



Universidad Autónoma de Querétaro
Facultad de Ciencias Naturales
Licenciatura en Horticultura Ambiental



“Aislamiento de rizobacterias en *Agave montana* Villarreal y su evaluación como promotoras de crecimiento vegetal”

Que como parte de los requisitos para obtener el grado de

Licenciada en Horticultura Ambiental

Presenta:

Sarahi Higuera Morales

Dirigido por:

Dr. Juan Antonio Valencia Hernández

SINODALES

Juan Antonio Valencia Hernández
Presidente

Firma

Emma Fabiola Magallán Hernández
Secretaria

Firma

Dr. José Antonio Cervantes Chávez
Vocal

Firma

Francisco Josué López Martínez
Suplente

Firma

Santiago de Querétaro, Querétaro

Enero del 2026

México

La presente obra está bajo la licencia:
<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/deed.es>



CC BY-NC-ND 4.0 DEED

Atribución-NoComercial-SinDerivadas 4.0 Internacional

Usted es libre de:

Compartir — copiar y redistribuir el material en cualquier medio o formato

La licenciante no puede revocar estas libertades en tanto usted siga los términos de la licencia

Bajo los siguientes términos:



Atribución — Usted debe dar [crédito de manera adecuada](#), brindar un enlace a la licencia, e [indicar si se han realizado cambios](#). Puede hacerlo en cualquier forma razonable, pero no de forma tal que sugiera que usted o su uso tienen el apoyo de la licenciante.



NoComercial — Usted no puede hacer uso del material con [propósitos comerciales](#).



SinDerivadas — Si [remezcla, transforma o crea a partir](#) del material, no podrá distribuir el material modificado.

No hay restricciones adicionales — No puede aplicar términos legales ni [medidas tecnológicas](#) que restrinjan legalmente a otras a hacer cualquier uso permitido por la licencia.

Avisos:

No tiene que cumplir con la licencia para elementos del material en el dominio público o cuando su uso esté permitido por una [excepción o limitación](#) aplicable.

No se dan garantías. La licencia podría no darle todos los permisos que necesita para el uso que tenga previsto. Por ejemplo, otros derechos como [publicidad, privacidad, o derechos morales](#) pueden limitar la forma en que utilice el material.

RESUMEN

El *Agave montana* Villarreal, es una especie nativa de México que fue descubierta en la sierra Madre Oriental por José A. Villarreal Q. y ha sido estudiada en varias partes del territorio mexicano incluyendo a Querétaro donde su inflorescencia es consumida por los habitantes de algunas zonas de la sierra, además esta agavácea tiene una importancia ecológica evolutiva con los murciélagos quiropterofilos, por lo cual es importante realizar estrategias de conservación de esta especie. Las rizobacterias promotoras de crecimiento vegetal son microorganismos del suelo capaces de facilitar a la planta nutrientes, hormonas y resistencia ante el estrés y plagas por medio de estrategias directas e indirectas, por lo que son consideradas para usarlas como una alternativa sustentable para la conservación de *A. montana*. El objetivo de esta tesis fue promover y potenciar el crecimiento de *A. montana* por medio de las bacterias cercanas a la región de sus raíces asociadas de manera natural a la planta. Para esto se hizo una recolección de la rizosfera de diez *Agave montana* Villarreal y dos *A. gentryi* de donde se aislaron cepas bacterianas para los análisis morfológicos macroscópicos y microscópicos, además de pruebas de Gram, pruebas de producción de auxinas, giberelinas y solubilidad de fósforo. Las semillas fueron inoculadas con las bacterias seleccionadas y se llevó a cabo su monitoreo. Los datos de todas las pruebas fueron analizados estadísticamente mediante un ANOVA. Se obtuvieron 12 muestras de suelo rizosférico de las cuales en una etapa inicial se aislaron 28 bacterias y posteriormente se seleccionaron las 15 de mayor potencial de UFCs, de las cuales, 5 fueron las más sobresalientes en etapas diferentes, en la germinación hubo un porcentaje de 93.3 ± 5.8 , para la longitud de la hoja 2.670 ± 0.370 mm, ancho de la hoja 5.75 ± 1.57 mm, diámetro a los 105 días 49.51 ± 06.61 mm, altura 32.85 ± 05.68 mm, diámetro a los 265 días 62.46 ± 13.59 mm y en *in vitro*, la producción índoles 20.105 ± 3.449 mg/L, biosíntesis de giberelinas 18512.500 ± 3363.664 mg/L y la eficiencia de solubilidad de fósforo de 235.299 ± 118.846 %. En este contexto, la asociación entre el agave y rizobacterias son una estrategia que puede emplearse como bioestimulante, así como para enfrentar los posibles daños causados por factores bióticos y abióticos disminuyendo pérdidas significativas.

Palabras clave: Microorganismos promotores de crecimiento, UFCs, conservación, fitohormonas, microorganismos solubilizadores de fósforo.

SUMMARY

Agave montana Villarreal is a species native to Mexico that was discovered in the Sierra Madre Oriental by José A. Villarreal Q. It has been studied in several regions of the Mexican territory, including Querétaro, where its inflorescence is consumed by inhabitants of some areas of the highlands. Moreover, this agave species has an important ecological and evolutionary relationship with chiropterophilous bats, making the implementation of conservation strategies for this species highly relevant. Plant growth-promoting rhizobacteria (PGPR) are soil microorganisms capable of providing plants with nutrients and phytohormones, as well as enhancing resistance to stress and pests through direct and indirect mechanisms. Therefore, they are considered a sustainable alternative for the conservation of *A. montana*. The objective of this thesis was to promote and enhance the growth of *A. montana* through the use of bacteria found in the region of its root zone, naturally associated with the plant. For this purpose, rhizospheric soil samples were collected from ten *Agave montana* Villarreal and two *A. gentryi* plants, from which bacterial strains were isolated for macroscopic and microscopic morphological analyses, as well as Gram staining, auxin and gibberellin production tests, and phosphate solubilization assays. The seeds were inoculated with the selected bacterial strains and subsequently monitored. All data from the assays were statistically analyzed using ANOVA. A total of 12 rhizospheric soil samples were obtained, from which 28 bacterial isolates were initially identified. The 15 strains with the highest colony-forming unit (CFU) potential were selected, and among these, 5 were the most outstanding at different stages. Germination showed a percentage of $93.3 \pm 5.8\%$; leaf length averaged 2.670 ± 0.370 mm, leaf width 5.75 ± 1.57 mm, diameter at 105 days 49.51 ± 6.61 mm, height 32.85 ± 5.68 mm, and diameter at 265 days 62.46 ± 13.59 mm. In vitro analyses showed indole production of 20.105 ± 3.449 mg/L, gibberellin biosynthesis of $18,512.500 \pm 3,363.664$ mg/L, and phosphate solubilization efficiency of 235.299 ± 118.846 %. In this context, the association between *Agave* and rhizobacteria represents a promising bio-stimulant strategy to mitigate potential damage caused by biotic and abiotic factors, thereby reducing significant losses.

Keywords: Plant growth-promoting microorganisms, CFUs, conservation, phytohormones, phosphate-solubilizing microorganisms.

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a la Universidad Autónoma de Querétaro, particularmente a la Facultad de Ciencias Naturales, por las facilidades otorgadas para la realización de este trabajo de investigación.

Extiendo mi sincero reconocimiento y especial agradecimiento al Dr. Juan Antonio Hernández Valencia, docente de la Licenciatura en Horticultura Ambiental y director de esta tesis, por su excelente y apasionada dedicación; por brindarme su valioso apoyo, orientación y asesoramiento en cada etapa del proyecto. Agradezco igualmente por haberme permitido el uso de los materiales y las instalaciones del laboratorio durante la fase experimental, así como por su acompañamiento constante, tanto personal como académico y financiero, el cual fue esencial para el desarrollo exitoso de esta investigación.

Quiero expresar mi gratitud a mis compañeros y amigos Frida María Uribe, Salma Daniela Hernández, Marco Antonio Velázquez y Patricia, por su invaluable apoyo, compañía y colaboración a lo largo de esta investigación. Su presencia constante y disposición para ayudar fueron fundamentales desde el inicio hasta la conclusión de este proyecto.

Mi más profundo agradecimiento a mis padres, por su amor incondicional y paciencia durante toda mi trayectoria estudiantil. Gracias por enseñarme que la honestidad, la perseverancia y el trabajo arduo siempre rinden frutos invaluables. Son mi mayor ejemplo de dedicación y la muestra más clara de que siempre se puede alcanzar más

DEDICATORIA

A mis amados padres que durante todo este trayecto jamás los vi rendirse, porque gracias a ellos soy la persona que soy, y su lucha le ha dado significado y valor a este proyecto, sin su ayuda y esfuerzo esto nunca habría sido posible y eso permanecerá en mi corazón durante toda mi vida. A mis abuelos porque su amor incondicional siempre lo sentí presente aun en la distancia. Para mi abuelita María Elena, porque sus ilusiones con tanto cariño de verme finalizar este proceso siempre me impulsaron a seguir adelante, gracias por ser ese ser humano tan hermoso por dentro y por fuera y enseñarme cuales son las raíces de mi persona. A mi querido director, tutor y amigo Juan Antonio, por haberse acercado a mí en un momento donde yo no tenía ninguna certeza de cual era mi camino y él fue una guía imprescindible para llegar hasta aquí, gracias Doctor, por haber puesto su confianza en mí durante todo este tiempo a pesar de que en ocasiones el panorama no parecía positivo, por toda su paciencia, entrega y su manera de dirigirme en esta etapa para que fuera más amena, por todas esas pláticas que tuvimos desde un lugar de respeto y acompañamiento, gracias infinitas, sin duda alguna usted ha sido un pilar muy importante durante los últimos años, fue y seguirá siendo un honor poder aprender de usted tanto académicamente como personalmente. A mis entrañables amigos Frida, Salma, Marco, Andrea, Paola, Elian, que me sostuvieron durante la carrera universitaria en momentos donde me quería venir abajo y se mantuvieron presentes y firmes para mí, gracias por todos aquellos momentos invaluable que compartimos. A todas aquellas personas que creyeron en mí aunque no las cite textualmente, gracias por ser esa luz en mi camino para poder seguir adelante, lo que viví fue una experiencia inolvidable que me quedara marcada, llena de aprendizaje donde estuve rodeada de cariño y fe.

ÍNDICE

1	INTRODUCCIÓN	10
2	MARCO TEÓRICO	14
2.1	<i>Agave montana</i> Villarreal	14
2.1.1	Descripción taxonómica	14
2.1.2	Descripción morfológica	14
2.1.3	Hábitat y distribución	15
2.2	Importancia del género agave	16
2.2.1	Usos del género agave	16
2.2.2	Importancia ecológica	19
2.2.3	Conservación del género agave	21
2.2.4	Conservación <i>in situ</i>	22
2.2.5	Conservación <i>ex situ</i>	24
2.2.5.1	Bancos de germoplasma	25
2.2.5.2	Jardines botánicos	25
2.3	Suelo rizosférico	26
2.3.1	Rizobacterias promotoras de crecimiento vegetal (RPCV)	27
2.3.2	Mecanismos promotores vegetales	28
2.4	Mecanismos directos	29
2.4.1	Fijación de nitrógeno	29
2.4.2	Solubilización de fosforo	29
2.4.3	Producción de fitohormonas	30
3	ANTECEDENTES	32
4	JUSTIFICACIÓN	37
5	HIPÓTESIS	38
6	OBJETIVOS	39
6.1	Objetivo general	39
6.2	Objetivos específico	39
7	METODOLOGÍA	40
7.1	Obtención del suelo rizosférico	40
7.2	Aislamiento de bacterias	40
7.3	Pruebas iniciales de identificación de bacterias	40
7.3.1	Identificación morfológica macroscópica	41
7.3.2	Identificación morfológica microscópica	41
7.3.3	Pruebas de KOH al 3 % para la determinación de Gram positivo y Gram negativo	43

7.3.3.1	Preparación de Reacción de KOH al 3 %.....	43
7.4	Inoculación de <i>A. montana</i>	43
7.4.1	Inoculación de las semillas	43
7.4.2	Monitoreo del efecto de la inoculación	44
7.5	Evaluación de la capacidad para la síntesis de hormonas de crecimiento vegetal	44
7.5.1	Producción de indoles	44
7.5.2	Producción de giberelinas	45
7.6	Solubilidad del fósforo	45
7.7	Análisis estadístico	46
8	RESULTADOS Y DISCUSIONES	47
8.1	Obtención del suelo y aislamiento de las bacterias rizosféricas	47
8.3	Pruebas de identificación inicial de bacterias	52
8.3.1	Identificación morfológica macroscópica	52
8.3.2	Identificación morfológica microscópica	56
8.4	Pruebas de Gram	60
8.5	Monitoreo del efecto de la inoculación	61
8.5.1	Efecto de la inoculación de rizobacterias en la germinación	61
8.5.2	Monitoreo posterior a la germinación	63
		70
8.6	Síntesis de hormonas de crecimiento vegetal	70
8.6.1	Evaluación de la producción de indoles	70
8.6.2	Producción de giberelinas	71
8.7	Solubilidad de fósforo	73
9	CONCLUSIÓN	74
10	LITERATURA CITADA	75

ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro 1.	Usos de los agaves.....	17
Cuadro 2.	Áreas Naturales Protegidas.....	22
Cuadro 3.	Investigaciones acerca del efecto de bacterias promotoras de crecimiento en los agaves.....	31
Cuadro 4.	Colecta de suelos rizosféricos.....	48
Cuadro 5.	Morfología obtenida de las bacterias aisladas de <i>Agave montana</i>	53
Cuadro 6.	Clasificación microscópica de las rizobacterias aisladas.....	57
Cuadro 7.	Características de bacterias Gram positivas y Gram negativas obtenidas de <i>Agave montana</i>	61
Cuadro 8.	Resultados de la germinación de semillas de <i>A. montana</i> inoculadas con RPCV.....	63
Cuadro 9.	Evaluación de plántulas inoculadas durante los primeros 90 días.....	65
Cuadro 10.	Evaluación de plantas inoculadas a los 105 y 265 días.....	69

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.	<i>Agave montana</i>	14
Figura 2.	Distribución del <i>Agave montana</i> en la Sierra Madre Oriental.....	15
Figura 3.	Fotografías y distribución de tres especies de murciélagos nectarívoros presentes en el noreste de México.....	19
Figura 4.	Áreas Naturales Protegidas en México que conservan Agaváceas y Nolináceas.....	23
Figura 5.	Descripción macroscópica de colonias microbianas.....	41
Figura 6.	Determinación de morfología microscópica.....	43
Figura 7.	Primer aislamiento de bacterias rizosféricas.....	51
Figura 8.	Rizobacterias seleccionadas.....	52
Figura 9.	Indoles producidos por las bacterias.....	72
Figura 10.	Producción de giberelinas.....	73
Figura 11.	Eficiencia de la solubilidad de fósforo.....	74

1 INTRODUCCIÓN

México es centro de origen y diversificación del agave. Dentro del territorio crecen 150 de las 200 especies existentes representando el 75%, además de 36 taxa específicos, 58% de sus especies son endémicas de México (García-Mendoza, 2002), por lo anterior México no solo es el centro de mayor riqueza y endemismo, sino también su centro de domesticación (Gentry, 1982). Su uso se remonta a hace más de 10, 000 años, cuando los pueblos recolectores-cazadores de Meso y Aridoamérica comenzaron a seleccionar las variedades, para producir bebidas fermentadas, destiladas (llamadas genéricamente mezcales) y alimento entre ellos el mexcalli el cual saciaba la necesidad de buscar comida durante días por su alto nivel nutricional (Illsley et al., 2009).

La estrecha relación entre los mexicanos y el Agave permanece hasta hoy. Estas plantas satisfacen varias necesidades de los pobladores de zonas áridas y semiáridas del país, brindando un soporte económico como el que generan las industrias tequileras, mezcaleras y de fibras naturales (Esqueda et al., 2011). Actualmente los tallos, quíotes, bases de las hojas y flores son parte de la dieta en muchas regiones del país. Así mismo, es base de la industria de bebidas ancestrales como el pulque y el aguamiel (Servicio Nacional de Inspección y Certificación de Semillas, 2017).

El *A. montana* es una especie descubierta en la Sierra Madre Oriental (Villareal, 1996; García, 2007; Továr-Cárdenas, 2024) El *A. montana* ha sido estudiada en el territorio de Querétaro en la Sierra del doctor, donde sus habitantes acostumbran consumir los diferentes órganos de la especie, principalmente la flor, práctica que pone en riesgo la variabilidad genética de este agave, es por esto que es importante realizar prácticas de conservación, incluyendo aquellas que aceleren la adaptación y el crecimiento de

las plantas a través de diferentes tecnologías, como lo es la inoculación de bacterias promotoras de crecimiento.

Los microorganismos promotores de crecimiento, los cuales pueden ser bacterias u hongos, permiten el crecimiento de las raíces, la disponibilidad de minerales y eficiencias en la utilización de nutrientes en las áreas de la rizosfera para aumentar el crecimiento de las plantas (Antonius et al., 2021; Gafur et al., 2007; Langefeld-Heyser et al., 2007).

En esta investigación se hará un uso específico de las rizobacterias promotoras de crecimiento vegetal, las cuales son bacterias benéficas del suelo capaces de producir fitohormonas, de diluir y mineralizar fosfatos, así como de fijar de manera simbiótica el nitrógeno atmosférico y de producir sideróforos y antibióticos en beneficio de la planta (Vessey, 2003).

Es importante la obtención y evaluación de los microorganismos de la rizosfera de los agaves, como en el caso de Medina-de la Rosa et al. (2023), evaluaron las comunidades bacterianas de la rizosfera, asociadas con *Agave lechuguilla* Torr, para conocer el efecto promotor del crecimiento, además de la evaluación de aminoácidos y metabolitos producidos en los exudados radicales. Por otra parte, la mayoría de los agaves se pueden propagar de manera asexual, debido a la facilidad con la que se obtiene el material vegetal, sin embargo, es también importante indagar en técnicas utilizadas en propagación sexual, debido a la conservación de la variabilidad genética, como lo presentan en su investigación Campos-Ruiz et al. (2024), quienes evaluaron el efecto de *Azotobacter spp.* y *Azospirillum spp.* sobre el porcentaje de germinación de semillas de dos especies de la familia Agavaceae: *A. angustifolia* Haw y *A.*

potatorum Zucc., evaluando tres períodos de inoculación, obteniendo hasta un 55 % de aumento en la tasa de germinación para *A. angustifolia*.

La alternativa del uso de las rizobacterias promotoras de crecimiento es necesaria para la producción agronómica sostenible, donde se reemplazan los fertilizantes sintéticos, los cuales son dañinos para el medio ambiente. En un estudio realizado por Bautista-Cruz y Martínez-gallegos (2021), se evaluó al *A. potatorum*, una especie comercial de alta demanda de fijación de nitrógeno, que es uno de los macronutrientes más necesarios para el crecimiento de la planta, a partir de tres cepas de rizobacterias *A. potatorum*, *Burkholderia cepacia*, *Flavobacterium* sp., *Paenibacillus amylolyticus* y un control (sin bacterias promotoras de crecimiento). Se comprobó que las 3 cepas aumentaron la biomasa total de la planta.

Estos microorganismos desempeñan un papel fundamental en ambientes áridos oligotróficos y con baja disponibilidad de agua como las que predominan en los desiertos (Gamalero et al., 2020). Debido a las condiciones ambientales extremas, la vegetación de estos ecosistemas, como es el caso de *A. montana*, requiere de mecanismos adicionales que le permitan asegurar su supervivencia. En este contexto las RPCV pueden favorecer en la absorción de nutrientes.

Por tanto, frente a los desafíos ecológicos, agronómicos y de conservación que enfrenta *A. montana*, se vuelve indispensable explorar estrategias que favorezcan su propagación, desarrollo y adaptación en ambientes extremos. En este sentido, el presente trabajo tuvo como finalidad inocular al *A. montana* con rizobacterias promotoras del crecimiento que contribuyan a su conservación, evaluando su efecto sobre la germinación de sus semillas y el crecimiento inicial de la planta. Esta

investigación busca sentar las bases para prácticas sustentables que permitan el aprovechamiento y la protección de esta especie endémica en riesgo.

2 MARCO TEÓRICO

2.1 *Agave montana* Villarreal

2.1.1 Descripción taxonómica

Reino: *Planta*

División: *Magnoliophyta*

Clase: *Liliopsida*

Orden: *Asparagales*

Familia: *Agaváceae* o *Asparagaceae*

Subfamilia: *Agavoideae*

Género: *Agave*

Subgénero: *Agave*

Especie: *A. montana* Villarreal

Nombre común: Maguey de montaña

2.1.2 Descripción morfológica

Esta especie es una agavácea multianual de rosetas hemisféricas compactas que van de 1.40 a 1.65 m de diámetro y de 0.90 a 1.25 m de alto, posee 84 a 112 hojas por planta, que van de cóncavas a casi planas y miden de 30 a 40 cm de largo y 15 a 17 cm de ancho. Inflorescencia de 3 a 4.5 m de alto, ovoide, con alrededor de 30 ramillas florales, de 25 a 35 cm de largo, ubicadas en las 2/5 partes superiores del escapo (Figura 1). La especie se distingue de las demás especies porque posee rosetas de aproximadamente 1.5 m de diámetro, sus hojas son color verde amarillento y por poseer un borde dentado en sus brácteas (Villarreal, 1996).

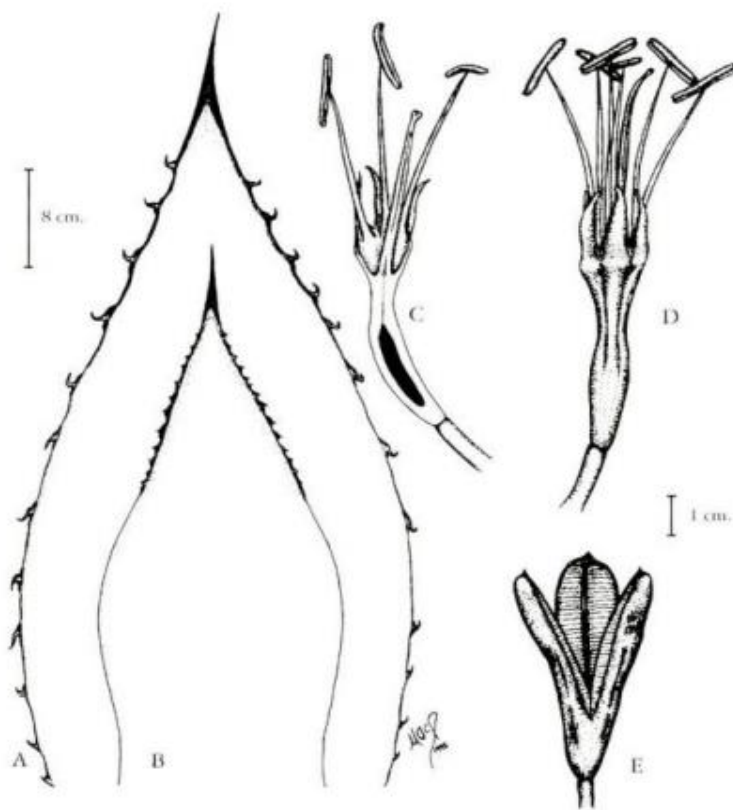


Figura 1. *Agave montana*. A. Hoja. B. bráctea. C. flor, corte longitudinal. D. flor y E. capsula (Villarreal, 1996).

2.1.3 Hábitat y distribución

El agave está distribuido en la Sierra Madre Oriental, en los límites de los estados de Coahuila, Nuevo León, Tamaulipas y parte de Querétaro dentro de los bosques de pino- encino entre los 3,200-3,400 msnm (metros sobre el nivel del mar) (Villarreal, 1996) (Figura 2).

Es una especie de distribución restringida en la cima de la Sierra de la Marta, en matorral bajo de *Arcostaphylos pungens*, *Ceanothus buxifolius*, *Pinus culminicola*, *P. hartwegii*, *Quercus greggii*, *Ceanothus greggii*, *Cercocarpus* sp, entre otras (González-Álvarez, 2005).

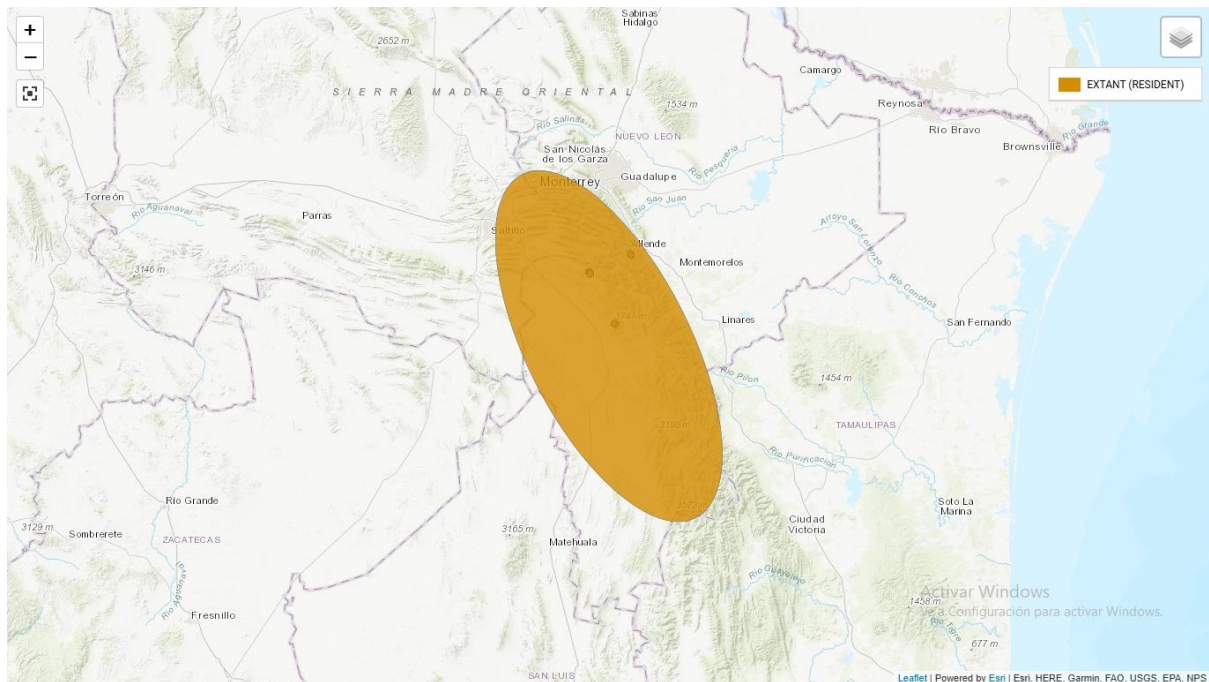


Figura 2. Distribución del *Agave montana* en la Sierra Madre Oriental (IUCN & RL, 2018).

2.2 Importancia del género agave

2.2.1 Usos del género agave

De acuerdo a estudios etnobotánicos actuales, se tiene el conocimiento de que los agaves son utilizados en todas la categorías antropocéntricas de uso y todas sus estructuras morfológicas, ya que a partir de estas se derivan productos como las fibras, las bebidas fermentadas en base a la savia como lo es el pulque, de su inflorescencia, de los jugos de las hojas frescas o cocidas (tallo y base de las hojas) y las bebidas destiladas como el mezcal y el tequila (Bahre y Bradbury, 1980; Gentry, 1982; Guerrero, 1985; Parsons y Parsons, 1990; Colunga-GarcíaMarín y May-Pat, 1993; Valenzuela, 1994; García-Mendoza, 1998).

El *A. montana* tiene algunos usos específicos en la sierra del Doctor, Querétaro, donde los tallos, hojas y especialmente las flores de esta especie, son consumidas por los habitantes de la comunidad. En el cuadro 1 se mencionan algunos de los diversos usos de los agaves.

Cuadro 1. Usos de los agaves (García et al., 2010).

Categorías	Usos	Órgano de la planta
Construcción	• Cercas, casas y corrales • Tejas: Canales para coleccionar agua de lluvia • Materiales compuestos: resinas termoplásticas o termófilas y fibras.	• Escapo floral (quite). • Hojas. • Residuos de fibra.
Fibras	• Cordelería y cestería. Escobetillas y cepillos para limpieza. Estropajos, tejido y vestuario.	• Fibras de hoja.
Ornamentales	• Arcos florales • En jardines y calles.	• Fibras de las hojas. • Planta completa.
Domésticos	• Jabón o detergente para trastes y ropa. • Macetas y recipientes para agua.	• Hojas, tallos y raíces. • Hojas, tallos (piña).
Otros usos	• Industria química, farmacéutica, medicamentos y productos esteroides (saponinas). • Productos de celulosa para papel. Producción de etanol, celulosa y glucosados.	• Hojas, raíces, tallo y semillas. • Hojas (pulpa, residuos de desfibramientos, bagazo) y jugos.

Productos y partes de la planta empleada de los agaves para la producción y uso de distintos materiales y alimentos consumidos y empleados por el humano.

2.2.2 Importancia ecológica

En México las especies de agave tienen una gran importancia ecológica, ya que son componentes principales en los ecosistemas áridos y semiáridos entre otros, los cuales predominan en gran parte del territorio. Los agaves retienen el suelo y la humedad, lo que promueve la infiltración del agua. De la misma manera brinda refugio a especies de reptiles, principalmente lagartijas y serpientes, que controlan plagas dentro del ecosistema (Torres- García et al., 2019). Además, cuando están en su etapa de floración actúan como atractores de especies melíferas (abejas) y nectarívoras benéficas (aves, murciélagos y otros pequeños mamíferos) (Torres- García et al., 2019).

Los murciélagos son uno de los grupos de mamíferos más vulnerables a nivel mundial. En México más de la cuarta parte de quiropteroфаuna se encuentra dentro de alguna categoría de riesgo. Especies como Glossophagini (*Phyllostomidae*) se encuentran altamente amenazadas ya que tienen hábitos alimenticios especializados. La principal fuente de néctar para estas especies la consumen directamente de plantas del género *Agave* (*Asparagaceae*) (Gómez-Ruiz, 2020).

El género *Agave* presenta un síndrome de polinización compatible con la quiropterofilia, esto se caracteriza por adaptaciones florales que atraen a los murciélagos, las cuales incluyen la forma y el tamaño de las flores, la producción nocturna del néctar, la calidad del néctar y la concentración de azúcares (Trejo Salazar et al., 2023). Existen relaciones geográficas entre *Agave* spp. y los murciélagos *Leptonycteris nivalis* y *L. yerbabuenae* además de una coincidencia temporal entre la época de floración y la migración (Molina-Freaner y Eguiarte, 2003; Moreno-Valdez et al., 2004). Un estudio sobre la evolución de las distintas especies

del subgénero *Agave* propone que los murciélagos tuvieron un papel muy importante se menciona a las especies de *L. nivalis* y *L. yerbabuenae* (Good-Avila et al., 2006). El murciélago magueyero mayor (*L. nivalis*) migra entre corredores de agaves siguiendo su floración y lo hace con mayor frecuencia en zonas con más diversidad de agaves ubicadas en las cadenas montañosas de la Sierra Madre Oriental (Gómez-Ruiz y Lacher, 2017) (Figura 3).

La pérdida de la diversidad genética de los agaves puede influenciar directamente en la reducción de las poblaciones de murciélagos, aumentando su vulnerabilidad a los cambios ambientales actuales (Gómez-Ruiz, 2020).

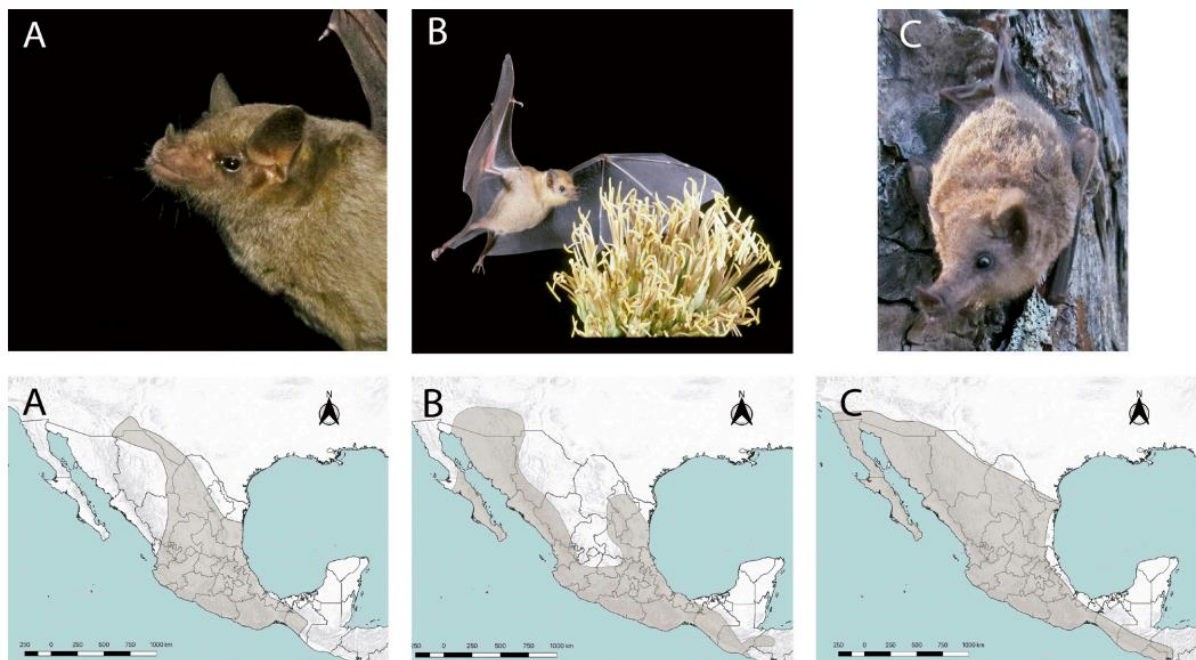


Figura 3. Fotografías y distribución de tres especies de murciélagos nectarívoros presentes en el noreste de México. *L. nivalis* (Foto: Emma P. Gómez-Ruiz, Polígono de distribución: Bat Conservation International), B) *L. yerbabuenae* (Foto: J. Scott Altenbach, Polígono de distribución: Unión Internacional para la Conservación de la Naturaleza), C) *Choeronycteris mexicana* (Foto: Emma P. Gómez Ruiz, Polígono de Distribución: Unión Internacional para la Conservación de la Naturaleza).

2.2.3 Conservación del género agave

El género *Agave* es endémico de América. Dependiendo del autor, en México, se estiman de 201 a 205 especies, además 36 taxas infraespecíficas (García-Mendoza 2002). Esto representa un 80 % de especies de este género en el territorio mexicano, no solo es el centro de mayor riqueza, también es su centro de domesticación (Gentry 1982).

Estas plantas han sido utilizadas para múltiples fines a lo largo de la historia de la humanidad y en la actualidad son fuente de materias primas para industrias importantes (Gentry, 1982; Eguiarte-Frums y González-González, 2007). La mayor parte de la diversidad genética de los agaves es utilizada por agricultores tradicionales, específicamente para el autoconsumo y para comercialización. Generalmente estos agricultores emplean una gran cantidad de variedades locales manteniendo una diversidad genética, en contraste con las agroindustrias las cuales restringen mucho este uso manteniendo una diversidad limitada y malos manejos (Bellon *et al*, 2009).

Entre las principales amenazas antropogénicas que afectan la conservación de los agaves están presentes (Franco, 1995):

- a) La destrucción y modificación de los hábitats a causa de la expansión de las industrias agrícolas, forestales y ganaderas, el sobrepastoreo, la expansión de la mancha urbana y la construcción de vías de comunicación.
- b) La explotación o el uso no sostenible de las especies debido al mal manejo basado en esquemas de alta demanda lo que provoca su desaparición.
- c) Colecta excesiva con fines de comercialización o consumo.

Actualmente varias especies de *Agave* se encuentran amenazadas debido al manejo mencionado, por lo que la Norma Oficial Mexicana NOM 059-SEMARNAT-2010 incluye a 18 de ellas en la lista de plantas en peligro en la categoría de amenaza o sujetas a protección especial (Perez Molphe-Balch *et al.*, 2012). Esto ha ocasionado que ciertas poblaciones de especies silvestres se vean afectadas, por la disminución de la producción de semillas, esta anomalía ha repercutido en la estructura poblacional, tamaño y regeneración natural de las mismas (Franco Martínez, 1995).

Para que se haga una buena conservación de las especies es necesaria la estabilidad en todos los niveles, desde los ecosistemas hasta el acervo genético y la interrelación entre estos niveles. Se han establecido diversas estrategias de conservación a nivel nacional e internacional que se dividen en dos categorías: *in-situ* y *ex-situ* (Franco Martínez, 1995).

2.2.4 Conservación *in situ*

Se refiere a la conservación de las especies en sus hábitats y áreas de distribución natural (Hernández, 1994) en México sería el equivalente a las Áreas Naturales Protegidas.

En 1983 se estableció el sistema nacional de áreas protegidas en México (SINAP) conformado por 6 categorías (Cuadro 2) según la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (2023).

Cuadro 2. Áreas Naturales Protegidas (CONABIO, 2023)

Categoría	Número	Extensión (km2)
Reservas de la Biosfera	45	777,615.30
Parques Nacionales	66	14,113.19
Monumentos Naturales	5	162.69
Áreas de Protección de Recursos Naturales	5	162.69
Áreas de Protección de Fauna y Flora	40	69,968.64
Santuarios	18	1,501.93
Total	182	908,395.20

México cuenta con 185 Áreas Naturales Protegidas (ANP) de carácter federal, conservándose en 30 de ellas algunas especies de Agavaceae (Figura 4). Cabe destacar que la mayoría de estas ANP no cuentan con inventarios botánicos completos, los cuales son necesarios para la planeación de acciones de conservación (Martínez, 1995).

Existen algunas medidas de acción indirectas que se deben implementar en la periferia de las ANP para definir y planear estrategias y políticas de conservación *in situ*, Franco Martínez (1995) sugiere las siguientes:

- La instrumentación de acciones tales como el establecimiento de programas de protección de la flora y vegetación.

- Planes de recuperación y repoblamiento de especies y la eliminación de actividades como el desmonte.
- Sobrepastoreo, la colecta de especies raras, y la regulación de algunas actividades humanas (urbanización, turismo, etc.).

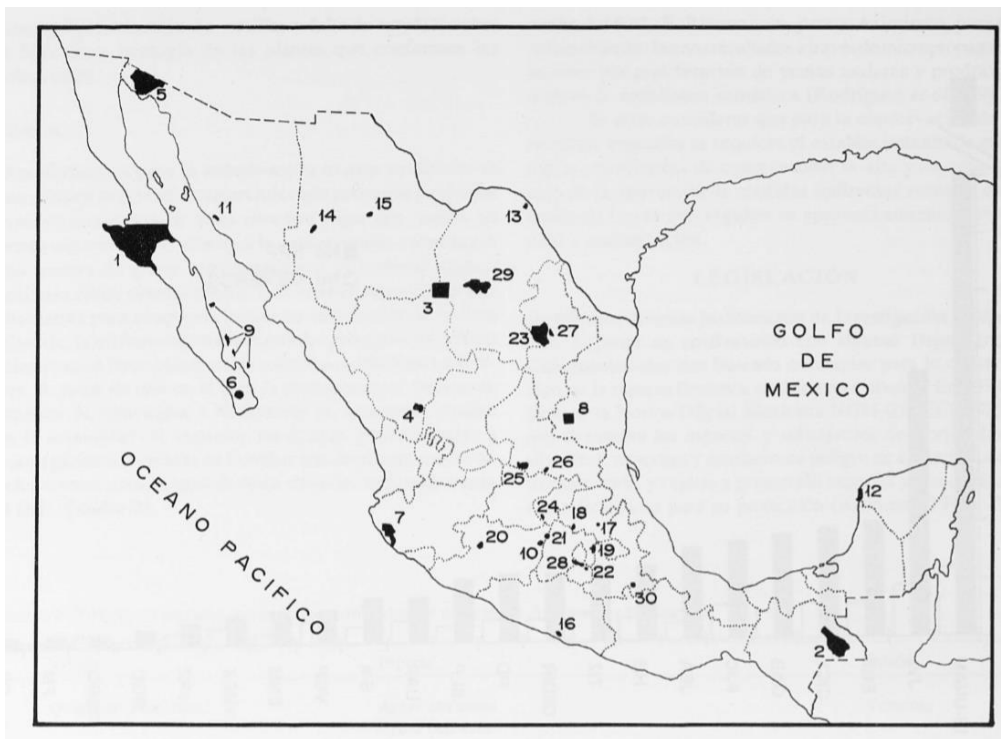


Figura 4. Áreas Naturales Protegidas en México que conservan Agaváceas y Nolináceas (Modificado de: Instituto Nacional de Ecología, 1995).

2.2.5 Conservación *ex situ*

La conservación *ex situ* tiene el objetivo de conservar a las especies fuera de su hábitat y áreas de distribución natural (Hidalgo, 1994). Las estrategias que se emplean permiten la preservación de ejemplares importantes para la biodiversidad vegetal en zonas reducidas (Hernández, 1994), manteniendo los germoplasmas ya sea en forma de plantas enteras (jardines botánicos) o en bancos de genes, semillas, tubérculos o propágulos, (bancos de germoplasma) (Hong et al., 1998; Franco, 2008).

2.2.5.1 Bancos de germoplasma

La estrategia más utilizada para conservar el material vegetal es el banco de semillas o *Index seminum*. Diferentes Jardines Botánicos Nacionales cuentan con colecciones de semillas, material destinado para la propagación y para la reposición de ejemplares en las colecciones científicas (Hidalgo, 1996).

2.2.5.2 Jardines botánicos

En los jardines botánicos se tienen colecciones de plantas vivas bajo su resguardo a largo plazo (Vovides *et al.*, s.f.). de acuerdo con Meilleur (1977) las colecciones se dividen en 2 categorías:

- Colecciones de conservación.

Son muestras representativas de especies pertenecientes a un grupo genético con germoplasma saludable, de origen conocido y previamente documentadas. El resguardo de esta categoría se basa en evitar la extinción y para la propagación de ejemplares, restauración ecológica y reintroducción (Meilleur, 1997). Están ligadas a investigaciones científicas desde análisis moleculares para la determinación y la conservación genética (Chase & Fay, 1997), hasta actividades prácticas de horticultura tradicional para su propagación y cultivo en las condiciones adecuadas (Cooke, 1998).

- Colecciones con valor de conservación.

Conjuntos de plantas poco comunes que se utilizan para la investigación relacionada a su preservación. Tienen un valor educativo y cultural alto (Meilleur, 1997).

2.3 Suelo rizosférico

El término de rizosfera se originó de las palabras griegas *rhiza* (raíz) y *sphaira* (esfera o entorno de influencia). Fue propuesto por Hiltner en 1904, para describir el volumen del suelo que rodea las raíces de las plantas vivas (Hartmann et al., 2009). Esta región abarca aproximadamente de 1 - 2 mm desde la superficie de la raíz, está colonizada por un microbioma sorprendentemente diverso, influenciado en gran medida por los compuestos orgánicos exudados por las raíces (Tilman et al., 2011). La exudación modifica las propiedades químicas y físicas del suelo y, por lo tanto, regula la estructura de la comunidad microbiana en las zonas cercanas a la raíz (Dakora y Phillips, 2002).

Existen tres componentes principales que interactúan entre sí dentro de la rizosfera: el suelo rizosférico, el rizoplaneo y la raíz misma. El rizoplaneo constituye la superficie de la raíz, e incluye las partículas del suelo adheridas a ella (Barea et al., 2005).

La rizosfera desempeña un papel fundamental en la productividad vegetal, ya que facilita procesos metabólicos como la descomposición de materia orgánica y el ciclo de nutrientes, haciendo estos compuestos disponibles para la planta (Tilman et al., 2011). Es necesario que esta zona radicular se mantenga activa para asegurar procesos como el aumento de la velocidad de descomposición de materia orgánica, la exudación de compuestos solubles, la absorción de agua, la organización de nutrientes por parte de los microorganismos y plantas, así como la liberación de dióxido de carbono producto de la respiración (Dijkstra et al., 2013).

Cada especie vegetal emite señales específicas en el suelo rizosférico, lo que implica que la diversidad vegetal que se encuentra sobre la superficie está vinculada directamente a la diversidad del suelo rizosférico (Dijkstra et al., 2013).

2.3.1 Rizobacterias promotoras de crecimiento vegetal (RPCV)

El microbioma de la rizosfera representa un papel importante para la salud de las plantas (Ahemad y Kibret, 2013). Principalmente está compuesta por bacterias llamadas rizobacterias, que directa o indirectamente, impactan positivamente a la planta. Estos son microorganismos que habitan en la órbita de la superficie radicular, benefician el crecimiento y desarrollo vegetal a través de la producción y secreción de diversas sustancias químicas reguladas en la región de la rizosfera, son denominadas como rizobacterias promotoras de crecimiento vegetal (RPCV) y se caracterizan por las siguientes distinciones inherentes (Ahemad y Kibret, 2013; Kundan et al., 2015):

- i) Deben ser competentes para colonizar la superficie de la raíz.
- ii) Deben tener una alta tasa de supervivencia, multiplicarse y competir con otro microbiota para asegurar el crecimiento vegetal.
- iii) Deben promover el crecimiento de las plantas (Kloepper, 1994).

Se ha demostrado que las asociaciones de RPCV, varían de acuerdo con el grado de proximidad que tengan con la raíz y su intimidad de asociación (Gray y Smith, 2005). Estos microorganismos pueden estar ubicados extracelularmente (eRPCV), en el suelo rizosférico, en el rizoplaneo, o en los espacios entre las células de la corteza de la raíz, además, también existen las bacterias intracelulares (iRPCV), que se localizan dentro de las células de la raíz, en estructuras nodulares especializadas (Figueiredo et al., 2011).

Algunos ejemplos de géneros de bacterias promotoras de crecimiento vegetal extracelulares son: *Agrobacterium*, *Arthrobacter*, *Azotobacter*, *Azospirillum*, *Bacillus*,

Burkholderia, *Caulobacter*, *Chromobacterium*, *Erwinia*, *Flavobacterium*, *Micrococcous*, *Pseudomonas* y *Serratia*, entre otras (Bhattacharyya y Jha, 2012). Entre las bacterias promotoras de crecimiento vegetal intracelulares podemos mencionar a: *Allorhizobium*, *Azorhizobium*, *Bradyrhizobium*, *Mesorhizobium* y *Rhizobium*. De acuerdo con los análisis se afirma que la mayoría de las rizobacterias intracelulares pertenecen a los bacilos Gram negativos (Bhattacharyya y Jha, 2012). Por otra parte, los actinomicetos también están presentes y entre ellos se encuentran de manera destacable *Micromonospora sp.*, *Streptomyces spp.*, *Streptosporangium sp.* y *Thermobifida sp.*, los anteriores han demostrado tener un gran potencial como agentes de biocontrol (Bhattacharyya y Jha, 2012).

De acuerdo con Ehrlich (1990), las principales funciones de estas bacterias son: i) suministrar nutrientes a las plantas, ii) estimular el crecimiento de las plantas iii) controlar o inhibir la acción de los patógenos sobre las plantas, iv) fortalecer la estructura del suelo y, v) bioacumulación o lixiviación microbiana de compuestos inorgánicos.

2.3.2 Mecanismos promotores vegetales

La promoción de crecimiento vegetal influida por las RPCV se genera mediante la transformación de toda la actividad microbiana dentro de la rizosfera a través de la producción de diversas sustancias (Kloepper y Schroth ,1981). Los mecanismos por los cuales estos microorganismos estimulan el crecimiento se clasifican en directos e indirectos (Kundan et a., 2015).

2.4 Mecanismos directos

El mecanismo directo de acción de las RPCV representa la vía fundamental para la estimulación del crecimiento vegetal. Mecanismo en el que se incluye la fijación de nitrógeno, producción de fitohormonas, el aumento de la disponibilidad de hierro y la solubilización de fosfatos (Kundan et al., 2015).

2.4.1 Fijación de nitrógeno

El nitrógeno es el nutriente más esencial para la productividad y crecimiento de las plantas. Se tiene el conocimiento de que este elemento está presente en un 78% dentro de la atmósfera, pero para ser disponible para las plantas debe ser fijado biológicamente (FBN), ya que de esta manera el nitrógeno se transforma en amoníaco y este proceso se realiza a través de microorganismos fijadores de nitrógeno, por medio del complejo nitrogenasa (Kim & Rees, 1994).

Microorganismos fijadores de nitrógeno: principalmente bacterias pertenecientes a los géneros *Azospirillum*, *Alcaligenes*, *Arthrobacter*, *Acinetobacter*, *Bacillus*, *Burkholderia*, *Enterobacter*, *Erwinia*, *Flavobacterium*, *Pseudomonas*, *Rhizobium* y *Serratia*, los cuales colonizan la rizosfera (Tilak et al., 2005).

2.4.2 Solubilización de fosfato

El fósforo es el segundo nutriente limitante con gran importancia al respecto del crecimiento vegetal, está presente en grandes cantidades en el suelo, en formas orgánicas e inorgánicas, pero la cantidad de formas disponibles para las plantas es generalmente baja (Khan et al., 2009). Este nutriente se encuentra en formas insolubles, presente inorgánicamente como la apatita y orgánicamente como el

fosfato de inositol, fosfomonoésteres y fosfotriésteres (Glick, 2012). Esta deficiencia se compensa a través de la aplicación de fertilizantes fosfatados en campos agrícolas. Aunque la desventaja de este tipo de manejo es que la mayoría de las ocasiones la cantidad de fosfato absorbida por las plantas es muy baja, mientras que el resto de los fertilizantes se fija en el suelo en compuestos insolubles (McKenzie y Roberts, 1990). Las plantas únicamente absorben el fosfato como monobásico (H_2PO_4^-) y dibásico (H_3PO_4), la solubilización y mineralización de fosfato es un proceso que las RPCV pueden lograr (Gouda et al., 2018).

Algunos géneros de RPCV solubilizadores de fosfato más importantes son los siguientes: *Azotobacter*, *Bacillus*, *Beijerinckia*, *Burkholderia*, *Enterobacter*, *Erwinia*, *Microbacterium*, *Pseudomonas*, *Erwinia*, *Rhizobium*, *Mesorhizobium*, *Flavobacterium*, *Rhodococcus* y *Serratia* (Obtenio et al., 2015). Estos géneros de bacterias, además de proporcionar P a las plantas estimulan la eficiencia de fijación biológica de nitrógeno (BFN) ya que mejoran la disponibilidad de algunos oligoelementos mediante síntesis de sustancias lo que provoca la estimulación del crecimiento.

2.4.3 Producción de fitohormonas

Las fitohormonas son sustancias orgánicas que actúan a bajas concentraciones (< 1 mM), éstas promueven, modifican o inhiben el crecimiento y desarrollo vegetal (Damam et al., 2016). Existen ciertos grupos de fitohormonas comunes, dentro de ellos están las giberelinas, citoquininas, ácido abscísico, etileno, brasinoesteroides y auxinas (Suresh babu et al., 2016).

La síntesis de la fitohormona auxina (ácido indol-3-acético/ácido indol acético/IAA) que es secretada por rizobacterias influye positivamente en muchos procesos de

desarrollo de las plantas. El IAA endógeno de las plantas es modificado por la absorción de IAA secretado por las RPCV (Glick,2012; Spaepen et al., 2007), además de actuar como una molécula que afecta la expresión génica en varios microorganismos (Spaepen y Vanderleyden, 2011). Hay bacterias productoras de crecimiento que pueden inducir la producción de las fitohormonas (Sureshababu et al., 2016). Estas fitohormonas se clasifican según su tipo de acción:

i) Vigorizantes de raíces

Los vigorizantes de raíces comprenden microorganismos capaces de estimular el crecimiento radical. Estos procesos están regulados por fitohormonas, proceso que esta influenciado por hormonas, en conjunto con vías que perciben y responden a estímulos externos ambientales (Jung et al., 2013), estos microorganismos pueden ser *Pseudomonas putida*, *Enterobacter asburiae*, *Pseudomonas aeruginosa*, *Paenibacillus polymyxa*, *Stenotrophomonas maltophilia*, *Mesorhizobium ciceri*, *Klebsiella oxytoca*, *Azotobacter chroococcum* y *Rhizobium leguminosarum* (Ahemad y Kibret, 2013).

ii) Vigorización de brotes

Los microorganismos que promueven la producción de hormonas cumplen con un papel importante en la vigorización de brotes. Algunas RPCV que estimulan esta característica de crecimiento son *Rhizobium leguminosarum*, *Pantoea agglomerans*, *Rhodospirillum rubrum*, *Pseudomonas fluorescens*, *Bacillus subtilis*, *Paenibacillus polymyxa*, *Pseudomonas sp.* y *Azotobacter sp.* (Prathap y Ranjitha, 2015).

3 ANTECEDENTES

Se presentan estudios en los que se han empleado bacterias promotoras de crecimiento vegetal en diversas especies de agave y sus principales resultados. De acuerdo con ellos se puede confirmar que las BPCV benefician el crecimiento y desarrollo vegetal (Cuadro 3).

Cuadro 3. Investigaciones acerca del efecto de bacterias promotoras de crecimiento en los agaves.

Especie hospedera	Bacterias evaluadas	Variables evaluadas	Principales resultados	Referencias
Tobalá (<i>Agave potatorum</i> Zucc.), sierrudo (<i>Agave</i> spp.), cuishe (<i>Agave</i> spp.) y coyote (<i>Agave</i> spp.)	<i>Enterobacter</i> sp., <i>Bacillus</i> sp., <i>Pseudomonas</i> sp., <i>Acinetobacter</i> sp., <i>Pseudomonas putida</i> .	Número de plantas emergidas por tratamiento, índice de velocidad de emergencia, longitud de la hoja, diámetro de tallo, longitud de la raíz más larga, peso seco de hoja, peso seco de tallo y peso seco de raíz.	- El coinóculo <i>Bacillus</i> sp. + <i>Pseudomonas</i> sp. incrementó el porcentaje y la velocidad de emergencia agave sierrudo y tobalá. <i>Enterobacter</i> sp. + <i>Pseudomonas</i> sp. mostró los mejores resultados en el crecimiento vegetal de las cuatro especies.	Sánchez Mendoza et al., 2018
<i>Agave americana</i>	<i>Rhizobium daejeonense</i> , <i>Acinetobacter calcoaceticus</i> y <i>Pseudomonas mosselii</i>	Crecimiento vegetal y el contenido de azúcar.	- Las cepas de <i>R. daejeonense</i>, de <i>A. calcoaceticus</i> y <i>P. mosselii</i> se consideran BPCV - Cepas con alta fijación de nitrógeno, solubilización de fosfato y biosíntesis de AIA.	(De La Torre-Ruiz et al., 2016).
<i>Agave tequilana</i> Weber var. Azul	<i>Rhizobium</i> sp., <i>Sinorhizobium mexicanum</i> , <i>S. chiapasense</i>	Solubilización de fosfato, Producción de sideróforos, Producción de ácido indol acético (AIA), Producción de celulosa, Actividad de la celulasa, Altura total, peso fresco total,	<i>Rhizobium</i> sp., <i>S. mexicanum</i>, <i>S. chiapasense</i> con potencial como biofertilizantes para la agricultura sustentable. <i>Rhizobium</i> sp. con capacidad de fijación de nitrógeno, solubilización de fosfato, producción de sideróforos, formación de biopelículas y	(Maranto-Gómez et al., 2025).

		peso de piña, número de hojas y contenido de carbohidratos, con datos registrados al momento del trasplante y después de 90 días de crecimiento.	síntesis de celulosa. • <i>S. mexicanum</i> con fijación de nitrógeno y biosíntesis de FeMo-Co. • <i>S. chiapasense</i> con resistencia a fármacos (Mdt A-N), que compiten en la rizosfera. • Todas las cepas revelan una respuesta al estrés, el metabolismo y el transporte de membrana, favoreciendo la resiliencia a la salinidad, el pH y los metales pesados.	
<i>Agave potatorum</i> Zucc.	<i>Burkholderia cepacia</i>, <i>Flavobacterium</i> sp., <i>Paenibacillus amylolyticus</i>	Emergencia de hojas verdaderas, altura de la planta y diámetro de roseta, diámetro del tallo de la planta, el número de hojas desplegadas, el volumen radicular, la densidad radicular, biomasa seca del tallo, biomasa seca y área foliar total.	• <i>Burkholderia cepacia</i> aumentó el volumen de la raíz 322.2%; número de hojas desplegadas 42.6%; y contenido de sólidos solubles del tallo 72.9%. • <i>Paenibacillus amylolyticus</i> incrementó la biomasa seca del tallo 317.1%. • <i>B. cepacia</i>, <i>Flavobacterium</i> sp. y <i>P. amylolyticus</i> incrementaron el diámetro del tallo de la planta aproximadamente en un 50.3%. • <i>B. cepacia</i>, <i>Flavobacterium</i> sp. y <i>P. amylolyticus</i> aumentaron el diámetro de la roseta de la planta 48.6%; área foliar 127.2%; altura de la planta 51.8%. • <i>Flavobacterium</i> sp.	(Bautista-Cruz & Martínez-gallegos, 2020)

			incrementó la biomasa total 164.8%.	
<i>Agave angustifolia</i>	<i>Azospirillum brasilense</i>	Peso de las hojas, el tallo sin hojas y las raíces. Volumen de raíz, piña y hojas. Área foliar. Peso en seco de raíz, piña y hojas.	• <i>Agave angustifolia</i> presentó mayor tasa de crecimiento relativo, el doble de área foliar, volumen radicular, peso fresco de hojas y peso seco de raíces, hojas y piñas.	(Jarquín-Rosal es et al. 2023)
<i>Agave sisalana</i> P.	<i>Pantoea</i> spp., <i>Rhizobium</i> spp., <i>Burkholderia</i> spp., <i>Leifsonia</i> spp., y <i>Bacillus</i> spp.,.	Longitud de la raíz, la altura del tallo y la materia seca de brotes y raíces.	• Presencia de bacterias fijadoras de nitrógeno en todos los tejidos internos de la planta (raíz, tallo, hoja, pecíolo y bulbillos). • Mayores densidades de bacterias fijadoras de nitrógeno en rizosfera, raíces y tallos; las menores en hojas, pecíolos y bulbillos. • <i>Bacillus</i>, se encontró más en hojas y bulbillos mientras que <i>Enterobacter</i> en tallos y pecíolos, <i>Rhizobium</i> predominó en raíces.	(Santos. et al., 2019)
<i>A. angustifolia</i>	<i>Pseudomonas</i> spp., <i>Enterobacter</i> spp., <i>Acinetobacter</i> spp., y <i>Bacillus</i> spp.,	Altura de la planta, número de hojas desplegadas, diámetro del tallo, sólidos solubles en el tallo, peso fresco y seco de hojas, peso fresco y seco de raíces, contenido de P foliar.	• <i>Pseudomonas</i> sp. 1 + <i>Bacillus</i> sp. incrementó 22.98% la altura de la planta, 183.75% el peso fresco de las hojas, 391.44% el peso seco de las hojas, 49.61% el diámetro del tallo, 213.65% el peso fresco del tallo y 193.98% el peso seco de raíces. • Se registraron <i>Pseudomonas</i> sp. 1 + <i>Enterobacter</i> sp. 1,	(Antonio - Revuelta, 2018)

			incrementaron 50% con respecto al control.	
<i>Agave salmiana</i>	<i>Acinetobacter</i> sp., <i>A. baumannii</i> , <i>A. bereziniae</i> , <i>Cronobacter sakazakii</i> , <i>Enterobacter hormaechei</i> , <i>Bacillus</i> sp., <i>Klebsiella oxytoca</i> , <i>Pseudomonas</i> sp., <i>Enterococcus casseliflavus</i> , <i>Leuconostoc mesenteroides</i> subsp. <i>mesenteroides</i> y <i>Gluconobacter oxydans</i> .	Calidad del ADN, análisis de ADN plasmídico.	• <i>Acinetobacter</i> sp. y <i>Bacillus halotolerans</i>, <i>Brevibacillus brevis</i>, <i>Enterobacter cloacae</i>, <i>Erwinia tasmanensis</i> con alto potencial de fijación de N. • <i>Leclercia adecarboxylata</i> produce compuestos antimicrobianos. • Producción de compuestos volátiles <i>Bacillus subtilis</i>, <i>Bacillus tequilensis</i>, <i>Bacillus halotolerans</i>, <i>Brevibacillus brevis</i>, <i>Erwinia tasmaniensis</i>, <i>Leclercia adecarboxylata</i>, <i>Pseudomonas hunanensis</i>, y <i>Pseudomonas putida</i>. • Reducción de los niveles de etileno <i>Acinetobacter</i> sp. <i>Bacillus halotolerans</i>, <i>Enterobacter kobei</i>, <i>Leclercia adecarboxylata</i> <i>Pseudomonas hunanensis</i> y <i>Pseudomonas putida</i>. • Los géneros con una mayor representación en los cinco tipos de agave fueron <i>Bacillus</i> spp., <i>Enterobacter</i> spp. y <i>Leclercia</i> spp.	(Aguado-Santacruz, et al., 2002)

4 JUSTIFICACIÓN

Agave montana Villarreal es una de las 125 agaváceas endémicas de México con gran importancia en la estructura y función de los ecosistemas de alta montaña. Al igual que muchas especies del género *agave* ha comenzado a ser extraída para usos antropogénicos de alto impacto, como lo son la producción de bebidas alcohólicas como el mezcal, y la ingesta de órganos florales en algunas regiones del país.

Dichas prácticas afectan directamente a la viabilidad de sus poblaciones ya que limitan la variabilidad genética por el uso comestible de sus flores y el número de sus ejemplares debido a que es una especie de lento crecimiento, dificultando el éxito de su reproducción y propagación.

En este contexto es de suma importancia desarrollar estrategias de conservación *in situ* y *ex situ*. Una de las alternativas posibles es la aplicación de RBPCV para acortar sus ciclos de desarrollo.

El interés por el estudio de las Bacterias Promotoras de crecimiento Vegetal en pro de los beneficios al *A. montana*, nace de la necesidad urgente de conservar esta maravillosa especie, su presencia es vital para diversos procesos ecológicos que pueden llegar a desaparecer si la especie lo hiciera, como su coevolución con uno de sus principales polinizadores, los murciélagos nectarívoros, además de su papel en la retención del suelo y la humedad.

Más allá de los beneficios que esta especie nos provee como humanidad, *A. montana*, como cualquier ser vivo, merece seguir coexistiendo en este planeta ya que forma parte de la riqueza vegetal con la que tenemos el privilegio de relacionarnos, presenciar y conservar.

5 HIPÓTESIS

Más del 2 % de las bacterias aisladas del suelo rizosférico de *A. montana* en la sierra del doctor, Cadereyta, Qro., presentarán al menos una variable característica como microorganismos promotores de crecimiento vegetal.

6 OBJETIVOS

6.1 Objetivo general

Promover y potenciar el crecimiento del *Agave montana*, por medio de la inoculación de bacterias presentes en el sitio de desarrollo natural de la especie.

6.2 Objetivos específicos

- Obtener y aislar bacterias presentes en la rizósfera de *A. montana*.
- Identificación morfológica de las bacterias aisladas.
- Analizar la respuesta del *A. montana* ante la inoculación de rizobacterias.
- Determinar la capacidad de síntesis de hormonas de crecimiento vegetal de las rizobacterias aisladas.
- Evaluar la influencia de las rizobacterias en la solubilidad de fosfato.

7 METODOLOGÍA

7.1 Obtención del suelo rizosférico

Se realizó el muestreo de la rizosfera de doce ejemplares, diez de *A. montana* y dos de *A. gentryi* distribuidos en la Sierra del Doctor, dentro del cerro del Espolón aproximadamente a 2999 msnm. El suelo muestreado se obtuvo por medio de una pala previamente desinfectada con alcohol al 70 % siguiendo los lineamientos establecidos por la NMX-AA-132-SCFI-2006. Cada muestra se almacenó y se conservó en papel de estraza a 4 °C.

7.2 Aislamiento de bacterias

El aislamiento bacteriano se realizó a partir del suelo rizosférico, siguiendo una metodología que fue adaptada de Castaldi et al. (2021), en base a esto se prepararon las diluciones seriadas donde se tomó 1 g de suelo por cada 10 ml de agua destilada (1:10). En la segunda dilución se tomaron 50 µL por cada 0.45 mL de agua (1:10). Una vez realizadas las proporciones, por medio de la técnica superficial, se sembraron 10 µL de cada muestra en medio de cultivo a base de Agar Luria (Agar LB Miller, marca CONDA) en cajas Petri previamente esterilizadas. El aislamiento consistió en realizar la siembra continua por la técnica de estría cruzada en cajas petri (Han et al., 2020).

Se eligieron las bacterias que predominaron por su tamaño y cantidad de unidades formadoras de colonias (UFCs).

7.3 Pruebas iniciales de identificación de bacterias

7.3.1 Identificación morfológica macroscópica

La identificación morfológica macroscópica se realizó en las bacterias que fueron seleccionadas previamente. A partir de los medios de cultivo en cajas petri con agar se tomaron en cuenta características de determinación propuestas por Rojas-Triviño (2011), como la forma, elevación, margen o bordes de cada colonia. Para esto se posicionó la caja de tal manera que se distinguiera la colonia de abajo hacia arriba, tratando de tener la caja Petri de tal manera que se pudiera distinguir visualmente. La descripción se determinó en base a la figura 5.



Figura 5. Descripción macroscópica de colonias microbianas creciendo en agar nutritivo donde se observa forma, elevación y borde (Rojas - Triviño, 2011).

7.3.2 Identificación morfológica microscópica

Para la identificación morfológica microscópica se tomaron todos los cultivos de bacterias en cajas Petri, dentro de la campana de flujo laminar. En un portaobjetos se adicionó una gota de agua destilada y con un asa bacteriológica esterilizada se tomó una porción de la colonia bacteriana, la cual se suspendió homogéneamente en la

gota de agua para después extenderla sobre la superficie del portaobjetos, se secó la preparación al aire y se fijó pasándolo por el fuego del mechero dos o tres veces.

La muestra fijada se cubrió con azul de metileno durante dos minutos, se lavó con abundante agua destilada y se secó suavemente con papel filtro.

Cada una de las bacterias se observó por medio del microscopio con el objetivo de inmersión (100x). La descripción se realizó en base a la Figura 6 (Cappuccino & Welsh, 2019).

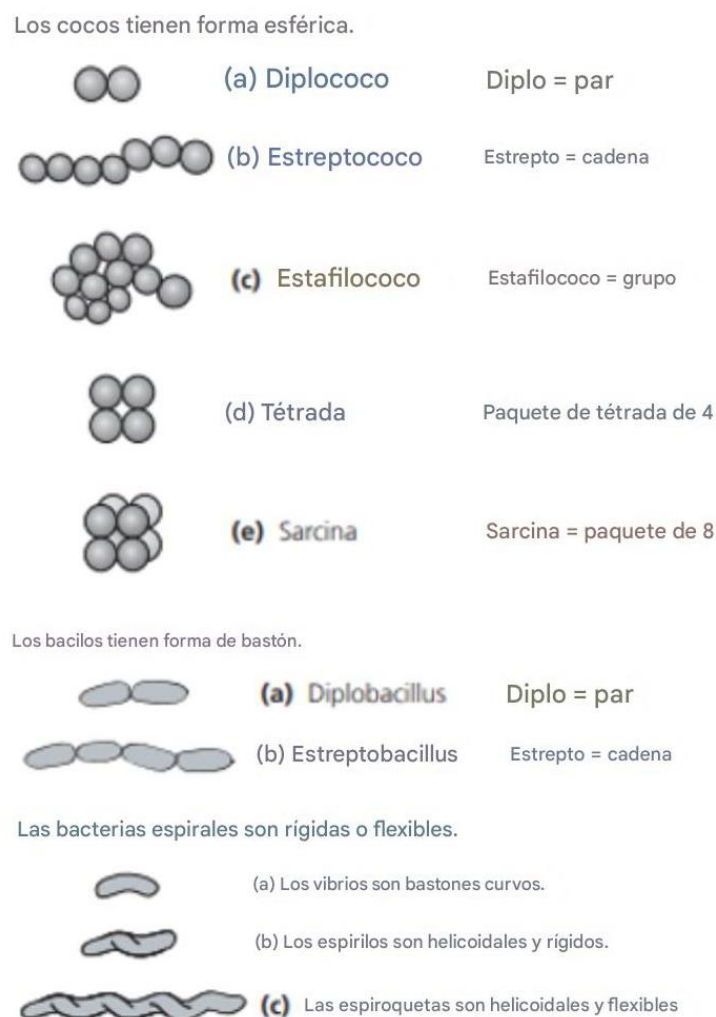


Figura 6. Determinación de morfología microscópica (Cappuccino & Welsh, 2019).

7.3.3 Pruebas de KOH al 3 % para la determinación de Gram positivo y Gram negativo

7.3.3.1 Preparación de Reacción de KOH al 3 %

Se tomaron las 15 bacterias en orden y por medio de una pipeta se adicionó una gota de KOH al 3 % sobre la superficie de un portaobjetos. Con un palillo de madera se tomó una porción de la colonia bacteriana y se extendió de manera homogénea en la gota de KOH, este procedimiento se repitió para cada una de las colonias.

Para la determinación se tomó en cuenta la viscosidad y la presencia de filancia en las bacterias Gram - (negativas), en el caso de las Gram + (positivas) se observó una consistencia acuosa sin presencia de filancia (Rojas - Triviño, 2011).

7.4 Inoculación de *A. montana*

7.4.1 Inoculación de las semillas

Se preparó el sustrato suficiente para llenar 15 charolas a base de Peat Moss con perlita a una proporción de 3:2, una vez llenadas las charolas se desinfectaron con sales cuaternarias a 400 ppm y se dejaron en reposo por 24 horas antes de la siembra de las semillas.

Se reactivaron las 15 bacterias en un medio de cultivo a base de caldo LB (marca CONDA), dejándose reposar por 48 horas en la incubadora a 28 °C. Se seleccionaron 480 semillas de *A. montana* y se inocularon con las 15 diferentes bacterias, a una concentración promedio de 9×10^8 UFC/mL y se mantuvieron en el medio durante 5 minutos. Por medio de la cámara de Neubauer se realizó el conteo de cada colonia bacteriana (Castillo-Reyes et al., 2022)

7.4.2 Monitoreo del efecto de la inoculación

Se realizó un monitoreo de las semillas hasta que comenzaron a germinar y se inició el registro de los datos de cada cotiledón aproximadamente una vez a la semana. Al emerger las hojas verdaderas se inició la medición del largo y ancho de las hojas, y número de hojas, cada 7 días. En la etapa juvenil se comenzó a medir el largo por el ancho y la altura de cada agave, cada 7 días.

7.5 Evaluación de la capacidad para la síntesis de hormonas de crecimiento vegetal.

7.5.1 Producción de indoles

Se reactivaron cada una de las 15 bacterias y por triplicado se inocularon 150 µL de cada uno de los microorganismos en caldo LB suplementado con 100 ppm de L-triptófano. Se dejó en agitación a 180 rpm durante 5 días a 28 °C. Pasados los 5 días se tomó 1 mL de cada cultivo, se centrifugó a 13000 rpm durante 10 minutos. Para el desarrollo del color se utilizó el reactivo de Salkowski, la cual se prepara con 600 mL de H₂SO₄ 18 M y 4.5 g de FeCl₃. Se preparó una mezcla del reactivo de Salkowski con sobrenadante de la muestra centrifugada, en relación 2:1, se colocaron a temperatura ambiente y oscuridad durante 30 minutos, después se procedió a la lectura de las absorbancias a 530 nm. Se realizó una curva a partir del ácido indol-3-acético, con las siguientes concentraciones de 0, 5, 10, 30, 50, 70, 90, 110, 130 y 150 ppm. Para disolver el ácido indol-3-acético en agua, se agregaron unas gotas de alcohol y se agitó por 1 hora (Ortiz-Galeana et al., 2018).

7.5.2 Producción de giberelinas

Cada una de las 15 bacterias se reactivaron en caldo LB y por triplicado se inocularon 150 µL de cada uno de los microorganismos y se incubaron en caldo LB a 28 °C y 200 rpm durante 72 horas.

Luego de las 72 horas se tomaron 2 mL de cada muestra, se colocaron en tubos para centrifuga de 2 mL y se centrifugaron a 13000 rpm durante 10 minutos, después de que se eliminó la biomasa celular, se tomó 1 mL de las muestras y se aforo en tubos de ensayo a 10 mL con una solución de HCl 3.75 M, la cual se agitó vigorosamente de manera manual durante 10 s y se dejó reaccionar por 45 minutos bajo la luz natural, para que se sintetizara el ácido giberélico (AG), esta fase se midió por medio del espectrofotómetro a 254 nm. Se utilizó una curva de calibración de ácido giberélico de 50, 100, 200, 300, 400, 500 y 600 µg/mL, a partir de una solución estándar de AG con etanol al 96 %, se aforaron con HCl 3.75 M y se midió la absorbancia por medio del espectrofotómetro a 254 nm (Rentería et al., 2019).

7.6 Solubilidad del fósforo

En un frasco de 500 mL se añadieron 132 mL de agua destilada y se llevó a ebullición en una parrilla para después agregar 0.75 g de $\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$, 0.007 g de Azul de bromofenol y 2.7 g de Agar bacteriológico. En otro frasco de 100 mL se añadieron 6 ml de agua destilada y 1.5 g de glucosa.

Se tomó un vaso precipitado de 100 mL, se añadieron 12 mL de agua destilada en la que se disolvieron 0.75 g de MgCl_2 , 0.038g de MgSO_4 , 0.03 g KCl y 0.015g $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ para colocarlos en el frasco de 500 mL.

Los tres frascos se esterilizaron a 15 psi durante 15 minutos en la autoclave. Una vez esterilizados se dejaron en reposo durante 30 minutos para después crear una mezcla

homogénea dentro de un espacio estéril. El medio de cultivo se vertió en las cajas Petri y se guardó para su posterior uso.

En las cajas Petri se inocularon por triplicado las 15 bacterias aisladas por la técnica de estriado, se sellaron y se dejaron en periodo de incubación durante 7 días a 21 °C, cuando la coloración azul se fue aclarando o cambio a amarillo (Buono & Ulla, 2016), se midió el halo alrededor de la colonia y se determinó la eficiencia de producción de solubilidad de fosfatos (EP) utilizando la formula propuesta por Clark (2019), donde DH es el diámetro del halo y DC el diámetro de la colonia:

$$EP = \frac{(DH - DC)(100)}{DC}$$

7.7 Análisis estadístico

Para algunas de las variables de respuesta, especificadas en la metodología, se realizó un análisis de varianza (ANOVA) de una vía por Tukey para parámetros individuales con un nivel de significancia de $p < 0.05$ utilizando el paquete estadístico Graph Pad PRISM software, versión 8.0

8 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

8.1 Obtención del suelo y aislamiento de las bacterias rizosféricas

Se obtuvieron diez muestras de la rizósfera de *A. montana* y dos de *A. gentryi* ubicados en el cerro del Espolón a partir del 8 de octubre del 2022 al 16 de mayo del 2023 mostradas en cuadro 4.

Cuadro 4. Colecta de suelos rizosféricos.

Fecha de colecta	Individuo	Fecha	Individuo
08/10/2022	Planta madre 1	03/04/2023	Ejemplar 4
08/10/2022	Ejemplar 2	04/04/2023	Ejemplar 8
08/10/2022	Planta madre 3	05/04/2023	Muestra 681
08/10/2022	Ejemplar 4	15/05/2023	Ejemplar 7
01/04/2023	Ejemplar 2	16/05/2023	Muestra 690
02/04/2023	Ejemplar 3	17/05/2023	Colecta 10

Se muestran en su mayoría suelos de *A. montana* a excepción del individuo “muestra 690” y “colecta 10” que pertenecen a *A. gentryi*.

Se realizó el aislamiento de bacterias (Han et al., 2020), en dónde se obtuvieron 28 UFCs de bacterias del suelo rizosférico (Figura 7). De cada ejemplar se aislaron de dos a tres bacterias, seleccionando aquellas que presentaran una mayor cantidad de UFCs.



Bac-7



Bac-4



Bac-7b



Bac-10



Bac-9



Bac-16



Bac-9b



Bac-17



Bac-15b



Bac-15



Bac-19b



Bac-11



Bac-13



Bac-14



Bac-13b



Bac-17b



Bac-8b



Bac-12b



Bac-8



Bac-12b



Bac-5



Bac-1b



Bac-4



Bac-3b

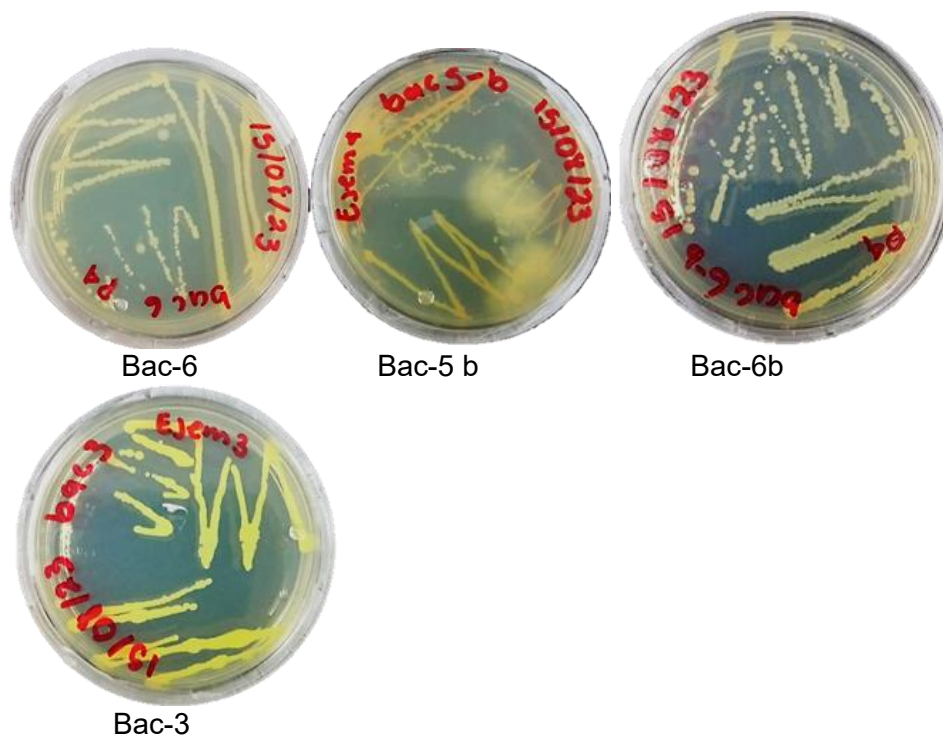
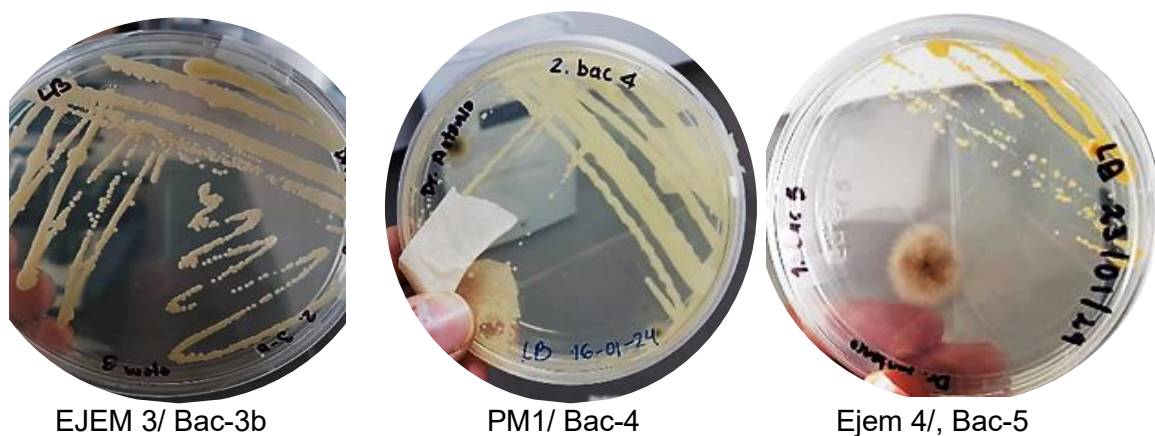
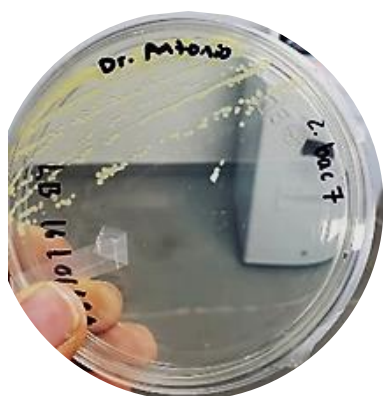


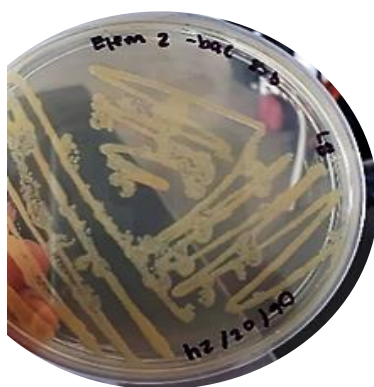
Figura 7. Primer aislamiento de bacterias rizosféricas.

De acuerdo con la capacidad de formación de colonias bacterianas se realizó una segunda selección en la que se tomaron 15 bacterias para su reactivación, además se menciona el ejemplar del que se obtuvo cada bacteria aislada. Estos datos se pueden observar en la figura 8.





P4/ Bac-6b



EJEM 2/ Bac-8b



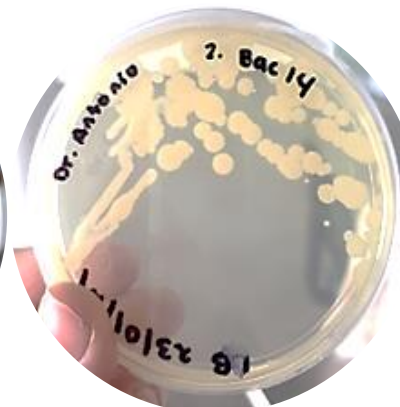
EJEM 2/ Bac-7b



EJEM 3-B/ Bac-11



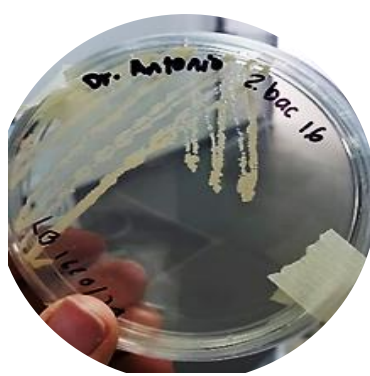
PM 1/ Bac-13b



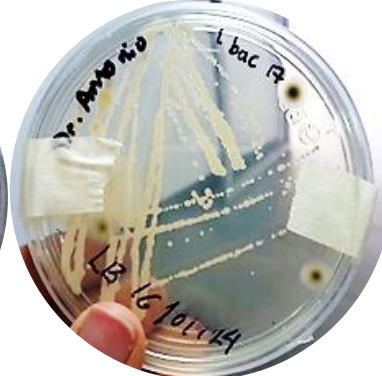
PM 3/ Bac-14b



PM 4/ Bac-15



EJEM 4b/ Bac-16



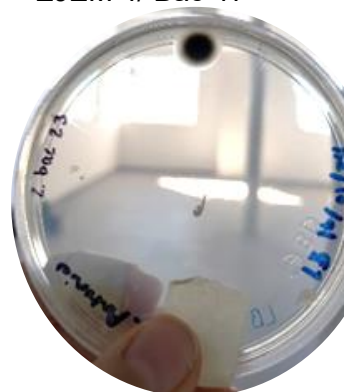
EJEM 4/ Bac-17



Bac-20



Bac-22



Bac-23

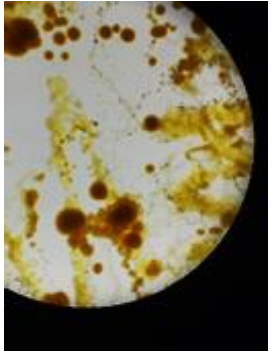
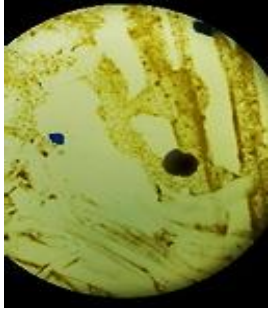
Figura 8. Rizobacterias seleccionadas.

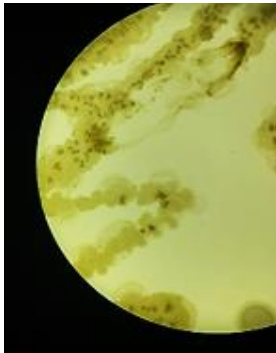
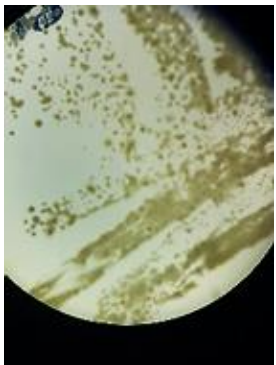
8.3 Pruebas de identificación inicial de bacterias

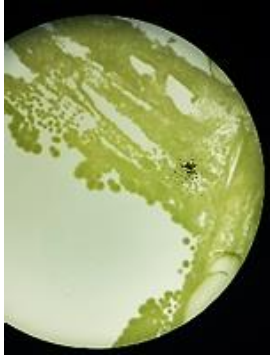
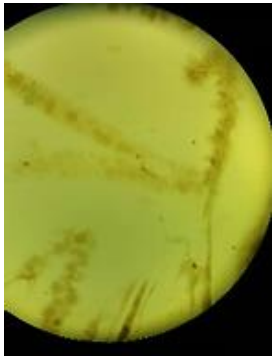
8.3.1 Identificación morfológica macroscópica

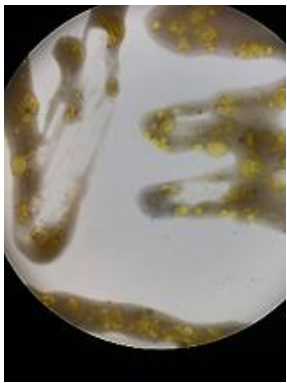
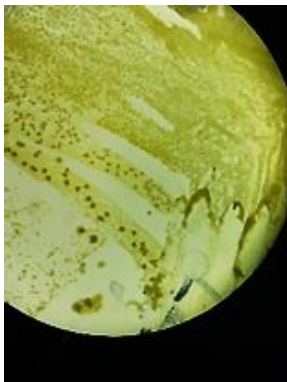
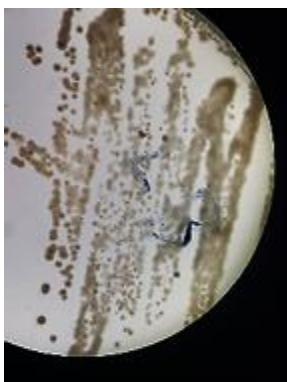
Por medio del estereoscopio se registró (Forma, Borde, Elevación, Superficie y textura) como características de identificación macroscópica las cuales se presentan en el cuadro 5.

Cuadro 5. Morfología obtenida de las bacterias aisladas de *Agave montana*.

Identificación	Forma	Borde	Elevación	Superficie	Textura	Fotografía
Bac-3b	Circular	Entero	Convexa	Brillante Cremosa	Húmedo Traslúcido	
Bac-4	Puntiforme	Entero	Plana	Mate	Mucoide opaca	
Bac-5	Puntiforme	Ondulado	Elevada	Mate	Húmedo Opaca	

Bac-6b	Circular	Entero	Elevada	Brillante Cremosa	Húmedo Traslúcida	
Bac-7b	Puntiforme	Ondulado	Elevada	Mate Cremoso	Mucoide Opaca	
Bac-8b	Puntiforme	Ondulado	Elevada	Mate	Mucoide Opaca	
Bac-11b	Puntiforme	Entero	Elevada	Brillante	Húmedo Opaca	

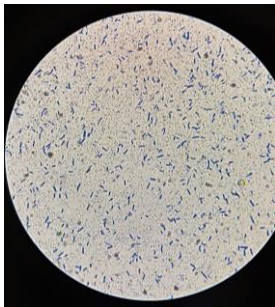
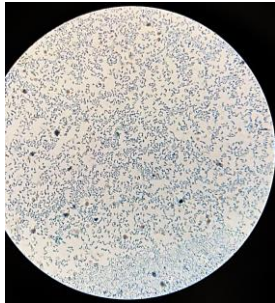
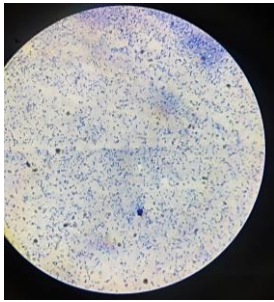
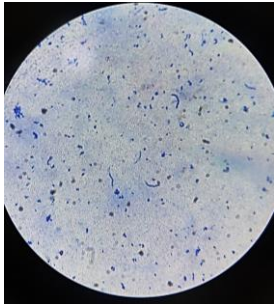
Bac-13b	Puntiforme	Ondulado	Elevada	Brillante	Húmedo	
Bac-14	Puntiforme	Ondulado	Plana	Brillante	Mucoide	
Bac-15b	Irregular	Ondulado	Convexo	Brillante	Húmedo	
Bac-16	Circular	Entero	Elevado	Cremosa Mate	Mucoide Traslúcida	

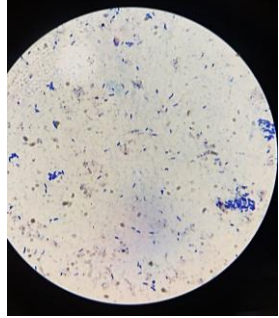
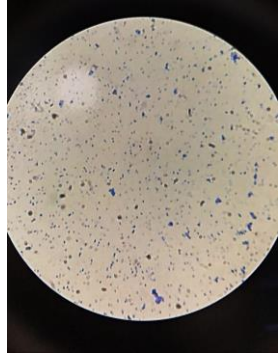
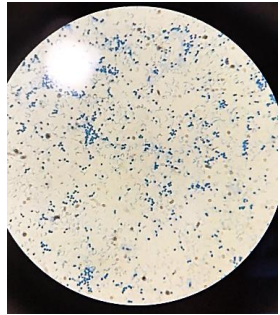
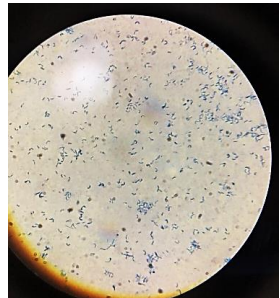
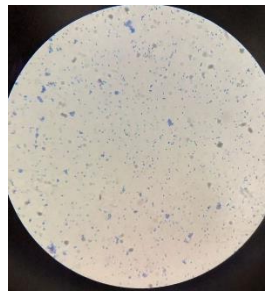
Bac-17	Irregular	Ondulado	Crateriforme	Brillante Cremosa	Húmedo Traslúcido	
Bac-20	Puntiforme	Entero	Convexa	Cremosa Brillosa	Traslúcido o Húmedo	
Bac-22	Circular	Entero	Elevada	Cremosa Brillosa	Traslúcido o Húmedo	
Bac-26	Puntiforme	Entero	Convexa	Cremosa Mate	Traslúcido Húmedo	

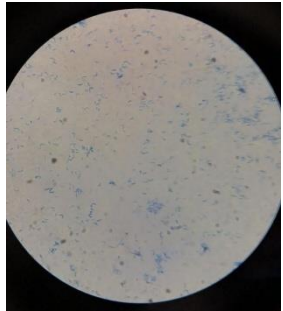
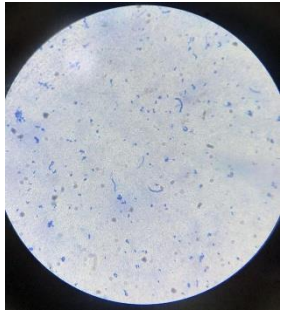
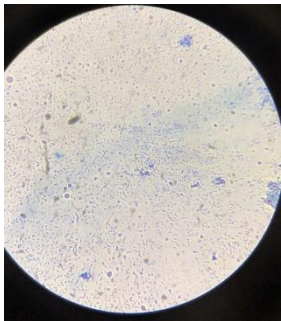
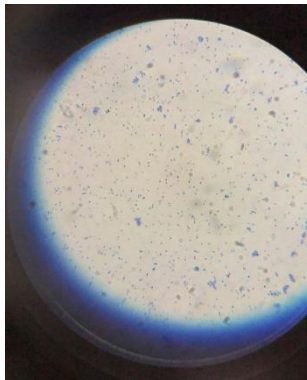
8.3.2 Identificación morfológica microscópica

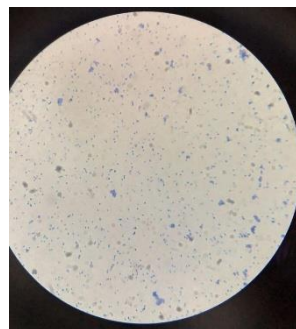
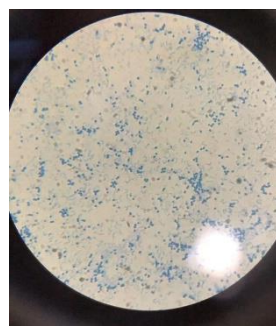
En el cuadro 6 se puede observar la identificación morfológica microscópica y la descripción de cada bacteria según su forma. De acuerdo con los resultados 5 de las bacterias fueron estreptobacilos, 3 bacilos, 5 cocos, 1 espirilo y 1 espiroqueta.

Cuadro 6. Clasificación microscópica de las rizobacterias aisladas.

Bacteria	Identificación	Fotografía
Bac 13 b	Estreptobacilos	
Bac 26	Espirilos	
Bac 7	Estreptobacilos	
Bac 22	Estreptobacilos	

Bac 13	Bacilos	
Bac- 3b	Bacilos	
Bac 17	Cocos	
Bac 8b	Espiroquetas	
Bac 6 b	Cocos	

Bac 11	Estreptobacilos	
Bac 16	Estreptobacilos	
Bac 15	Bacilos	
Bac 20	Cocos	

Bac 5	Cocos	
Bac 4	Cocos	

Otros estudios han reportado que un gran número de las rizobacterias promotoras de crecimiento vegetal (RPCV), presentan una predominancia en la morfología bacilar como en el caso de Chiranjeevi et al. (2020), donde se aislaron distintas cepas de RPCV y se observó que todas las bacterias a excepción de 1 resultaron ser bacilos, confirmando que son la morfología más común en las rizobacterias promotoras de crecimiento vegetal. De manera similar García-Pérez et al. (2024) reportaron que las cepas *Rhizobium* sp. ACO-34A y *Mesorhizobium* sp. 28A, aisladas de Agave americana en México, presentaron células en forma de bastón con flagelos peritricos

En este estudio se encontraron 8 bacterias pertenecientes a la categoría de bacilos y las otras 7 pertenecen a la categoría de cocos. Aunque las bacterias en forma de coco también pueden ser RPCV de acuerdo con Kalam et al., (2020), se destaca que las bacterias necesitan tener la capacidad de moverse para poder colonizar la rizosfera y competir por nutrientes y espacio, características en las que los bacilos tienen esta ventaja.

8.4 Pruebas de Gram

De acuerdo con las pruebas realizadas se determinó que un 60 % de las bacterias aisladas corresponden a bacterias Gram positivas, mientras que el 40 % restante fueron Gram negativas, estos resultados se presentan en el cuadro 7.

Cuadro 7. Características de bacterias Gram positivas y Gram negativas obtenidas de *Agave montana*

BACTERIA	GRAM (+), (-)	BACTERIA	GRAM (+), (-)
Bac-3b	Gram Positiva	Bacteria 11	Gram Negativa
Bac-4	Gram Negativa	Bacteria 13-b	Gram Positiva
Bac-5	Gram Positiva	Bacteria 14-b	Gram Positiva
Bac-6b	Gram Positiva	Bacteria 15	Gram Negativa
Bac-7b	Gram Negativa	Bacteria 16	Gram Positiva
Bac-8b	Gram Negativa	Bacteria 17	Gram Positiva
Bac-20	Gram Positiva	Bacteria 22	Gram Positiva

Este predominio de bacterias Gram positivas, coincide con un estudio realizado en Corea sobre la biodiversidad de RPCV, donde se seleccionaron 90 cepas aisladas de la rizosfera de distintas especies vegetales en diferentes condiciones, de las cuales el 76 % resultaron ser Gram positivas y el 24 % Gram negativas, donde el género *Bacillus spp.* fue el más representativo (Kim et al., 2011).

8.5 Monitoreo del efecto de la inoculación

8.5.1 Efecto de la inoculación de rizobacterias en la germinación

En el cuadro 8 se pueden observar los resultados de los análisis estadísticos para la germinación de semillas de *A. montana* inoculados con las bacterias rizosféricas, donde se obtuvo una germinación del 90 %, este resultado se observó a partir de los 28 días, en los cuales las bacterias identificadas como Bac-11 (90.0 ± 0.0), 4 (90.0 ± 0.0), 26 (93.3 ± 5.8) y 3b (93.3 ± 5.8) obtuvieron resultados por encima del 90 %, mayores a lo obtenido en el tratamiento de control (70.0 ± 0.0).

Cuadro 8. Resultados de la germinación de semillas de *A. montana* inoculadas con RPCV.

Identificación de la bacteria	Día				
	9	18	21	25	28
Control	50.0 ± 0.0 abc	56.7 ± 5.8 abc	60.0 ± 0.0 abc	70.0 ± 0.0 abc	70.0 ± 0.0 bc
Bac-11	50.0 ± 0.0 abc	63.3 ± 5.8 ab	73.3 ± 5.8 a	80.0 ± 0.0 ab	90.0 ± 0.0 a
Bac-15	63.3 ± 5.8 a	73.3 ± 5.8 a	73.3 ± 5.8 a	80.0 ± 0.0 a	83.3 ± 5.8 ab
Bac-4	46.7 ± 5.8 bc	56.7 ± 5.8 abc	66.7 ± 5.8 ab	83.3 ± 5.8 abc	90.0 ± 0.0 a
Bac-6b	53.3 ± 5.8 ab	63.4 ± 5.8 ab	66.7 ± 5.8 ab	73.3 ± 5.8 ab	73.3 ± 5.8 bc
Bac-7	36.7 ± 5.8 cd	43.3 ± 5.8 cd	50.0 ± 0.0 cd	56.7 ± 5.8 cd	66.7 ± 5.8 c
Bac-8b	56.7 ± 5.8 ab	63.3 ± 5.8 ab	70.0 ± 0.0 a	80.0 ± 0.0 ab	83.3 ± 5.8 ab
Bac-13b	50.0 ± 0.0 abc	53.3 ± 5.8 bcd	63.3 ± 5.8 abc	66.7 ± 5.8 bcd	73.3 ± 5.8bc
Bac-26	36.7 ± 5.8 cd	46.7 ± 5.8 bcd	53.3 ± 5.8 bc	83.3 ± 5.8 bcd	93.3 ± 5.8 a
Bac-17	43.3 ± 5.8 bc	50.0 ± 0.0 bcd	60.0 ± 0.0 abc	83.3 ± 5.8 bcd	83.3 ± 5.8 ab
Bac-5	53.3 ± 5.8 ab	56.7 ± 5.8 abc	66.7 ± 5.8 ab	73.3 ± 5.8 abc	80.0 ± 0.0 abc
Bac-22b	50.0 ± 0.0 abc	56.7 ± 5.8 abc	63.3 ± 5.8 abc	63.3 ± 5.8 abc	73.3 ± 5.8 bc
Bac-3b	20.0 ± 0.0 e	36.7 ± 5.8 de	53.3 ± 5.8 bcd	76.7 ± 5.8 de	93.3 ± 5.8 a
Bac-14	3.3 ± 5.8 f	23.3 ± 5.8 e	43.3 ± 5.8 d	53.3 ± 5.8 e	66.7 ± 5.8c
Bac-20	26.7 ± 5.8 de	36.7 ± 5.8 de	50.0 ± 0.0 cd	76.7 ± 5.8 de	80.0 ± 0.0 abc

Las letras indican las diferencias entre medias usando la prueba de comparaciones múltiples de Tukey ($p=0.05$).

Los resultados obtenidos muestran que las bacterias rizosféricas Bac 26 y 3-b, alcanzaron buenos porcentajes de germinación a los 28 días superiores al control. Este comportamiento coincide con el reportado por García-Pérez *et al.* (2024) en Agave americana, donde las semillas inoculadas con los rizobios nativos (*Mesorhizobium* sp. 28A y *Rhizobium* sp. ACO-34A), presentaron tasas de germinación más elevadas y una velocidad de emergencia mayor a la del control.

8.5.2 Monitoreo posterior a la germinación

En el cuadro 9 se observa la evaluación de las plántulas de *A. montana* inoculadas, durante 90 días se analizaron las variables de la longitud y el ancho de la hoja en cm durante la primera etapa.

Donde los primeros 55 días las bacterias Bac-11 (2.360 ± 0.500), Bac-26 (2.360 ± 0.240) y Bac 3-b (2.350 ± 0.320), obtuvieron buenos resultados con igualdad al control (2.180 ± 0.460), sin embargo, Bac-20 (2.670 ± 0.370), sí tuvo diferencias significativas en esta primera etapa sobre la longitud de la hoja. Respecto al ancho de la hoja no existió una diferencia significativa en los tratamientos.

A partir del día 60 las longitudes de las hojas no presentaron ninguna diferencia significativa en comparación con el control, a excepción de Bac-5 (1.656 ± 0.496) que tuvo resultados más bajos. En cuanto al ancho, todas las bacterias tuvieron igualdad con respecto al control, aunque la Bac-6b (0.498 ± 0.117) presentó mayores resultados que las Bac-14 (0.397 ± 0.149) y Bac-3b (0.397 ± 0.124).

Para el día 75, el largo de las hojas se mantuvo igual para todas las bacterias. De acuerdo con los resultados del ancho de las hojas, el control obtuvo los mejores resultados (0.496 ± 0.183) aunque existe una igualdad con la mayoría de las bacterias a excepción de las bacterias 7 (0.367 ± 0.115) y 3-b (0.372 ± 0.110) con resultados más bajos.

Los resultados a partir del día 90 muestran que la longitud de las hojas fue igual para todos los tratamientos sin diferencias significativas, mientras que para el ancho la bacteria 15 (0.575 ± 0.157) obtuvo los mejores resultados en comparación con las bacterias 11 (0.480 ± 0.158), 6 (0.471 ± 0.145), 7 (0.471 ± 0.169), 20 (0.411 ± 0.133), 14 (0.411 ± 0.133), 3-b (0.412 ± 0.136).

Cuadro 9. Evaluación de plántulas inoculadas durante los primeros 90 días.

ID	Longitud de la hoja (cm)	Ancho de la hoja (cm)
55 días		
Control	2.180 ± 0.460 bc	0.340 ± 0.130 ab
Bac-11	2.360 ± 0.500 abc	0.380 ± 0.110 ab
Bac-15	2.520 ± 0.330 ab	0.420 ± 0.070 a
Bac-4	2.120 ± 0.400 c	0.400 ± 0.080 a
Bac-6b	2.230 ± 0.550 bc	0.410 ± 0.080 a
Bac-7	2.010 ± 0.300 c	0.430 ± 0.050 a
bac-8b	2.070 ± 0.330 c	0.410 ± 0.070 a
Bac-13b	2.000 ± 0.390 c	0.410 ± 0.080 a
Bac-26	2.360 ± 0.240 abc	0.410 ± 0.070 a
Bac-17	2.240 ± 0.240 bc	0.410 ± 0.070 a
Bac-5	2.130 ± 0.250 c	0.390 ± 0.080 a
Bac-20	2.670 ± 0.370 a	0.380 ± 0.070 ab
Bac-14	2.210 ± 0.590 bc	0.300 ± 0.080 b
Bac-3b	2.350 ± 0.320 abc	0.390 ± 0.070 a
Bac-22b	2.230 ± 0.340 bc	0.410 ± 0.070 a
60 días		
Control	1.998 ± 0.764 a	0.427 ± 0.167 ab

Bac-11	2.132±0.670 ab	0.459±0.209 ab
Bac-15	2.246±0.659 ab	0.481±0.159 ab
Bac-4	1.996±0.626 ab	0.444±0.165 ab
Bac-6b	2.074±0.727 ab	0.498±0.117 a
Bac-7	1.774±0.483 ab	0.433±0.166 ab
Bac-8b	1.817±0.485 ab	0.479±0.194 ab
Bac-13b	1.701±0.620 ab	0.440±0.161 ab
Bac-26	1.960±0.478 ab	0.473±0.091 ab
Bac-17	1.923±0.529 ab	0.450±0.110 ab
Bac-5	1.656±0.496 b	0.434±0.116 ab
Bac-14	2.070±0.643 ab	0.397±0.149 b
Bac-3b	1.885±0.543 ab	0.397±0.124 b
75 días		
Control	2.107±0.773 a	0.496±0.183 a
Bac-11	2.073±0.768 a	0.479±0.139 abc
Bac-15	2.153±0.722 a	0.485±0.154 ab
Bac-4	1.948±0.726 a	0.437±0.130 abcde
Bac-6b	1.921±0.759 a	0.457±0.153 abcd
Bac-7	1.625±0.606 a	0.367±0.115 e
bac-8b	1.684±0.684 a	0.422±0.142 abcde
Bac-13b	1.788±0.940 a	0.388±0.139 de
Bac-26	1.830±0.666 a	0.406±0.140 cde
Bac-17	1.702±0.706 a	0.396±0.131 de
Bac-5	1.658±0.544 a	0.410±0.115 bcde
Bac-20	2.094±0.720 a	0.399±0.107 cde
Bac-14	2.074±0.720 a	0.382±0.111 de

Bac-3b	1.820±0.720 a	0.372±0.110 e
Bac-22b	1.829±0.735 a	0.407±0.127 cde
90 días		
Control	2.215±0.800 a	0.500±0.195 abc
Bac-11	2.050±0.744 a	0.480±0.158 bcd
Bac-15	2.290±0.487 a	0.575±0.157 a
Bac-4	2.151±0.455 a	0.540±0.136 ab
Bac-6b	2.019±0.748 a	0.471±0.145 bcd
Bac-7	1.880±0.925 a	0.427±0.145 cd
bac-8b	1.917±0.523 a	0.502±0.111 abc
Bac-13b	1.891±0.379 a	0.514±0.101 abc
Bac-26	2.104±0.399 a	0.518±0.096 abc
Bac-17	2.019±0.417 a	0.526±0.100 abc
Bac-5	1.774±0.394 a	0.524±0.093 abc
Bac-20	1.826±0.841 a	0.471±0.169 bcd
Bac-14	1.701±0.822 a	0.411±0.133 d
Bac-3b	1.579±0.698 a	0.412±0.136 d
Bac-22b	1.895±0.617 a	0.497±0.130 abc

Las letras indican las diferencias entre medias usando la prueba de comparaciones múltiples de Tukey ($p=0.05$).

En el cuadro 10 se muestra el crecimiento de los agaves a partir del día 105 al 265, donde las variables evaluadas fueron el número de hojas, la altura y el diámetro total de la planta, medidos en mm.

En el día 105 hubo diferencias en el número de hojas con respecto al control (3.6 ± 0.7) con las bacterias 7 (3.0 ± 0.0), 13-b (3.0 ± 0.0), 26 (3.0 ± 0.5), 17 (3.0 ± 0.0), 5 (3.1 ± 0.3), 14 (3.0 ± 0.0) y 3-b (3.1 ± 0.3), las cuales obtuvieron resultados menores.

La altura donde la bacteria 11 (21.48 ± 3.57) fue la más destacable a la par que el control (19.40 ± 4.65), existió una diferencia con las bacterias 4 (16.81 ± 3.63), 7 (14.39 ± 2.93), 8-b (17.86 ± 3.50), 26 (15.03 ± 3.65), 17 (16.23 ± 3.05) y 5 (15.82 ± 3.25) mostrando niveles de desarrollo por debajo de las mencionada.

En el diámetro, la bacteria 15 (49.51 ± 06.61) obtuvo mejores resultados a diferencia de las bacterias 4 (38.69 ± 07.65), 6-b (39.46 ± 05.81), 7 (31.62 ± 03.40), 8-b (38.75 ± 06.75), 13-b (35.33 ± 04.86), 17 (40.88 ± 04.22), 5 (33.73 ± 03.50), 3b (40.18 ± 05.30), 22-b (41.01 ± 05.61) y el control (42.72 ± 12.91).

En el número de hojas a partir del día 265, la bacteria 13-b no obtuvo resultados diferenciales con el control, pero sí en comparación con las bacterias 7 (6.1 ± 0.8), 17 (6.4 ± 1.1) y 5 (6.5 ± 1.1).

Para la altura de la planta, la bacteria 4 (32.85 ± 05.68) presentó diferencias significativas en comparación al control y las bacterias 15 (26.65 ± 04.53), 6-b (26.81 ± 05.73), 26 (27.14 ± 04.25), 17 (25.00 ± 03.79), 5 (26.17 ± 04.46), 14 (26.05 ± 06.33) y 3-b (26.83 ± 04.10).

La bacteria 20 (62.46 ± 13.59) tuvo resultados significativos en el diámetro de la planta comparada con el control y las bacterias 15 (60.87 ± 11.16), 6b (54.66 ± 06.01), 7 (56.58 ± 09.72), 8-b (61.44 ± 09.22), 13-b (61.44 ± 06.10), 26 (60.63 ± 09.55), 17 (56.28 ± 08.82), 5 (55.26 ± 08.88) y 14 (63.23 ± 07.93).

Cuadro 10. Evaluación de plantas inoculadas a los 105 y 265 días.

ID	Número de hojas	Altura (mm)	Diámetro (mm)
105 días			
Control	3.6±0.7 a	19.40±4.65 abc	42.72±12.91 b
Bac-11	3.4±0.5 abc	21.48±3.57 a	43.60±06.66 ab
Bac-15	3.5±0.5 ab	19.01±2.94 abcd	49.51±06.61 a
Bac-4	3.2±0.4 abc	16.81±3.63 bcde	38.69±07.65 bcd
Bac-6b	3.3±0.4 abc	19.26±4.30 abcd	39.46±05.81 bcd
Bac-7	3.0±0.0 c	14.39±2.93 e	31.62±03.40 e
bac-8b	3.2±0.4 abc	17.86±3.50 bcd	38.75±06.75 bcd
Bac-13b	3.0±0.0 c	15.50±2.98 e	35.33±04.86 cde
Bac-26	3.0±0.5 c	15.03±3.65 cde	40.88±04.22 bc
Bac-17	3.0±0.0 c	16.23±3.05 e	36.39±04.50 cde
Bac-5	3.1±0.3 bc	15.82±3.25 de	33.73±03.50 de
Bac-20	3.2±0.4 abc	-----	45.02±04.63 ab
Bac-14	3.0±0.0 c	-----	43.79±04.59 ab
Bac-3b	3.1±0.3 bc	-----	40.18±05.30 bc
Bac-22b	3.2±0.4 abc	19.55±3.55 ab	41.01±05.61 bc
265 días			
Control	6.7±1.2 abc	25.91±06.09 bc	62.46±13.59 cd
Bac-11	7.2±1.2 ab	29.29±04.58 abc	67.18±12.76 abc
Bac-15	6.6±0.5 abc	26.65±04.53 bc	60.87±11.16 cd
Bac-4	6.8±0.7 abc	32.85±05.68 a	67.22±11.54 abc
Bac-6b	7.1±0.7 abc	26.81±05.73 bc	54.66±06.01 d

Bac-7	6.1±0.8 c	28.40±06.95 abc	56.58±09.72 d
bac-8b	7.1±0.6 abc	30.70±06.98 ab	61.44±09.22 cd
Bac-13b	7.4±0.7 a	29.73±04.96 abc	61.44±06.10 cd
Bac-26	6.6±0.7 abc	27.14±04.25 bc	60.63±09.55 cd
Bac-17	6.4±1.1 bc	25.00±03.79 c	56.28±08.82 d
Bac-5	6.5±1.1 bc	26.17±04.46 bc	55.26±08.88 d
Bac-20	7.2±0.7 ab	29.09±07.06 abc	74.88±10.30 a
Bac-14	6.9±0.7 abc	26.05±06.33 bc	63.23±07.93 bcd
Bac-3b	6.8±0.7 abc	26.83±04.10 bc	73.10±09.73 ab
Bac-22b	7.0±0.7 abc	27.96±06.20 abc	66.99±10.71 abc

Las letras indican las diferencias entre promedios usando la prueba de comparaciones múltiples de Tukey ($p=0.05$).

En esta etapa de la investigación se evaluó el efecto de la inoculación con las 15 diferentes cepas de rizobacterias promotoras de crecimiento en *A. montana*, durante un periodo de 265 días. Los resultados estadísticos sugieren que cepas específicas tuvieron un mayor efecto en etapas tempranas como en la germinación, dichos efectos fueron cambiando a lo largo del monitoreo sin lograr mantenerse, pero en el proceso otras cepas que en estas etapas tempranas no habían obtenido diferencias significativas las obtuvieron en las últimas etapas de monitoreo.

En los resultados obtenidos en esta investigación la cepa Bac-20 tuvo un efecto significativo de la elongación de la hoja en etapas iniciales, esto concuerda con la investigación de Maranto-Gómez et al. (2025), donde se reportó que la inoculación con *Rhizobium sp.* ACO-34A aumentó significativamente la altura total de *A. tequilana*.

En un estudio donde se evaluó el efecto de bacterias promotoras del crecimiento vegetal sobre el crecimiento de *Agave americana* L. las plantas mostraron un mayor número de hojas con la inoculación de las cepas ACO-40, ACO-140 y ACO-34A

Los resultados que se obtuvieron reflejan un patrón bien establecido, donde se considera que únicamente solo entre el 2 % y el 5 % de las bacterias de la rizosfera promueven el crecimiento vegetal (Antoun y Kloepper, 2001), esto explica porque solo algunas de las bacterias mostraron diferencias significativas sobre el crecimiento, la elongación foliar y el diámetro de la planta en distintas etapas del monitoreo experimental como la 26 y 3-b en la germinación, en la elongación inicial de hojas Bac-20 y en fases posteriores Bac 15 en el ancho de hoja y en el diámetro, lo cual demuestra la complejidad de las interacciones entre la planta y los microorganismos y que existe la probabilidad de que las bacterias que no mostraron resultados en los que se presentará un estímulo, puedan tenerlas en otras especies de plantas..

8.6 Síntesis de hormonas de crecimiento vegetal

8.6.1 Evaluación de la producción de indoles

La figura 9 muestra la gráfica donde se pueden observar los resultados de la presencia de indoles en cada cepa rizobacteriana, donde la bacteria 20 obtuvo la concentración promedio más alta que la mayoría con 20.105 ± 3.449 mg/L, esta muestra una igualdad estadística con las bacterias (expresada en mg/L) Bac 7 (19.219 ± 1.108), Bac 17 (18.439 ± 0.878), Bac 16 (18.07 ± 0.755), Bac 4 (17.489 ± 0.292), Bac 3-b (18.059 ± 3.152) y bac 5 (16.519 ± 1.334).

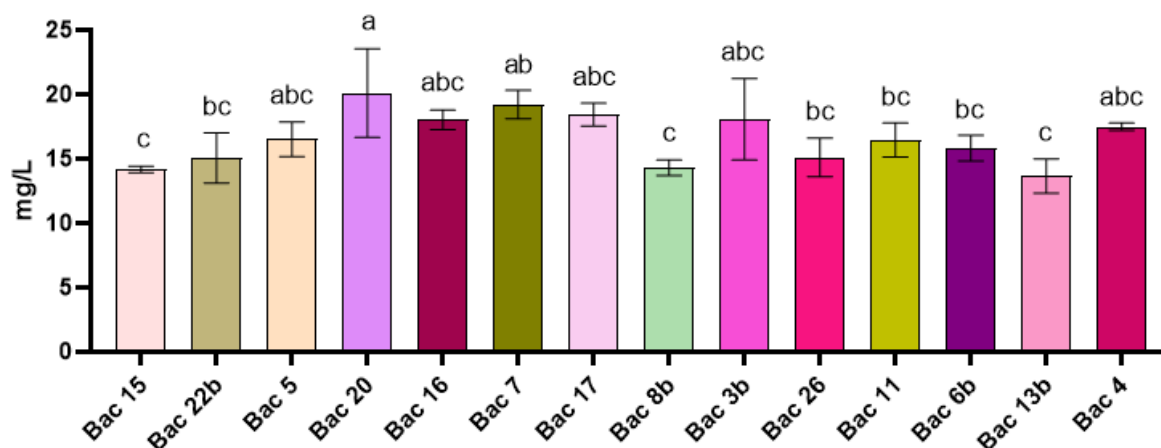


Figura 9. Indoles producidos por las bacterias. El valor está dado en mg de ácido indol-3-acético por L de medio de cultivo. Las letras indican las diferencias entre medias usando la prueba de comparaciones múltiples de Tukey ($p=0.05$).

Estudios realizados con anterioridad han mostrado que la adición de L-triptófano incrementa de manera significativa la síntesis de auxinas en bacterias estimulantes de crecimiento vegetal como en el caso de Troya-Tolosa y Martínez-García (2025), donde se reportaron concentraciones de ácido indol-3-acético (AIA) entre 3 y 50 mg/mL donde también se evidencia que la producción depende de la cepa y las condiciones de cultivo, la bacteria identificada como *Azotobacter spp* presentó niveles de producción de AIA de 48.38 mg/L. De acuerdo con lo anterior, la suplementación con L-triptófano en el medio de cultivo probablemente posibilitó que las rizobacterias tuvieran un gran nivel de producción de compuestos indólicos, esto explica las concentraciones altas en algunas bacterias como la Bac-20.

8.6.2 Producción de giberelinas

En la figura 10 se muestra la gráfica que representa los valores de niveles de giberelinas en cada cepa rizobacteriana, donde la bac-26 resultó tener los valores más elevados con 18512.500 ± 3363.664 mg/L, esta bacteria es estadísticamente igual a las bacterias Bac-3b (1275.000 ± 4250.664), Bac-4 (10241.667 ± 1447.429), Bac-

5 (11408.333±3253.204), Bac-6b (15088.889±3514.747), Bac-7 (17408.333±5048.506), Bac 11 (11165.278±595.605) Bac-13b (10929,167±765.749), Bac-14 (12109.722±2154.043), Bac-5 (12527.778±678.391), Bac-16 (13102.778±5375.094) y Bac-23 (12116.667±572.822).

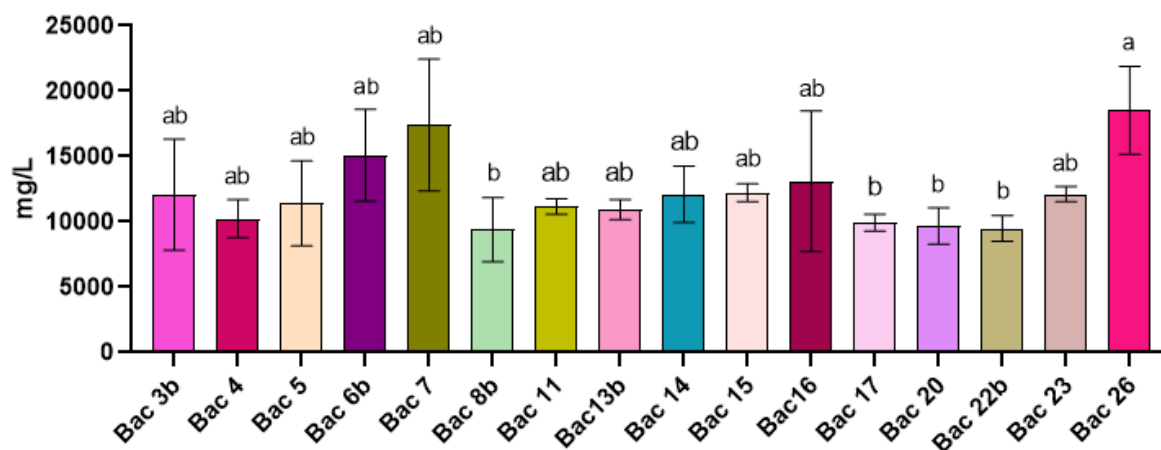


Figura 10. Producción de giberelinas. La cantidad está dada en mg de ácido giberélico por litro de medio de cultivo. Las letras indican las diferencias entre medias usando la prueba de comparaciones múltiples de Tukey ($p=0.05$).

De acuerdo con otras investigaciones como la de Jin-In et al. (2023) y en base a sus resultados se puede comparar que se obtuvo una concentración máxima de giberelinas de 0.00851 mg/L producido por *Pseudomonas frederiksbergensis*, mientras que Valillan et. al 2022, obtuvo como concentración máxima 109250.000 mg/L los cuales fueron producidos por el aislado de *Bacillus cereus* demuestra que los resultados obtenidos en esta investigación están en un rango intermedio que los obtenidos en la literatura.

8.7 Solubilidad de fósforo

De las 15 bacterias analizadas, el halo que indica la solubilización de fósforo, en 10 de ellas no fue detectado, únicamente 5 presentaron el halo indicador, las cuales fueron: Bac-3b que obtuvo una solubilidad de 235.299 ± 118.846 %, siendo estadísticamente igual que Bac-6b con (191.928 ± 92.886 %), estas dos bacterias son significativamente diferentes a Bac-13b (104.080 ± 43.543 %), Bac-17 (78.615 ± 61.065 %) y Bac-26 (83.705 ± 36.759 %).

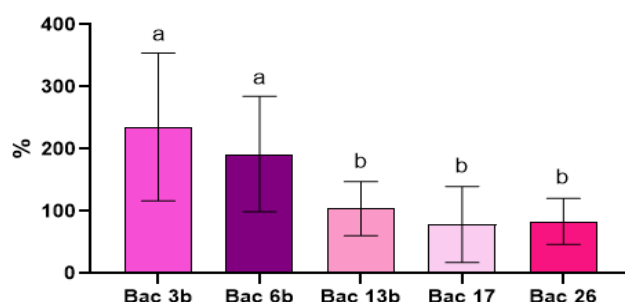


Figura 11. Eficiencia de la solubilidad de fósforo. Las letras indican las diferencias entre medias usando la prueba de comparaciones múltiples de Tukey ($p=0.05$).

Los valores de solubilización de fósforo obtenidos en este estudio son comparables con los reportados por Bakki et al. (2024), donde evaluaron cepas de *Pseudomonas* y *Bacillus* donde se analizaron 16 bacterias de las cuales 5 presentaron valores dentro del rango contenido en este estudio. Además, en otra investigación realizada por Kirui, et. al (2022), hubo un índice de solubilización de fosfatos que va de 114.3 a 588.3 en diferentes cepas de los géneros *Burkholderia*, *Pseudomonas*, *Bacillus*, *Enterobacter*, *Pantoea*, *Paraburkholderia*, *Cronobacter*, *Ralstonia*, *Curtobacterium* y *Massilia*.

9 CONCLUSIÓN

A partir de los resultados se puede concluir que entre las 15 cepas de rizobacterias nativas evaluadas, es posible potenciar el crecimiento del *Agave montana*, evidenciando efectos positivos desde la etapa germinación y desarrollo foliar en la fase juvenil de la planta.

De manera particular, ciertas cepas mostraron efectos más significativos en etapas específicas del agave, pudiendo confirmar que la influencia de microorganismos depende tanto de la cepa como del momento de desarrollo de la planta, sabiendo esto, es posible considerar el uso estratégico de acuerdo con la etapa de respuesta para la propagación y conservación de la especie.

Además de los resultados significativos de rizobacterias *in vivo*, se pudo comprobar mediante técnicas de laboratorio, características destacables presentes en rizobacterias promotoras de crecimiento vegetal, siendo la síntesis de hormonas como indoles y giberelinas, y otras propiedades como lo es la solubilidad de nutrientes esenciales como el fósforo. De acuerdo con lo mencionado se puede sugerir que las cepas 26, 3b, 20, 7 y 15 pueden considerarse bioestimulantes con gran potencial, ejerciendo un efecto positivo sobre el desarrollo vegetal del agave y contribuyendo a la disponibilidad de nutrientes esenciales.

En conjunto el estudio cumple con el crecimiento de *A. montana*, esta estrategia del uso de los microorganismos nativos puede beneficiar el desarrollo de la especie en su hábitat natural y en condiciones controladas. Por otra parte, los hallazgos del funcionamiento en etapas específicas pueden dar pie a la apertura de futuras investigaciones enfocándose en la posible combinación de cepas o la continua aplicación para maximizar su efecto en distintas etapas del desarrollo.

10 LITERATURA CITADA

- Aguado-Santacruz, G.A., Aguado-Rodríguez, D.L., Moreno-Gómez, B., Arroyo-González, D., Centeno-Jamaica, D., Aguirre-Mancilla, C., García-Moya, E. (2022). Endomicrobiota bacteriana de agave pulquero (*Agave salmiana*). I. Aislamiento, frecuencia e identificación molecular. *Revista Fitotecnia Mexicana*, 45(2), 243–254. <https://doi.org/10.35196/rfm.2022.2.243>
- Ahemad, M., Kibret, M. (2013). Mechanism and applications of plant growth promoting shizobacteria: Current perspective. *J. King Saud Univ. Sci.* 26, 1–20. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jksus.2013.05.0011>
- Antonio-Revuelta, B. (2018). Consorcios bacterianos solubilizadores de fosfatos en el desarrollo y crecimiento inicial de maguey espadín (*Agave angustifolia* Haw.) en condiciones de campo [Tesis de maestría, Instituto Politécnico Nacional, Centro Interdisciplinario de Investigación para el Desarrollo Integral Regional, Unidad-Oaxaca].
- Bakki, M., Banane, B., Marhane, O., Esmaeel, Q., Hatimi, A., Ait Barka, E., Azim, K., Bouizgarne, B. (2024). *Las bacterias Pseudomonas y Bacillus solubilizadoras de fosfato, combinadas con fosfatos de roca, promueven el crecimiento del tomate y reducen la enfermedad del cancro bacteriano*. *Frontiers in Microbiology*, 15. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2024.1289466>
- Barea, J.M., Pozo, M.J., Azcon, R., Aguilar, C.A. (2005). Microbial co-operation in the rhizosphere. *J. Exp. Bot.* 56, 1761- 1778. <https://doi.org/10.1093/jxb/eri197>.
- Bautista-Cruz, A., Martínez-Gallegos, V. (2020). Promoción del crecimiento de *Agave potatorum* Zucc. mediante bacterias fijadoras de nitrógeno de vida libre. *Tierra Latinoamericana*, 38(3), Publicación electrónica. <https://doi.org/10.28940/terra.v38i3.647>
- Bellon, M. R., Barrientos-Priego, A.F., Colunga-GarcíaMarín, P., Perales, H., Reyes Agüero, J.A., Rosales Serna, R., Zizumbo-Villarreal, D. (2009). Diversidad y conservación de recursos genéticos en plantas cultivadas. En R. Dirzo, R. González, & I. March (Eds.), *Capital natural de México, volumen II: Estado de conservación y tendencias de cambio* (pp. 355–382). Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (CONABIO).
- Buono, N.I., Ulla, E.L. (2016). Efectos de la inoculación con bacterias solubilizadoras de fosfato en tabaco (*Nicotiana tabacum* L.) y pimiento (*Capsicum annuum* L.) en condiciones controladas. *Revista agronómica del noroeste argentino*, 36(2), 45-54.
- Cappuccino, J.G., Welsh, C.T. (2019). *Microbiology: A laboratory manual* (12.^a ed.). Pearson.
- Castaldi, S., Petrillo, C., Donadio, G., Piaz, F. D., Cimmino, A., Masi, M., Isticato, R. (2021). *Plant Growth Promotion Function of Bacillus sp. Strains Isolated from Salt-Pan Rhizosphere and Their Biocontrol Potential against*

Macrophomina phaseolina. **International Journal of Molecular Sciences**, **22**(7), 3324. <https://doi.org/10.3390/ijms22073324c>

- Castillo Reyes, F., Castillo Quiroz, D., Sáenz Ceja, J.E., Rueda Sánchez, A., Sáenz Reyes, J.T. (2022). Efectos del pretratamiento con *Trichoderma* y *Bacillus* en la germinación de semillas de *Agave victoriae-reginae* T. Moore. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, **13**(69), 60–80. <https://doi.org/10.29298/rmcf.v13i69.844>
- Chase, M.W., Fay, M. F. (1997). “Molecular tools for conservation genetics: an update on recent methods”, en: D. H.Touchell y K. W. Dixon (eds.), *Conservation into the 21st Century*, Proceedings of the 4th International Botanic Gardens Conservation Congress. Londres: Botanic Gardens Conservation International, pp. 155-167.
- Bhattacharyya, P.N., Jha, D.K. (2012). Rizobacterias promotoras de crecimiento vegetal (PGPR): emergencia en la agricultura. *World J. Microbiol. Biotechnol.*
- Dakora, F.D., Phillips, D.A. (2002). Exudados radiculares como mediadores de la adquisición de minerales en ambientes pobres en nutrientes. *Plant soil* **245**, 35-47.
- Damam, M., Kaloori, K., Gaddam, B., Kausar, R. (2016). Sustancias promotoras del crecimiento vegetal (fitohormonas) producidas por cepas rizobacterianas aisladas de la rizosfera de plantas medicinales. *International Journal of Pharmaceutical Sciences Review and Research*, **37**(1), 130–136.
- De La Torre-Ruiz, N., Ruiz-Valdiviezo, V.M., Rincón-Molina, C.I., Rodríguez-Mendiola, M., Arias-Castro, C., Gutiérrez-Miceli, F. A., Palomeque-Dominguez, H., Rincón-Rosales, R. (2016). Effect of plant growth-promoting bacteria on the growth and fructan production of *Agave americana* L. *Brazilian Journal of Microbiology*, **47**(3), 587–596. <https://doi.org/10.1016/j.bjm.2016.04.010>
- Dijkstra, F.A., Carrillo, Y., Pendall, E., Morgan, J.A. (2013). Cebado de la rizosfera: Una perspectiva nutricional. *Front. Microbiol.*, **4**, 216.
- Esqueda-Valle, M., Coronado-Andrade, M.L., Gutiérrez-Saldaña, H.M., Fragoso-Gadea, T. (2011). *Agave angustifolia* Haw. Técnicas para el trasplante de vitroplantas a condiciones de agostadero. Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación. México 20 p.
- Figueiredo, M.V.B., Seldin, L., Araujo, F.F., Mariano, R.L.R. (2011). Plant Growth Promoting Rhizobacteria: Fundamentals and Applications. In: Maheshwari, D. (eds) *Plant Growth and Health Promoting Bacteria*. Microbiology Monographs, vol 18. Springer, Berlin, Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-642-13612-2_2
- Franco-Martínez, I.S. (1995). Conservación in situ y ex situ de las agaváceas y nolináceas mexicanas. *Boletín de la Sociedad Botánica de México*, **57**, 27–36. <https://doi.org/10.17129/botsoci.1474>
- Franco, T. 2008. Los Bancos de germoplasma de las Américas. *Recursos Naturales y Medio Ambiente* N° 53: pag 81 – 84. Bioersivity International–

Internacional de Agricultura Tropical (CIAT). Apartado Aéreo 6713. Cali, Colombia.

- García, A. (2007). Los Agaves de México. Ciencias, 87: 14-23. <https://www.redalyc.org/pdf/644/64408704.pdf>
- García-Herrera, E.J., Méndez-Gallegos, S.J., Talavera-Magaña, D. (2010). El género Agave spp. en México: principales usos de importancia socioeconómica y agroecológica. Producción y aprovechamiento del nopal. Revista Salud Pública y Nutrición, 5, 109-129.
- García-Mendoza, A. (2002). Distribution of the genus Agave (Agavaceae) and its endemic species in Mexico. Cactus and Succulent Journal (US) 74: 177-187.
- García-Pérez, L.G., Rincón-Molina, C.I., Martínez-Romero, E., Rogel, M.A., Tapia-Torres, Y., Manzano-Gómez, L.A., Maldonado-Gómez, J.C., Rincón Molina, F.A., Rincón-Rosales, R. (2024). *Perspectivas genómicas y potencial promotor del crecimiento vegetal de cepas rizobianas de Agave americana*. *Horticulturae*, 10(12), 1370. <https://doi.org/10.3390/horticulturae10121370>
- Gentry S.H. (1982). Agaves of Continental North America. Univ. of Arizona Press. Tucson. 670 p.
- Glick, B.R. (2012). Bacterias promotoras del crecimiento vegetal: mecanismos y aplicaciones. Hindawi Publishing Corporation, Scientifica.
- Gómez-Ruiz, E.P. (2020). *Murciélagos polinizadores del noreste de México*. Biología y Sociedad, primer semestre.
- Gómez-Ruiz, E.P., Lacher, T.E. (2017). Modelling the potential geographic distribution of an endangered pollination corridor in Mexico and the United States. Diversity and Distributions 23:67–78.
- González-Álvarez, M. (2005). *Revisión taxonómica de la sección Salmianae Berger del género Agave L. (Agavaceae)* [Tesis doctoral, Universidad Autónoma de Nuevo León, Facultad de Ciencias Biológicas]. Subdirección de Posgrado.
- Good-Avila, S.V., Souza, V., Gaut, B.S., Eguiarte, L.E. (2006). Timing and rate of speciation in Agave (Agavaceae). Proceedings of the National Academy of Sciences 103:9124–9129.
- Gouda, S., Kerry, R.G., Das, G., Paramithiotis, S., Patra, J. K., Shin, H.-S. (2018). Revitalización de rizobacterias promotoras del crecimiento vegetal para el desarrollo sostenible de la agricultura. *Microbiological Research*, 206, 131–140. <https://doi.org/10.1016/j.micres.2017.08.016>
- Gray, E.J., Smith, D.L. (2005). PGPR intracelular y extracelular: puntos en común y diferencias en los procesos de señalización planta-bacteria. Biología y Bioquímica del Suelo, 37(3), 395–412. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2004.08.029>.
- Han, H., Cai, H., Wang, X., Hu, X., Chen, Z., Yao, L. (2020). Heavy metal immobilizing bacteria increase the biomass and reduce the Cd and Pb uptake by pakchoi (*Brassica chinensis* L.) in heavy metal-contaminated soil.

Ecotoxicology and Environmental Safety, 195, 110375.
doi:10.1016/j.ecoenv.2020.110375

- Hartmann, A., Schmid, M., Van Tuinen, D., Berg, G. (2009). Selección de microbios impulsada por plantas. *Plant Soil*. 321:235–257. doi: 10.1007/s11104-008-9814-y.
- Hernández, G.(1993). *Beaucamea* ¿un género amenazado?. *Cactáceas y Suculentas Mexicanas*, 38: 11-13.
- Hidalgo, H., Rigoberto. (1994). Conservación ex-situ. Centro Internacional de Agricultura Tropical (CIAT), Unidad de Recursos Genéticos, Cali, CO. 11 p.
- Hidalgo, R. (1996). Conservación ex situ. Unidad de Recursos Genéticos, CIAT, Cali, Colombia.
- Hong, T.D., Linington, S.H. Ellis, R.H. (1998). *Compendium of Information on Seed Storage Behaviour*. Volumes 1&2. Royal Botanic Gardens. Kew, Uk
- Illsley, G.C., Giovannucci, D., Bautista, C. (2009). La dinámica de la Territorialidad de la Zona Mezcalera de Oaxaca. Entre la cultura y el comercio. Grupo de Estudios ambientales A.C. México.
- Instituto Nacional de Ecología. (1995). Conservación *in-situ* y *ex situ* de las agaváceas y nolináceas mexicanas. SEMARNAP.
- Jung, H., Janelle, K., McCouch, S. (2013). Llegando a las raíces: genética y hormonal.
- Kalam, S., Basu, A., Podile, A.R. (2020). Functional and molecular characterization of plant growth promoting *Bacillus* isolates from tomato rhizosphere. *Heliyon*, 6(8), 04734. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2020.e04734>
- Khan, M.S., Zaidi, A., Wani, P.A., Oves, M. (2009). Rol de las rizobacterias promotoras del crecimiento vegetal en la remediación de suelos contaminados con metales. *Environ Chem Lett* 7 , 1–19. <https://doi.org/10.1007/s10311-008-0155-0>
- Kim, J., Rees, D.C. (1994). Nitrogenasa y fijación biológica de nitrógeno. *Bioquímica*, 33, 389–397.
- Kim, Y.H., Lee, K.H., Kim, S.D. (2011). Genetic diversity of cultivable plant growth-promoting rhizobacteria in Korea. *Journal of Microbiology and Biotechnology*, 21(6), 563–572. <https://doi.org/10.4014/jmb.1102.02001>
- Kirui, C.K., Njeru, E.M., Runo, S. (2022). Diversity and phosphate solubilization efficiency of phosphate solubilizing bacteria isolated from semi-arid agroecosystems of Eastern Kenya. *Microbiology Insights*, 15. <https://doi.org/10.1177/11786361221088991>
- Kundan, R., Garima, P., Jadon, N., Agrawal, P.K. (2015). Rizobacterias promotoras del crecimiento vegetal: mecanismos y perspectivas actuales. *Revista de Fertilizantes y Pesticidas*, 10(1), 1–15.
- Eguiarte, L., Aguirre-Planter, E., Aguirre, X., Colín, R., González, A., Rocha, M. (2013). From Isozymes to Genomics: Population genetics and conservation of Agave in Mexico. *The Botanical Review*; 79:483p

- Langenfeld-Heyser, R., Gao, J., Ducic, T., Tachd, P., Lu, C.F., Fritz, E., Gafur, A., Polle, A. (2007). Paxillus involutus mycorrhiza attenuate NaCl-stress responses in the saltsensitive hybrid poplar Populus x canescens. Mycorrhiza, 17, 121–131.
- Maranto-Gómez, V.M., Rincón-Molina, Cl., Manzano-Gómez, L.A., Gen-Jiménez, A., Maldonado-Gómez, J.C., Villalobos-Maldonado, J.J., Rincón-Molina, F.A. (2025). Potencial probiótico vegetal de los rizobios nativos para mejorar el crecimiento y el contenido de azúcar en Agave tequilana Weber var. Azul. Horticulturae , 11 (2), 137. <https://doi.org/10.3390/horticulturae11020137>
- Margules, C.R. Nichols A.O. (1988). Selecting networks of reserves to maximize biological diversity. Biological Conservation, 43: 63-76.
- McKenzie, R.H., Roberts, T.L. (1990). *Actualización sobre fósforo en suelos y fertilizantes*. En *Actas del Taller de Ciencias del Suelo de Alberta* (pp. 84–104). Edmonton, Alberta.
- Medina-de-la-Rosa, G.M., López-Lozano, N.E., Alpuche-Solís, A.G., Celis-García, L.B. García-Oliva, F., López-Reyes, L. (2023). Selección de bacterias promotoras de crecimiento vegetal en la rizósfera de Agave lechuguilla Torr. del desierto Chihuahuense. Uso y Manejo del Suelo. Palma-López, D. J., Sánchez-Hernández, R. Ciencia del Suelo, Hacia un conocimiento y multidisciplinario del recurso del suelo, 276-281.
- Meilleur, B.A. (1997). “Conservation collections versus collections with conservation values”, en: D. H. Touchell y K. W. Dixon (eds.), Conservation into the 21st Century. Perth: Botanic Gardens Conservation International, pp. 235-238.
- Molina-Freaner, F., Eguiarte, L.E. (2003). The pollination biology of two paniculate agaves (Agavaceae) from northwestern Mexico: contrasting roles of bats as pollinators. American Journal of Botany, 90(7), 1016-1024. <https://doi.org/10.3732/ajb.90.7.1016>
- Ortiz-Galeana, M.A., Hernández-Salmerón, J.E., Valenzuela-Aragón, B., losSantos-Villalobos, S.d, Rocha-Granados, Ma. del C., Santoyo, G. (2018). DIVERSIDAD DE BACTERIAS ENDÓFITAS CULTIVABLES ASOCIADAS A PLANTAS DE ARÁNDANO (Vaccinium corymbosum L.) cv. Biloxi CON ACTIVIDADES PROMOTORAS DEL CRECIMIENTO VEGETAL. Chilean journal of agricultural & animal sciences, 34(2), 140-151. <https://dx.doi.org/10.4067/S0719-38902018005000403>
- Oteino, N., Lally, R.D., Kiwanuka, S., Lloyd, A., Ryan, D., Germaine, K.J., Dowling, D.N. (2015). Promoción del crecimiento vegetal inducida por aislados endófitos de Pseudomonas solubilizantes de fosfato. *Frontiers in Microbiology*, 6, 745. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2015.00745>
- Pérez-Molphe-Balch, E., Esparza-Araiza, M.J., Pérez-Reyes, M.E. (2012). Conservación *in vitro* de germoplasma de Agave spp. bajo condiciones de crecimiento retardado. *Revista Fitotecnia Mexicana*, 35(4), 339–346.

- Posada-Castaño, A.M., Mejía-Durango, D.P., Polanco-Echeverry, D., Cardona Arias, J.A. (2021). Rizobacterias promotoras de crecimiento vegetal (PGPR): Una revisión sistemática 1990-2019. *Revista de Investigación Agraria y Ambiental*, 12(2), 161–178. <https://doi.org/10.22490/21456453.4040>
- Prathap, M., Ranjitha, K.B.D. (2015). Una revisión crítica sobre las rizobacterias promotoras del crecimiento vegetal . *J. Plant Pathol. Microbiol.* 6 (4), 1–4.
- Rentería-Martínez, M.E., Ochoa-Meza, A., Guzmán-Ortiz, J.M., Barrera-Silva, M. Á., Fernández-Herrera, E., Moreno-Salazar, S.F. (2019). Actividad in vitro de promoción del crecimiento vegetal y control biológico de rizobacterias aisladas de zacate bermuda ruderal. *Revista mexicana de ciencias agrícolas*, 10(2), 311-324. Recuperado de: https://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2007-09342019000200311
- Rizobacterias promotoras de crecimiento vegetal: fundamentos y aplicaciones en: Maheshwari, DK (Ed.) bacterias promotoras del crecimiento y la salud de las plantas. Springer- Verlag, Berlin, Heidelberg, pags 21-42.
- Rojas-Triviño, A. (2011). Conceptos y práctica de microbiología general. Universidad Nacional de Colombia.
- Sánchez-Mendoza, S., Bautista-Cruz, A., Martínez-Gallegos, V. (2018). Fosfobacterias promueven la emergencia y el crecimiento de agaves silvestres [Phosphobacteria promote the emergency and growth of wild agaves]. *Entreciencias: Diálogos en la Sociedad del Conocimiento*, 6(17). <https://doi.org/10.22201/enesl.20078064e.2018.17.63408>
- Santos, A.F. de J., Moreira, Z.P.M., Souza, J.T. de, Oliveira, L.M. de, Barbosa, H.R., Silva, E. de S., Soares, A. C. F. (2019). *Culturable diazotrophic bacterial community associated with Agave sisalana P. plants from semi-arid regions in Brazil.* *Revista de Ciências Agrárias*, 14(3), 10. <https://doi.org/10.5039/agraria.v14i3a5666>
- Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. (2023, enero 23). *Conoce las categorías de protección de las Áreas Naturales Protegidas federales: Son seis categorías establecidas de acuerdo al uso y aprovechamiento sustentable.*
- Sherathia, D., Jadeja, V., Aghera, B., Vasvelia, B., Jethava, B. (2020). *Caracterización de rizobacterias potencialmente promotoras del crecimiento vegetal extraídas de la rizosfera de trigo (Triticum aestivum) de la región de Saurashtra.* *Biosciences Biotechnology Research Communications*, 13(2), 190–197. <https://doi.org/10.21786/bbrc/13.2/49>
- Spaepen, S., Vanderleyden, J. (2011). Auxinas e interacciones planta-microbio. *Cold Spring Harbor Perspectives in Biology*. <https://doi.org/10.1101/cshperspect.a001438>
- Sureshbabu, K., Amaresan, N., Kumar, K. (2016). Sorprendentes propiedades multifuncionales de las rizobacterias promotoras del crecimiento vegetal en el

suelo rizosfera. *International Journal of Current Microbiology and Applied Sciences*.

- Tilak, K. V. B. R., Ranganayaki, N., Pal, K. K., De, R., Saxena, A.K., Shekhar, N., Shilpi, M., Tripathi, A.K., Johri, B.N. (2005). Diversidad de bacterias que favorecen el crecimiento vegetal y la salud del suelo. *Current Science*, 89, 136–150.
- Tilman, D., Balzer, C., Hill, J., Befort, B.L. (2011). Demanda mundial de alimentos e intensificación sostenible de la agricultura. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA*, 108, 20260–20264.
- Torres-García, I., Rendón-Sandoval, F.J., Blancas, J., Casas, A., Moreno-Calles, A.I. (2019). El género *Agave* en los sistemas agroforestales de México. *Botanical Sciences*, 97(3), 263–290.
- Tovar-Cárdenas, A., Gárate-Escamilla, H., Cuéllar-Rodríguez, L.G., Pando-Moreno, M., Yerena-Yamallel, J.I., Jurado-Ybarra, E. (2024). Estado actual de la estructura y composición del bosque de *Pinus culminicola* var. *culminicola* en un gradiente altitudinal en el Cerro El Potosí, Galeana, Nuevo León, México. *Polibotánica*, 58: 65-83. <https://doi.org/10.18387/polibotanica.58.5>
- Trejo-Salazar, R.E., Gámez, N., Escalona-Prado, E., Scheinvar, E., Medellín, R.A., Moreno-Letelier, A., Aguirre-Planter, E., Eguiarte, L.E. (2023). Historical, temporal, and geographical dynamics of the interaction between *Agave* and nectar-feeding bats *Leptonycteris*. *American Journal of Botany*, 110(8), e16222. <https://doi.org/10.1002/ajb2.16222>
- Vasquez-Solis. (2003). Propuesta de Estado de Conservación de Poblaciones del maguey de montaña (*Agave montana* Villarreal). Tesis para obtener el título de ingeniera agrobiología en la Universidad Autónoma agraria Antonio Narro.
- Vessey, K. (2003). Plant growth promoting rhizobacteria as biofertilizers. *Plant and Soil* 255: 571-586.
- Villareal, Q.J.A. (1996). Una nueva especie de “*Agave*” subgénero “*Agave*” (Agavaceae) de México. *SIDA, Contribuciones a la Botánica*, 17(1): 191-195. <https://www.jstor.org/stable/4196096>
- Vovides, A.P., Linares, E., Bye, R. (s.f.). *Jardines botánicos de México: Historia y perspectivas*. Jardín Botánico “Francisco Javier Clavijero”, Instituto de Ecología, A.C.
- Wang, T., Liu, M.-Q., Li, H.-X. (2014). Inoculation of phosphate-solubilizing bacteria *Bacillus thuringiensis* B1 increases available phosphorus and growth of peanut in acidic soil. *Acta Agriculturae Scandinavica B – Soil & Plant Science*, 64, 252-259. <https://doi.org/10.1080/09064710.2014.905624>