. 2013. Aprovechamiento, demografía y establecimiento de *Agave potatorum* en el Valle de Tehuacán, México: Aportes ecológicos y etnobiológicos para su manejo sustentable. Zonas Áridas. 92-109.
- Keeley J.E. y Rundel P.W. 2003. Evolution of CAM and C4 carbon-concentrating mechanisms. International Journal of Plant Sciences 164: S55-S77.
- León, J. A. 2013. Aspectos de la fenología, visitantes florales y polinización de *Agave inaequidens* Koch ssp. *inaequidens* (Agavaceae), en el estado de Michoacán. Tesis de licenciatura. Facultad de Biología, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo. México, Morelia
- León-Vázquez, N. I., G. V. Campos-Ángeles, J. R. Enríquez-del Valle, V. A. Velasco-Velasco, F. Marini Zúñiga y G. Rodríguez-Ortiz. 2013. Diversidad de especies de agave en San Miguel Tilquiapan Ocotlán. Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas 6: 1185-1195.
- List, R., P. Rodríguez, K. Pelz-Serrano, J. Benítez-Malvido y J. M. Lobato. 2017. La conservación en México: exploración de logros, retos y perspectivas desde la ecología terrestre. Revista Mexicana de Biodiversidad. 65-75. doi:<https://doi.org/10.1016/j.rmb.2017.10.007>
- Martínez-Jiménez, R., J. Ruíz-Vega, C. M. Caballero, M. Silva-Rivera y J. L. Montes-Bernabé. 2019. Agaves silvestres y cultivadas empleados en la

elaboración de mezcal en Sola de Vega, Oaxaca, México. *Tropical and Subtropical Agroecosystems* 22 (2): 477-485.

Martínez-Ramírez, S., A. Trinidad-Santos, C. Robles, A. Galvis-Spinola, T. M. Hernández-Mendoza, J. A. Santizo-Rincón y E. C. Pedro-Santos. 2012. Crecimiento y sólidos solubles de *Agave potatorum* Zucc. inducidos por riego y fertilización. *Revista Fitotecnia Mexicana*. 61-68.

Martínez-Ramírez, S., G. Bautista-Sánchez, E. C. Pedro-Santos y P. Guerrero-Cruz. 2014. Crecimiento y contenido de clorofila del maguey mezcalero (*Agave potatorum* Zucc.) en policultivo con maíz y frijol. *Revista Fitotecnia Mexicana*. 297-304.

Monja-Mio, K. M., F. Escalante-Erosa, X. M. Eb-Puc, M. A. Herrera-Alamillo, L. M. Peña-Rodríguez, M. L. Robert. 2019. Epicuticular wax análisis of wild and agronomically important *Agave* species. *Phytochemistry Letters*. 24: 103-107. <https://doi.org/10.1016/j.phytol.2019.09.013>

Montaño, N. M., A. Alarcón, S. L. Camargo-Ricalde, L. V. Hernández-Cuevas, J. Álvarez-Sánchez y M. D. González-Chávez. 2012. Research on arbuscular mycorrhizae in Mexico: an historical synthesis and future prospects. *Symbiosis*. 57: 111–126.

Muñoz F. H. J., M. J. García, A. V. Coria, A. H. Hernández y R. J. Hernández. 2014. Selección de plantas madre de *K Trel et Berg* en Axaxacualco Guerrero, México. *Foresta Veracruzana*. 16(1): 1-8.

- Nava-Cruz, N. Y., M. A. Medina-Morales, J. L. Martínez y C. N. Aguilar. 2014. Agave biotechnology: an overview. *Critical Reviews in Biotechnology*. 1-14. doi:10.3109/07388551.2014.923813
- Niechayev, N. A., P. N. Pereira and J. C. Cushman. 2019. Understanding trait diversity associated with crassulacean acid metabolism (CAM). *Current Opinion in Plant Biology*. 49: 74-85. <https://doi.org/10.1016/j.pbi.2019.06.004>
- Nobel P.S. 1988. Environmental Biology of Agaves and *Acta Botánica Mexicana*. 9: 37-38. <https://doi.org/10.21829/abm9.1990.1124>
- Norden, N. 2014. Del porqué la regeneración natural es tan importante para la coexistencia de especies en los bosques tropicales. *Colombia Forestal* 247-261.
- Panna, D. and R. C. Sundriyal. 2013. Seed germination in lowland tropical rainforest Trees: interspecies, canopy and fruit type variations. *Research Journal of Forestry*, 1-15.
- Pérez-García, J. N. 2020. Causas de la pérdida global de biodiversidad. *Revista de la Asociación Colombiana de Ciencias Biológicas*. 32: 183-198. <https://doi.org/10.47499/revistaaccb.v1i32.219>
- Pérez H. E., P. M. D. Chávez y J. C. González Hernández. 2016. Revisión del agave y el mezcal. *Revista Colombiana de Biotecnología* 28(1): 148-164. doi:10.15446/rev.colomb.biote.v18n1.49552

- Pérez-López, P., F. López-Barrera, F. García-Oliva, F. Cuevas-Reyes y A. González-Rodríguez. 2013. Procesos de regeneración natural en bosques de encinos: factores facilitadores y limitantes. *Biológicas*. 18-24.
- Pompa-Castillo, E. F., M. Luna-Cavazos, y E. García-Moya. 2021. Composición y estructura de comunidades asociadas de pino-izotal (*Pinus pseudostrobus* - *Nolina parviflora*), en Puebla, México. *CALDASIA*. 65-79. doi:<https://doi.org/10.15446/caldasia.v43n1.82394>
- Ramírez-Marcial N. 2003. Survival and growth of tree seedling in anthropogenically disturbed Mexican montane rain forest. *Journal of Vegetation Science*. 14: 881-890
- Ramírez-Tobías H. M, C. B Peña-Valdivia, R. R. Aguirre, J. A. Reyes-Agüero, A. B. Sánchez-Urdaneta y G. S. Valle, 2012. Seed germination temperatures of eight Mexican *Agave* species with economic importance. *Plant Species Biology* 27: 124-137.
- Ramírez-Tobías, H. M., C. B. Peña-Valdivia y J. Rogelio Aguirre. 2014. Respuestas bioquímico-fisiológicas de especies de *Agave* a la restricción de humedad. *Botanical Sciences*. 131-139.
- Rangel-Landa S, A. Casas, P. Dávila. 2015. Facilitation of *Agave potatorum* Zucc.: An ecological approach for assisted population recovery. *Forest Ecology and Management* 347: 57-74. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2015.03.003>

- Reyna-González, A. M., P. S. Soto-Borrego, E. Alanis-Rodríguez, V. M. Molina-Guerra y A. C. Chávez-Costa. 2021. Estructura y diversidad del matorral xerófilo en el noroeste de México. *POLIBOTÁNICA*, 107-122. doi:10.18387/polibotanica.51.7
- Reynoso-Santos, R., A. J. García-Mendoza, W. López-Báez, A. López-Luna, I. P. Cadena, M. Pérez-Farrera y G. M. Domínguez. 2012. Identificación taxonómica de agaves (*Agave spp.*) utilizados para la elaboración del licor comiteco en Chiapas, México. *Agroproductividad*. 9-17.
- Rojas, S., C. Castillejos-Cruz y E. Solano. 2013. Florística y relaciones fitogeográficas del matorral xerófilo en el Valle de Tecozautla, Hidalgo, México. *Botanical Sciences*. 273-294.
- Ruiz-Corral, J. A., G. Medina-García, I. J. González-Acuña, H. E. Flores-López, G. Ramírez-Ojeda y C. Ortiz-Trejo. 2013. Requerimiento agroecológico de cultivos. Tepatitlán Morelos, Jalisco: Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias. 564 p.
- Ruiz-García, G. 2014. Variación de la fotosíntesis CAM de dos especies de *Agave* influida por el desarrollo y el ambiente. Universidad Autónoma de San Luis Potosí. Tesis de licenciatura. 38 p.
- Salinas-Rodríguez, M. M., L. Hernández-Sandoval, P. Carrillo-Reyes, H. A. Castillo-Gómez, A. Castro-Castro, E. Estrada-Castillón y R. Soltero-Quintana. 2022. Diversidad de plantas vasculares de la Provincia

Fisiográfica de la Sierra Madre Oriental, México. Botanical Sciences, 469-492. doi:10.17129/botsci.2864

Serio, S. J. C. 2011. La translocación y reintroducción en el manejo y conservación de las especies. En Gallina, T. S., López, G. C. Manual de técnicas para el estudio de la fauna. Pp. 221-234.

Singh, G., D. Mishra, K. Singh and R. Parmar. 2013. Effects of rainwater harvesting on plant growth, soil water dynamics and herbaceous biomass during rehabilitation of degraded hills in Rajasthan, India”, Forest Ecology and Management. 310: 612-622.

Tamayo-Ordóñez, M., B. Ayil-Gutiérrez, Y. Tamayo-Ordóñez, L. Rodríguez-Zapata, M. Monferte-González, E. De la Cruz-Arguijo y L. Sánchez-Teyer. 2018. Review and in silico analysis of fermentation, bioenergy, fiber, and biopolymer genes of biotechnological interest in *Agave* L. for genetic improvement and biocatalysis. Biotechnology Progress, 1-66.

Torres, I., J. Blancas, A. León, y A. Casas. 2015. TEK, local perceptions of risk, and diversity of management practices of *Agave inaequidens* in Michoacán, Mexico. Journal of Ethnobiology and Ethnomedicine. 11(1): 1. DOI 10.1186/s13002-015-0043-1

Torres, I., A. Casas, A. Delgado-Lemus, S. Rangel-Landa. 2013. Aprovechamiento, demografía y establecimiento de *Agave potatorum* en

el Valle de Tehuacán, México: aportes etnobiológicos y ecológicos para su manejo sustentable. *Zonas Áridas*. 15(1): 92-109.

Vargas, R. O. 2011. Restauración ecológica: biodiversidad y conservación. *Acta Biológica Colombiana*. 16(2). 221-246.
<http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=319028008017>

Vázquez-Díaz, E., R. J. García-Nava, C. B. Peña-Valdivia, H. M. Ramírez-Tobías y V. Morales-Ramos. 2011. Tamaño de la semilla, emergencia y desarrollo de la plántula de maguey (*Agave salmiana* Otto ex Salm–Dyck). *Revista Fitotecnia Mexicana*. 167-173.

Zapata-Carreño, K. 2018. Eficiencia de terrazas de muro vivo con nopal (*Opuntia spp*) y maguey (*Agave spp*) en suelos de tepetate, en el predio Las Cruces, Texcoco, Edo. México.