

Efecto del uso de biofertilizantes en el desarrollo de plantas de maguey (*Agave salmiana* Otto ex Salm-Dyck) cultivadas bajo condiciones de campo

Effect of biofertilizer use on the development of maguey plants (*Agave salmiana* Otto ex Salm-Dyck) grown under field conditions

Teresa Romero Cortes ^a, Víctor H. Pérez España ^b, José E. Aparicio Burgos ^c,
Martín Peralta Gil ^d, María M. Armendáriz Ontiveros ^e, Jaime A. Cuervo Parra ^f

Abstract:

The pulque agave is used to extract aguamiel, the main ingredient in the production of pulque, a fermented alcoholic beverage. However, its productive potential depends largely on agronomic soil management and the timely supply of essential minerals, which promotes the establishment of vigorous plants and sustainable aguamiel production. This study evaluated the effect of biofertilization on the growth variables of pulque agave plants (*Agave salmiana* Otto ex Salm-Dyck) cultivated under field conditions. Evaluations were conducted 364 days after treatment application. Leaf length, rosette diameter, plant height, number of unfolded leaves per plant, and number of suckers were measured. The experiment was conducted using a completely randomized block design with three replicates. Treatment means were compared using Tukey's test ($p \leq 0.05$) with SAS/STAT[®] software. In general, treatments T8 and T2 showed the highest values: leaf length of (87.60 ± 0.08) cm and (85.68 ± 0.18) cm; rosette diameter of (66.58 ± 0.08) cm and (62.68 ± 0.04) cm; plant height of (78.73 ± 0.15) cm and (75.57 ± 0.25) cm; and number of unfolded leaves of (11.89 ± 0.69) and (11.78 ± 0.19), respectively. These results suggest that balanced fertilization schemes can provide the necessary nutrients to promote adequate agave growth and accelerate its arrival at the productive stage.

Keywords:

Agronomic management, plant growth, *Agave salmiana* Otto ex Salm-Dyck, fertilizers, field conditions

Resumen:

El maguey pulquero se aprovecha para extraer aguamiel, insumo principal para la elaboración del pulque, una bebida alcohólica fermentada. No obstante, el potencial productivo depende en gran medida del manejo agronómico del suelo y del suministro oportuno de minerales esenciales, lo que favorece el establecimiento de plantas vigorosas y una producción de aguamiel sostenible. En este trabajo se evaluó el efecto de la biofertilización sobre las variables de crecimiento de plantas de maguey pulquero (*Agave salmiana* Otto ex Salm-Dyck) cultivadas en condiciones de campo. Las evaluaciones se realizaron 364 días después de la aplicación de los tratamientos. Se midieron la longitud de la hoja, el diámetro de la roseta, la altura de la planta, el número de hojas desplegadas por planta y el número de hijuelos. El experimento se estableció bajo un diseño en bloques completamente al azar, con tres repeticiones. Las medias de los tratamientos se compararon mediante la prueba de Tukey ($p \leq 0.05$) con el software SAS/STAT[®]. En términos

^a Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo | Escuela Superior de Apan | Apan-Hidalgo | México, <https://orcid.org/0000-0002-2615-1435>, Email: romero@uaeh.edu.mx

^b Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo | Escuela Superior de Apan | Apan-Hidalgo | México, <https://orcid.org/0000-0003-2519-8677>, Email: victorhugo_perez@uaeh.edu.mx

^c Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo | Escuela Superior de Apan | Apan-Hidalgo | México, <https://orcid.org/0000-0002-7611-7825>, Email: jose_aparicio@uaeh.edu.mx

^d Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo | Escuela Superior de Apan | Apan-Hidalgo | México, <https://orcid.org/0000-0002-1261-6633>, Email: martin_peralta10391@uaeh.edu.mx

^e Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo | Escuela Superior de Apan | Apan-Hidalgo | México, <https://orcid.org/0000-0002-5273-6576>, Email: maria_armendariz@uaeh.edu.mx

^f Autor de Correspondencia, Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo | Escuela Superior de Apan | Apan-Hidalgo | México, <https://orcid.org/0000-0002-6586-8914>, Email: alioscha@uaeh.edu.mx

generales, los tratamientos T8 y T2 presentaron los valores más altos: longitud de hoja de (87.60 ± 0.08) cm y (85.68 ± 0.18) cm; diámetro de roseta de (66.58 ± 0.08) cm y (62.68 ± 0.04) cm; altura de planta de (78.73 ± 0.15) cm y (75.57 ± 0.25) cm; y número de hojas desplegadas de (11.89 ± 0.69) y (11.78 ± 0.19) , respectivamente. Estos resultados sugieren que esquemas de fertilización equilibrados pueden aportar los nutrientes necesarios para promover un crecimiento adecuado del maguey y acelerar su llegada a la etapa productiva.

Palabras Clave:

Manejo agronómico, crecimiento plantas, *Agave salmiana* Otto ex Salm-Dyck, fertilizantes, condiciones de campo

Introducción

El maguey pulquero constituye un valioso patrimonio biocultural de México desde la época prehispánica y mantiene una relevancia económica significativa por sus múltiples usos y aplicaciones gastronómicas, medicinales, industriales y ornamentales (Onofre-Sánchez et al., 2022; Nava-Cruz et al., 2015; García-Suárez & Serrano, 2021). Esta especie se cultiva principalmente en zonas áridas y semiáridas del país, donde la superficie sembrada puede alcanzar las 8,964.44 ha (SIAP, 2023).

En el estado de Hidalgo, la superficie sembrada de maguey fue de 4,958.01 ha, con una densidad de establecimiento aproximada de 1,500 plantas por ha (SIAP, 2023; Fernández-Galicia et al., 2024). En el estado de Hidalgo cultivan principalmente especies como *Agave americana*, *Agave mapisaga* (incluida la var. Trel), *Agave lechuguilla* y *Agave salmiana* (Figueredo-Urbina et al., 2021). El establecimiento de plantaciones puede realizarse por propagación asexual (hijuelos), por semilla o mediante cultivo *in vitro*; sin embargo, el método más utilizado por los productores es la propagación por hijuelos, es decir, retoños que emergen desde la base y el sistema radical de la planta madre (Vega-García et al., 2023).

En este contexto productivo, particularmente en el Altiplano hidalguense, el maguey pulquero se aprovecha por la extracción de aguamiel, una savia dulce y transparente que, tras su fermentación en el tinacal, da origen al pulque (Pérez et al., 2023). La producción de aguamiel inicia cuando la planta alcanza la madurez (aproximadamente a los ocho años), y tanto el rendimiento como la duración del periodo de extracción están determinados por el estado de madurez de la planta, la especie de agave, las condiciones edafoclimáticas y el manejo agronómico (Ortiz-Basurto et al., 2008; Leal-Díaz et al., 2015; Villarreal-Morales et al., 2019).

Un manejo agronómico adecuado contribuye a mejorar la estructura del suelo e incorporar minerales esenciales para el desarrollo de plantas vigorosas, lo que favorece una producción sostenible de aguamiel. En este sentido, se ha documentado que el manejo nutrimental mediante fertirrigación en *Agave salmiana* puede afectar significativamente su crecimiento y productividad (Arrazola et al., 2020). Asimismo, Pérez et al. (2017) recomiendan la combinación de fertilizante orgánico con fertilizante químico (fosfonitrato o triple 17) para obtener mejores resultados agronómicos.

Como alternativa complementaria, los productores de maguey también pueden emplear abonos de origen orgánico (Ruíz, 1996; Ferrera-Cerrato & Santamaría, 1996). Al respecto, Cruz (2001) reportó que en *A. angustifolia* los mayores incrementos en altura de planta se registraron con la aplicación de estiércol, con un aumento de 39.6% respecto a plantas sin este insumo. No obstante, cuando se utiliza composta, se observa en el mediano y largo plazo la mejora de la estructura, la porosidad, la permeabilidad y la fertilidad del suelo (Ferrera-Cerrato & Santamaría, 1996). En contraste, en algunos estudios donde se aplicó composta o micorriza de manera individual no se detectaron respuestas significativas en el crecimiento. Por otra parte, los tratamientos con micorizas arbusculares (*Glomus intraradices*) y bacterias rizosféricas del género *Bacillus* como biofertilizantes en plantas de *A. angustifolia* mostraron resultados favorables en biomasa aérea, biomasa radical y altura de planta, en comparación con testigos sin bioinoculantes (Robles-Martínez, 2006).

Sin embargo, el género *Agave* presenta limitantes productivas importantes: crecimiento lento para alcanzar la madurez fisiológica (García-Mendoza, 2007; Guillot et al., 2009), baja tasa de reproducción sexual y asexual (Domínguez et al., 2008), incidencia de plagas (Cuervo-Parra et al., 2019; SENASICA, 2020) y enfermedades fúngicas, como marchitez del agave (Quiñones-Aguilar et al., 2023), mancha gris (Coria-Contreras et al., 2019; Mancera, 2021) y mancha foliar (Ceballos-Álvarez et al., 2022; Mora-Aguilera et al., 2023; Romero-Cortes et al.,

2024; Aparicio-Burgos et al., 2025), que además se asocian con retrasos en el crecimiento (Almazán-Morales et al., 2022). A ello se suma que, en México y particularmente en Hidalgo, el cultivo se desarrolla principalmente en temporal y en suelos con limitada disponibilidad de nutrientes (SIAP, 2018). Por lo tanto, evaluar distintos esquemas de fertilización en plantas de *A. salmiana* permitirá identificar la influencia de cada tratamiento sobre variables de crecimiento durante su ciclo de cultivo.

Materiales y métodos

Definición espacial y temporal

El estudio se estableció en una parcela experimental de 6 m de ancho por 75 m de largo (450 m²), con una separación de 3 m entre plantas y 3 m entre surcos, bajo condiciones de temporal. Las plantas de *A. salmiana* se trasplantaron en septiembre de 2023 en las instalaciones de la Escuela Superior de Apan (ESAp), Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, México (Figura 1). El sitio experimental se localiza a 2,488 m s. n. m., en clima templado subhúmedo con lluvias en verano, temperatura media anual de 14.1 °C y una precipitación promedio anual de 622 mm (SEMARNAT, 2026).



Figura 1. Parcela experimental (6 × 75 m; 450 m²) en las instalaciones de la ESAP–UAEH, Apan, Hidalgo, México; el polígono blanco delimita el área de estudio (Google Maps de la ESAP).

Tratamientos y diseño experimental

Se utilizó un diseño en bloques completos al azar, con tres repeticiones, para evaluar ocho tratamientos de fertilización (Tabla 1): T1, testigo sin fertilización; T2, fertilizante químico (FQ); T3, fertilizante orgánico (FO); T4, biofertilizante (BF); T5, FQ + FO; T6, FQ + BF; T7, FO + BF; y T8, FQ + FO + BF. Cada tratamiento se integró por tres surcos de 6 m de longitud, separados 3 m entre sí, con tres plantas por surco (nueve plantas por tratamiento). Con base en el marco de plantación de 3 m

× 3 m, la densidad teórica se calculó dividiendo la superficie de una hectárea (10,000 m²) entre el área ocupada por cada planta (3 m × 3 m = 9 m²), lo que corresponde a 1,111 plantas por ha⁻¹. Para reducir la contaminación cruzada y el efecto de borde, se dejó una franja de 3 m sin sembrar entre tratamientos (Romero-Cortes et al., 2022).

Tabla 1. Tratamientos de fertilización.

Clave	Tratamientos	Sitio de aplicación
T1	Testigo	Sin fertilizante
T2	Fertilizante químico (FQ) ^a	
T3	Fertilizante orgánico (FO) ^b	
T4	Biofertilizante (BF) ^c	
T5	FQ + FO	Rizosfera
T6	FQ + BF	
T7	FO + BF	
T8	FQ + FO + BF	

^aFormulación ajustada para aportar, por tratamiento: N (0.51 kg), P₂O₅ (0.47 kg), K₂O (0.77 kg), MgO (0.116 kg), S (0.34 kg), B (0.0006 kg), Fe (0.008 kg), Mn (0.008 kg) y Zn (0.0008 kg). ^bEl FO consistió en estiércol de vaca (1600 kg), composta (1117.76 kg) y polvo de roca (2.24 kg). El polvo de roca incluyó magnesita, zeolita, dolomita, fosfórica, leonardita, arcilla potásica, diatomita, ceniza de hueso calcinada y ceniza de madera (0.124 kg cada uno), además de Minuter® (0.96 kg) y Micrafol® (0.164 kg). Esta mezcla aportó N (0.04 kg), P₂O₅ (0.30 kg), K₂O (0.06 kg), Ca (0.50 kg), MgO (0.21 kg), S (0.008 kg), Si (0.89 kg), Al (0.18 kg), Fe (0.04 kg), Na (0.006 kg), Mn (0.001 kg), Zn (0.003 kg), B (0.003 kg), Cu (0.0001 kg), Mo (0.000002 kg), Ni (0.0005 kg) y Co (0.000006 kg). ^cCepa de *Bacillus subtilis*.

Aplicación de tratamientos y evaluación de variables

La fertilización se aplicó en cuatro eventos: octubre de 2023 y enero, abril y julio de 2024 (25% de la dosis anual por evento). El tratamiento T1 se mantuvo como testigo absoluto (sin fertilizante). En T2, T5, T6 y T8 se aplicó FQ a una dosis de 120 g por planta/año (30 g por aplicación), en un radio de 25 cm alrededor de la planta. En T3, T5, T7 y T8 se aplicó FO a una dosis de 160 g por planta/año (40 g por aplicación), también en un radio de 25 cm. En T4, T6, T7 y T8 se aplicó BF (*Bacillus subtilis*, 1 × 10⁹ UFC g⁻¹) a una dosis de 400 mL por planta/año (100 mL por aplicación), en la rizosfera. La medición de variables se realizó en una sola lectura en septiembre de 2024, cuando las plantas cumplieron 364 días de experimentación. Se evaluaron cinco caracteres agronómicos (Tabla 2).

Tabla 2. Variables de respuesta evaluadas.

Núm. de variable	Variable
1	Altura de planta
2	Diámetro de roseta
3	Longitud de hoja
4	Número de hojas verdes
5	Número de hijuelos

La evaluación de las plantas se efectuó en todos los tratamientos mediante variables agronómicas de crecimiento vegetativo. La altura de planta se midió desde el ras del suelo hasta la espina terminal del meyolote con flexómetro (Morales-Maldonado et al., 2019). El diámetro de la roseta se obtuvo midiendo la distancia máxima entre los ápices de dos hojas opuestas (Arrazola, 2019). La longitud de la hoja se registró desde la base hasta el ápice, considerando únicamente hojas completas, verdes y sanas (Arrazola, 2019). El número de hojas verdes se determinó contando hojas con menos de 50% de tejido seco y excluyendo aquellas que no se habían desprendido del cogollo (Morales-Maldonado et al., 2019). Finalmente, el número de hijuelos por planta se obtuvo mediante el conteo de hijuelos de rizoma emergidos en un radio de 50 cm alrededor de la planta madre (Cruz-Vasconcelos et al., 2024).

Análisis estadístico

El análisis estadístico se efectuó conforme a un diseño en bloques completos al azar (8 tratamientos, 3 bloques). Para cada variable se usó como unidad experimental el promedio de las tres plantas por repetición. Para las variables continuas (altura, diámetro de roseta y longitud de hoja), se aplicó ANOVA con el modelo:

$$Y_{ij} = \mu + T_i + B_j + \varepsilon_{ij},$$

Donde T_i es el efecto de tratamiento y B_j el efecto de bloque. Se verificaron la normalidad de residuos (Shapiro-Wilk) y la homogeneidad de varianzas (Levene); cuando fue necesario, se consideró la transformación de datos (SAS, 2023).

Para las variables de conteo (número de hojas verdes y número de hijuelos), se ajustaron modelos lineales generalizados con distribución de Poisson y enlace log; si se detectó sobredispersión, se empleó distribución binomial negativa.

La comparación de medias se realizó con Tukey ($\alpha = 0.05$): Tukey HSD para variables continuas y comparaciones múltiples de medias marginales

estimadas (ajuste de Tukey) para variables de conteo (SAS, 2023).

Resultados y Discusión

Al término de la etapa experimental (un año), se obtuvieron resultados que mostraron una separación clara entre tratamientos para las cinco variables evaluadas (ANOVA y Tukey, $p < 0.05$). En el crecimiento vegetativo destacaron los tratamientos T8 y T2, mientras que en la reproducción clonal sobresalieron los tratamientos T2-T5. En conjunto, estos hallazgos indican que, al cierre del ciclo experimental, el efecto acumulado del manejo nutrimental fue suficiente para diferenciar el desempeño agronómico de las plantas de maguey pulquero.

Altura de la planta: La mayor altura se registró en el tratamiento T8 (78.73 cm), seguida por T2 (75.57 cm; Tabla 3). En un nivel intermedio se ubicaron los tratamientos T5-T7 (60.66–62.50 cm); los tratamientos T3 y T4 presentaron valores menores (55.47 y 53.46 cm), mientras que el tratamiento T1 mostró el mínimo (41.00 cm). En términos comparativos, este comportamiento coincide con reportes en agaves bajo esquemas de nutrición más intensivos o balanceados, donde se favorece la acumulación de crecimiento vegetativo (Enríquez et al., 2013; Arreola et al., 2020; Sánchez-Mendoza & Bautista-Cruz, 2022; Cruz-Vasconcelos et al., 2024).

La menor respuesta observada en los tratamientos T3 y T4 puede explicarse por la dinámica de disponibilidad nutrimental de cada insumo: el fertilizante orgánico tiende a liberar nutrientes de forma gradual y su efecto depende de la mineralización de la materia orgánica, mientras que la respuesta al biofertilizante aislado puede estar condicionada por la colonización efectiva de la rizosfera, la humedad del suelo, la compatibilidad cepa-planta y la disponibilidad de sustratos radicales para sostener la actividad microbiana (Hashem et al., 2019; Radhakrishnan et al., 2017). En contraste, el bajo desempeño del testigo (T1) es consistente con escenarios de limitada disponibilidad de minerales (Ávalos de la Cruz et al., 2018; Bojórquez et al., 2010; Rubio, 2019).

Diámetro de la roseta: Para el diámetro de la roseta, los tratamientos T8 (66.58 cm), T2 (62.68 cm) y T7 (53.66 cm) conformaron el grupo de mayor respuesta; T6 y T5 quedaron en valores intermedios, y T3, T4 y T1 en el intervalo inferior (30.68–38.48 cm; Tabla 3). Esta tendencia es congruente con estudios previos que muestran que un mayor balance en la nutrición incrementa la expansión de roseta en agaves (Pacheco,

2007; Enríquez et al., 2013; Cruz-Vasconcelos et al., 2024). En conjunto, los resultados respaldan que el diámetro de roseta es una variable sensible al suministro nutrimental sostenido y a la complementariedad entre fuentes de fertilización (Cruz, 2001).

Tabla 3. Variables continuas registradas a los 364 días.

Clave	Altura de planta * (cm) $\pm$ EE**	Diámetro de roseta (cm) $\pm$ EE	Longitud de hoja (cm) $\pm$ EE
T1	41.00 $\pm$ 0.33 ^h	30.68 $\pm$ 0.15 ^h	62.47 $\pm$ 0.28 ^g
T2	75.57 $\pm$ 0.25 ^b	62.68 $\pm$ 0.04 ^b	85.68 $\pm$ 0.18 ^b
T3	55.47 $\pm$ 0.27 ^f	38.48 $\pm$ 0.15 ^f	68.36 $\pm$ 0.27 ^e
T4	53.46 $\pm$ 0.12 ^g	35.57 $\pm$ 0.21 ^g	67.38 $\pm$ 0.21 ^f
T5	62.50 $\pm$ 0.15 ^c	41.78 $\pm$ 0.25 ^e	72.26 $\pm$ 0.35 ^c
T6	60.66 $\pm$ 0.20 ^e	45.38 $\pm$ 0.17 ^d	71.58 $\pm$ 0.20 ^d
T7	61.31 $\pm$ 0.21 ^d	53.66 $\pm$ 0.16 ^c	72.42 $\pm$ 0.22 ^c
T8	78.73 $\pm$ 0.15 ^a	67.58 $\pm$ 0.08 ^a	87.60 $\pm$ 0.08 ^a

*Letras diferentes dentro de la misma columna significan que existieron diferencias estadísticas ($P < 0.05$, ANOVA y prueba de Tukey); **Error estándar.

Longitud de hoja: La hoja mostró el mismo patrón general con respecto a la longitud: los tratamientos T8 (87.60 cm) y T2 (85.68 cm) superaron al resto de los tratamientos; T5 y T7 se ubicaron en un grupo intermedio (72.26–72.42 cm), y T6, T3, T4 y T1 presentaron los menores valores (71.58–62.47 cm; Tabla 3). La magnitud observada es consistente con valores reportados para *A. americana* y *A. salmiana* (Enríquez et al., 2013; Nieto et al., 2016) y con tendencias documentadas en *A. angustifolia* (Garnica-García et al., 2021). Aunque los valores obtenidos fueron inferiores a los máximos reportados en *A. tequilana* bajo otros contextos de manejo, la dirección de la respuesta confirma un efecto positivo del esquema nutrimental sobre el crecimiento foliar (Arreola et al., 2020).

Tabla 4. Variables de conteo registradas a los 364 días.

Clave	Número de hojas verdes * $\pm$ EE**	Número de hijuelos por planta $\pm$ EE
T1	8.11 $\pm$ 0.51 ^c	1.22 $\pm$ 0.19 ^d
T2	11.78 $\pm$ 0.19 ^a	9.11 $\pm$ 0.19 ^a
T3	9.44 $\pm$ 0.19 ^b	1.56 $\pm$ 0.19 ^d
T4	9.44 $\pm$ 0.77 ^b	4.00 $\pm$ 0.58 ^c
T5	10.44 $\pm$ 0.51 ^b	9.00 $\pm$ 0.33 ^a
T6	10.33 $\pm$ 0.33 ^b	0.82 $\pm$ 0.07 ^e
T7	10.44 $\pm$ 0.84 ^{ab}	2.22 $\pm$ 0.69 ^d
T8	11.89 $\pm$ 0.69 ^a	6.33 $\pm$ 0.33 ^b

*Letras diferentes dentro de la misma columna significan que existieron diferencias estadísticas ($P < 0.05$, ANOVA y prueba de Tukey); **Error estándar.

Número de hojas verdes: los tratamientos T8 (11.89) y T2 (11.78) registraron los mayores promedios de hojas verdes; T7 ocupó una posición intermedia (10.44),

seguido por T5, T6, T3 y T4 (9.44–10.44). El menor valor correspondió al tratamiento T1 (Tabla 4). Este comportamiento coincide con la evidencia de que la emisión y retención foliar en agaves dependen de la interacción entre nutrición, ambiente y rasgos propios de la especie (Cruz, 2001; García-Martínez et al., 2020; Cruz-Vasconcelos, 2019). La reducción en el tratamiento T1 refuerza el papel limitante de la baja disponibilidad nutrimental cuando no se aplica fertilización a las plantas de maguey (Rubio, 2019).

Número de hijuelos por planta: A diferencia de las variables vegetativas, en hijuelos los máximos valores se observaron en los tratamientos T2 (9.11), T5 (9.00) y T8 (6.33). El tratamiento T4 mostró una respuesta intermedia (4.00), mientras que en los tratamientos T7–T3–T1 se observaron valores bajos (1.22–2.22), y en el tratamiento T6 se observaron los valores más bajos (Tabla 4). Este resultado indica que la propagación clonal no sigue exactamente la misma jerarquía que el vigor vegetativo total y sugiere una partición diferencial de recursos según la combinación de insumos. En particular, el desempeño de los tratamientos T2 y T5 sugiere que la emisión de hijuelos estuvo más relacionada con la disponibilidad de nutrientes de rápida respuesta y, en T5, con el aporte orgánico complementario, que con un efecto directo del bioinoculante aplicado de forma aislada.

La tendencia es coherente con reportes de incremento de brotación/rizogénesis en agaves bajo esquemas específicos de nutrición y manejo (Cruz-Vasconcelos, 2019; Garnica-García et al., 2021; Canseco-Santiago et al., 2024; Cruz-Vasconcelos et al., 2024). Este patrón coincide con la evidencia de que el desarrollo de hijuelos en *Agave* depende de la activación de yemas rizomáticas y del balance entre auxinas, citocininas y la disponibilidad de asimilados, ya que la combinación de labores culturales con ácido indol-3-butírico incrementó la producción de hijuelos en *A. salmiana*, mientras que la fertirrigación combinada con 6-bencilaminopurina favoreció brotes de rizoma en *A. angustifolia* (Garnica-García et al., 2021; Cruz-Vasconcelos et al., 2024).

El limitado efecto de *Bacillus subtilis* en T4 y su baja respuesta cuando se combinó con FQ en T6 no contradicen su uso como biofertilizante; más bien indican que su efecto sobre la propagación clonal puede ser dependiente de la cepa, la colonización de la rizosfera, la humedad disponible y la condición nutrimental del suelo. *Bacillus subtilis* puede estimular el crecimiento mediante la producción de citocininas e IAA, solubilización de fósforo, sideróforos, mejoramiento de la arquitectura radical y activación de respuestas de tolerancia al estrés (Arkhipova et al., 2005; Radhakrishnan et al., 2017;

Hashem et al., 2019). En agaves, además, las bacterias promotoras del crecimiento asociadas a la rizosfera tienen potencial como biofertilizantes por rasgos como la fijación de nitrógeno y la producción hormonal (García-Pérez et al., 2024). Por ello, la mayor emisión de hijuelos en T2/T5 se interpreta como un efecto nutrimental y fisiológico favorable para el crecimiento rizomático, mientras que el papel específico de *Bacillus* en la propagación clonal de *A. salmiana* requiere validarse con mediciones de colonización, actividad hormonal y disponibilidad de nutrientes en la rizosfera.

Conclusión

La evaluación final a los 364 días demuestra que la fertilización modificó significativamente el desempeño de *Agave salmiana* en todas las variables estudiadas. T8 y T2 fueron los tratamientos más consistentes para el crecimiento vegetativo (altura de planta, diámetro de roseta, longitud de hoja y número de hojas), mientras que T2 y T5 presentaron la mayor emisión de hijuelos. En términos aplicados, estos resultados respaldan el uso de esquemas nutrimentales balanceados, ajustando la estrategia de fertilización según el objetivo productivo: máximo crecimiento de planta (T8/T2) o máxima propagación clonal (T2/T5). Esta distinción fortalece la contribución aplicada del estudio, porque permite separar una estrategia orientada al vigor vegetativo de otra orientada a la multiplicación clonal, criterio útil para decidir el manejo de plantaciones según su destino productivo.

Referencias

- Aparicio-Burgos, J. E., Romero-Cortes, T., Armendáriz-Ontiveros, M. M., & Cuervo-Parra, J. A. (2025). Leaf spot disease caused by several pathogenic species of the Pleosporaceae family on *Agave salmiana* and *Agave lechuguilla* plants in Mexico, and their biocontrol using the indigenous *Trichoderma asperellum* strain JEAB02. *Agronomy*, 15(10), 2406. <https://doi.org/10.3390/agronomy15102406>
- Ávalos de la Cruz, M. A., Figueroa, V. U., García, H. J. L., Vázquez, V. C., Gallegos, R. M. A., & Orona, C. I. (2018). Bioinoculantes y abonos orgánicos en la producción de maíz forrajero. *Nova Scientia*, 10(20), 170-189.
- Arkipova, T. N., Veselov, S. U., Melentiev, A. I., Martynenko, E. V., & Kudoyarova, G. R. (2005). Ability of bacterium *Bacillus subtilis* to produce cytokinins and to influence the growth and endogenous hormone content of lettuce plants. *Plant and Soil*, 272, 201-209. <https://doi.org/10.1007/s11104-004-5047-x>
- Arrazola, C. L., García-Nava, J. R., Robledo-Paz, A., Ybarra-Moncada, M. C., & Muratalla-Lúa, A. (2020). Sustratos y dosis de fertirrigación en la acumulación de azúcares totales y el crecimiento de *Agave salmiana* (Asparagaceae). *Polibotánica*, 50, 109-118.
- Arreola, T. M. J., Montoya, J. V. M., Areola, N. J. M., Castillo, V. X., Olivares, A. E. A., & Báez, P. A. (2020). Efecto de la aplicación de levasa (mosto de caña de azúcar) en la producción y calidad de *Agave tequilana* Weber. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 11(6), 1311-1324.
- Bojórquez, A. D. A., Gutiérrez, C. G., Báez, J. R. C., Sánchez, M. Á. A., Montoya, L. G., & Pérez, E. N. (2010). Biofertilizantes en el desarrollo agrícola de México. *Ra Ximhai*, 6(1), 51-56.
- Ceballos-Álvarez, A., Chávez-Díaz, I. F., Zelaya-Molina, L. X., Cruz-Cárdenas, C. I., Mercado-Vargas, T. J., & Reséndiz-Venado, Z. (2022). Identificación morfológica de hongos filamentosos aislados de diferentes síntomas asociados a Agave tequilero en los Altos de Jalisco. *Ciencia y Tecnología Agropecuaria de México*, 10(1), 60-69.
- Canseco-Santiago, D. E., Enríquez-del-Valle, J. R., Rodríguez-Ortiz, G., Rodríguez-Vásquez, M. E., García-Aguilar, J. A., & Pérez-Félix, G. P. (2024). Desarrollo de *Agave americana* var. *oaxacensis* por efecto de nutrición orgánica, fertirriego y bencilaminopurina. *Revista Mexicana de Agroecosistemas*, 11(2), 126-135.
- Coria-Contreras, J. J., Mora-Aguilera, G., Yáñez-Morales, M. J., Acevedo-Sánchez, G., Santana-Peñaloza, B., Mendoza-Ramos, C., Jiménez-González, L., Martínez-Bustamante, V. I., García-Martínez, D. C., & Rubio-Cortés, R. (2019). Epidemiología regional aplicada a la caracterización inductiva y pronóstico de la mancha gris del agave azul (*Cercospora agavicola*) en Jalisco, México. *Revista Mexicana de Fitopatología*, 37(1), 71-94.
- Cuervo-Parra, J. A., Pérez-España, V. H., López, P. P. A., Morales-Ovando, M. A., Arce-Cervantes, O., Aparicio-Burgos, J. E., & Romero-Cortes, T. (2019). *Scyphophorus acupunctatus* (Coleoptera: Dryophthoridae): a weevil threatening the production of agave in Mexico. *Florida Entomologist*, 102(1): 1-9.
- Cruz, J. E. (2001). Fertilización química y orgánica del agave mezcalero (*Agave angustifolia* Haw) en Oaxaca. Tesis de licenciatura. Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro. Buenavista, Saltillo, Coahuila, México. 138 pp.
- Cruz-Vasconcelos, S. T. (2019). Crecimiento y fisiología del maguey pulquero (*Agave salmiana* Otto ex Salm-Dyck) obtenido por semilla. Tesis de maestría. Colegio de Postgraduados. Montecillo, Texcoco, Estado de México. 112 pp.
- Cruz-Vasconcelos, S. T., Ramírez-Herrera, C., Cruz-Huerta, N., Gómez-Guerrero, A., & Reyes-Hernández, V. J. (2024). Estimulación del desarrollo de hijuelos de rizoma de *Agave salmiana* mediante labores culturales y ácido indol-3-butírico. *Revista Fitotecnia Mexicana*, 47 (1), 27-33.
- Domínguez, R. M. S., González, J. M. L., González, R. C., Quiñones, V. C., Díaz, D. L., Mireles, O. S. J., & Pérez, M. E. (2008). El cultivo *in vitro* como herramienta para el aprovechamiento, mejoramiento y conservación de especies del género *Agave*. *Investigación y Ciencia*, 41, 53-62.
- Enríquez, del V. J. R., Estrada, S. A., Rodríguez, O. G., Velasco, V. V. A., & Campos, A. G. V. (2013). Sustrato y dosis de fertirriego en la aclimatación de vitropiantas de *Agave americana* var. *oaxacensis*. *Revista de la Facultad de Ciencias Agrarias*, 45(2), 341-348.
- Fernández-Galicia, Y. V., Sagamaga-Villegas, L. M., Salas-González, J. M., & Portillo-Vázquez, M. (2024). El pulque: una perspectiva desde los agronegocios. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 15(7), 1-12. <https://doi.org/10.29312/remexca.v15i7.3380>
- Ferrera-Cerrato, R., & Santamaria, R. S. (1996). La biotransformación de la materia orgánica y el uso de microorganismos en la agricultura. Primer Foro Nacional Sobre Agricultura Orgánica. Universidad Autónoma Metropolitana-Xochimilco. CONARAO. SAGAR. México. 7-22 pp.
- Figueredo-Urbina, C., Álvarez-Ríos, G. D., García-Montes, M. A., & Octavio-Aguilar, P. (2021). Morphological and genetic diversity traditional varieties of agave in Hidalgo state, Mexico. *PLoS ONE*, 16(7), e0254376.
- 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). Genomic insights and plant growth-promoting potential of rhizobial strains from *Agave americana*. *Horticulturae*, 10(12), 1370. <https://doi.org/10.3390/horticulturae10121370>

- García-Martínez, L. I., Sánchez-Mendoza, S., & Bautista-Cruz, A. (2020). Combinación de hongos micorrízicos y fertilización fosforada en el crecimiento de dos agaves silvestres. *Terra Latinoamericana*, 38(4), 771-780.
- Garnica-García, R., Enríquez, del V. J. R., Rodríguez-Ortiz, G., Pérez-León, I., Trejo-Calzada, R., & Morales, I. (2021). Plant growth and rhizome shoots of *Agave angustifolia* in different substrates, with fertigation and benzylaminopurine. *Emirates Journal of Food and Agriculture*, 32(10), 702-710.
- García-Suárez, M. D., & Serrano, H. (2021). Agaves de ornato Asparagaceae. *TecnoAgro*, 149. <https://tecnoagro.com.mx/no.149/agaves-de-ornato-asparagaceae>
- García-Mendoza, A., Cházaro-Basáñez, M. J., Nieto-Sotelo, J., Sánchez-Teyer, L., Tapia, E., Gómez-Leyva, J., Tamayo-Ordoñez, M. Narváez-Zapata, J. A., Rodríguez-Garay, B., Palomino-Hasbach, G. A., Martínez-Ramón, J., Martínez-Rodríguez, J. C., Quiñones-Aguilar, E. E., Rincón-Enríquez, G., Beltrán-García, M. J., Qui-Zapata, J. A., Guzmán-Mendoza, R., Mercado-Flores, Y., Ragazzo-Sánchez, J. A., Calderón-Santoyo, M., & Gutiérrez-Mora, A. (2017). Panorama del aprovechamiento de los Agaves en México. *Red Temática Mexicana Aprovechamiento Integral Sustentable y Biotecnología de los Agaves, AGARED*, México. pp. 49.
- Guillot, O. D., Van der, M. P., Laguna, L. E., & Rosselló, P. J. A. (2009). El género *Agave* L. en la flora alóctona valenciana. Valencia, España. *Monografías de la Revista Bouteloua*, No. 3, 94 pp.
- Hashem, A., Tabassum, B., & Abd_Allah, E. F. (2019). *Bacillus subtilis*: A plant-growth promoting rhizobacterium that also impacts biotic stress. *Saudi Journal of Biological Sciences*, 26(6), 1291-1297. <https://doi.org/10.1016/j.sjbs.2019.05.004>
- Haybron, D. M. (2008). Philosophy and the science of subjective well-being. En M. Eid & R. J. Larsen (Eds.), *The science of subjective well-being* (pp. 17-43). Nueva York, NY: Guilford Press.
- Leal-Díaz, A. M., Santos-Zea, L., Martínez-Escobedo, H. C., Guajardo-Flores, D., Gutiérrez-Urbe, J. A., & Serna-Saldivar, S. O. (2015). Effect of *Agave americana* and *Agave salmiana* Ripeness on Saponin Content from Agumiel (Agave Sap). *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 63(15), 3924-3930. <https://doi.org/10.1021/acs.jafc.5b00883>
- Mancera, A. C. P. (2021). Detección de *Cercospora* en *Agave* a través del análisis de imágenes multiespectrales. Tesis de maestría. Instituto Tecnológico de Estudios Superiores de Occidente. Tlaquepaque, Jalisco, México.
- Mora-Aguilera, J. A., Cabrera-Huerta, E., Nava-Díaz, C., Vázquez-López, A., Camacho-Tapia, M., & Hernández-Castro, E. (2023). Primer informe de *Phoma sorghina* que causa manchas de hojas necróticas en *Agave-Mezcal* (*Agave angustifolia*) en México. <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/nuccore/OQ346146>
- Morales-Maldonado, E., Quintanar, W., Vega-Chávez, J. L., & Guerrero, A. O. (2019). Aplicación de humus de lombriz en el crecimiento y calidad de *Agave salmiana*. *REIA*, 5, 11-15.
- Nava-Cruz, N. Y., Medina-Morales, M. A., Martínez, J. L., Rodríguez, R., & Aguilar, C. N. (2015). *Agave* biotechnology: an overview. *Critical Reviews in Biotechnology*, 35(4), 546-559.
- Nieto, A. R., Vargas, M. J., Nieto, A. J. C., Rodríguez, O. A., Jiménez, P. V. M., Hernández, C. J., & Ortiz, B. M. (2016). El cultivo del maguey pulquero (*Agave salmiana*) en el Valle del Mezquital. Universidad Politécnica de Francisco I. Madero, Secretaría de Educación Pública, Hidalgo crece contigo. 1er Edición. Francisco I. Madero, Hidalgo, México. 55 pp.
- Onofre-Sánchez, J., Testón-Franco, N., & Pinón-Vargas, M. (2022). La entomofagia y florifagia en el Valle del Mezquital, Hidalgo, México, valor cultural y uso alimentario. *Sosquua*, 4(1), 9-21.
- Ortiz-Basurto, R. I., Pourcelly, G., Doco, T., Williams, P., Domier, M., & Belleville, M. P. (2008). Analysis of the Main Components of the agumiel produced by the maguey-pulquero (*Agave mapisaga* throughout the harvest period. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 56(10), 3682-3687. <https://doi.org/10.1021/jf072767h>
- Pacheco, R. A. J. (2007). Efecto de fertilizantes de liberación lenta en maguey mezcalero (*Agave angustifolia* Haw). Tesis de maestría. Instituto Politécnico Nacional, Santa Cruz Xoxocotlán, Oaxaca, México. 125 pp.
- Pérez-España, V. H., Cuervo-Parra, J. A., Tamayo, R. L., Gutiérrez, A. M. P., & Romero-Cortes, T. (2023). Herramientas para la producción del aguamiel y microestructura del raspado. En: *Maguey aguamiel/pulque: una visión para el desarrollo territorial*. Roldán, C. E. I., & Medina, M. C. (Eds.). Primera edición. El Colegio del Estado de Hidalgo. San Agustín Tlaxiaca, Hidalgo, México. 121-144 pp.
- Pérez, R. A., Rodríguez, O. A., Nieto, A. J. C., Callejas, H. J., & Portillo, M. L. (2017). Comparación entre dos sistemas de siembras de maguey (*Agave salmiana*). Universidad Politécnica Francisco I. Madero. Francisco I. Madero, Hidalgo, México. 69 p.
- Quiñones-Aguilar, E. E., Montoya-Martínez, A. C., Rincón-Enríquez, G., & López-Pérez, L. (2023). Inoculación de bulbilos de *Agave tequilana* con hongos micorrízicos arbusculares: efecto en el crecimiento y biocontrol contra *Fusarium oxysporum*. *Ciencia y Tecnología Agropecuaria*, 24(1), e3043.
- Radhakrishnan, R., Hashem, A., & Abd_Allah, E. F. (2017). *Bacillus*: A biological tool for crop improvement through bio-molecular changes in adverse environments. *Frontiers in Physiology*, 8, 667. <https://doi.org/10.3389/fphys.2017.00667>
- Robles-Martínez, M. L. (2006). Análisis prospectivo del potencial micorrízico y la respuesta a la inoculación con hongos de micorriza arbuscular del maguey mezcalero (*Agave angustifolia* Haw.). Tesis de maestría. Instituto Politécnico Nacional. Oaxaca de Juárez. Oaxaca. 113 pp.
- Romero-Cortes, T., Pérez, E. V. H., Pescador-Rojas, J. A., Rangel-Cortés, E., Armendáriz-Ontiveros, M. M., & Cuervo-Parra, J. A. (2024). First report of leaf spot disease ("Negrilla") on *Agave salmiana* Otto Ex Salm-Dyck (ssp. *salmiana*) plants caused by *Bipolaris zeae* Zivan in Mexico. *Agronomy*, 14, 623. <https://doi.org/10.3390/agronomy14030623>
- Rubio, C. R. (2019). El *Agave*: Procesos para un cultivo excelente (parte 3). <https://www.casasauza.com/procesos-tequila-sauza/agave-procesos-cultivo-excelente-parte-2>
- Ruiz, F. J. F. (1996). Los fertilizantes y la fertilización orgánica bajo la óptica de un sistema de producción orgánica. Primer Foro Nacional Sobre Agricultura Orgánica. Universidad Autónoma Metropolitana Xochimilco. CONARAO. SAGAR. México. 23-46 pp.
- Sánchez-Mendoza, S., & Bautista-Cruz, A. (2022). Efecto de fertilizantes de liberación lenta y fitohormonas en el crecimiento de *Agave angustifolia* Haw. *Entreciencias: Diálogos en la Sociedad del Conocimiento*, 10(24), e24.82738.
- Statistical Analysis System (SAS). (2023). SAS Institute Inc. SAS/STAT® User's Guide; Version 15.3; SAS Institute: Cary, NC, USA, pp. 17-34.
- Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera (SIAP). (2023). Maguey pulquero: superficie sembrada en 2023 con 8,964.44 de la producción nacional. https://nube.agricultura.gob.mx/cierre_agricola/
- Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera (SIAP). (2018). Maguey pulquero: el estado de Hidalgo destacó en 2017 con 69.6% de la producción nacional. <https://www.gob.mx/siap/articulos/maguey-pulquero?idiom=es>
- Servicio Nacional de Sanidad, Inocuidad y Calidad Agroalimentaria (SENASICA). (2020). Plagas reglamentadas del *Agave*. Gobierno de México. <https://www.gob.mx/senasica/documentos/plagas-reglamentadas-del-agave-110851>
- Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT). (2026). Atlas Digital Geográfico. https://gisviewer.semarnat.gob.mx/aplicaciones/Atlas2015/atm_climas.html

- Shotton, M. A. (1989). Computer addiction? A study of computer dependency. Londres, England: Taylor & Francis.
- Vega-García, M. A., Álvarez-Ríos, G. D., & Figueredo-Urbina, C. J. (2023). Sistemas de manejo de agaves pulqueros en el estado de Hidalgo. *Pädi Boletín Científico de Ciencias Básicas e Ingenierías del ICBI*, 10(20), 92-100.
- Villarreal-Morales, S. L., Muñiz-Márquez, D. B., Michel-Michel, M., González-Montemayor, Á.-M., Escobedo-García, S., Salas-Tovar, J. A., Flores-Gallegos, A. C., & Rodríguez-Herrera, R. (2019). Aguamiel a Fresh Beverage from *Agave* spp. Sap with Functional Properties. *Natural Beverages*, 13, 179-208. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-816689-5.00007-9>
- Von Ledebur, S. C. (2007). Optimizing knowledge transfer by new employees in companies. *Knowledge Management Research & Practice*. Publicación anticipada en línea. doi:10.1057/palgrave.kmrp.8500141
- Woolf, N. J., Young, S. L., Fanselow, M. S., & Butcher, L. L. (1991). MAP-2 expression in cholinceptive pyramidal cells of rodent cortex and hippocampus is altered by Pavlovian conditioning [Resumen]. *Society for Neuroscience Abstracts*, 17, 480.