

PRODUCCIÓN DE HIJUELOS Y CARACTERÍSTICAS MORFOLÓGICAS EN *Agave americana* var. *Oaxacensis* EN RESPUESTA A ESTIMULANTES Y SOLUCIÓN NUTRITIVA

PRODUCTION OF OFFSHOOTS AND MORPHOLOGICAL CHARACTERISTICS IN *Agave americana* var. *Oaxacensis* IN RESPONSE TO STIMULANTS AND NUTRIENT SOLUTION

Reyna Estrella Jarquin-Ordaz^{1a}, Vicente Arturo Velasco-Velasco^{1b*}, Judith Ruiz-Luna^{1c}, José Raymundo Enríquez-del Valle^{1d}, Yuri Villegas-Aparicio^{1e} y Karen del Carmen Guzmán-Sebastián^{1f}

^{1a} Tecnológico Nacional de México/ Instituto Tecnológico del Valle de Oaxaca. Ex Hacienda de Nazareno S/N, San Jesús Nazareno, Santa Cruz Xoxocotlán, C.P. 71233 Oaxaca, México
<https://orcid.org/0009-0004-9429-208X>

^{1b} Tecnológico Nacional de México/ Instituto Tecnológico del Valle de Oaxaca. Ex Hacienda de Nazareno S/N, San Jesús Nazareno, Santa Cruz Xoxocotlán, C.P. 71233 Oaxaca, México
<https://orcid.org/0000-0003-3449-1461>

^{1c} Tecnológico Nacional de México/ Instituto Tecnológico del Valle de Oaxaca. Ex Hacienda de Nazareno S/N, San Jesús Nazareno, Santa Cruz Xoxocotlán, C.P. 71233 Oaxaca, México
<https://orcid.org/0000-0002-9061-0149>

^{1d} Tecnológico Nacional de México/ Instituto Tecnológico del Valle de Oaxaca. Ex Hacienda de Nazareno S/N, San Jesús Nazareno, Santa Cruz Xoxocotlán, C.P. 71233 Oaxaca, México.
<https://orcid.org/0000-0002-7700-3790>

^{1e} Tecnológico Nacional de México/ Instituto Tecnológico del Valle de Oaxaca. Ex Hacienda de Nazareno S/N, San Jesús Nazareno, Santa Cruz Xoxocotlán, C.P. 71233 Oaxaca, México
<https://orcid.org/0000-0003-3449-1461>

^{1f} Tecnológico Nacional de México/ Instituto Tecnológico del Valle de Oaxaca. Ex Hacienda de Nazareno S/N, San Jesús Nazareno, Santa Cruz Xoxocotlán, C.P. 71233 Oaxaca, México
<https://orcid.org/0000-0003-1374-559X>

* Autor de correspondencia: vicente.vv@voaxaca.tecnm.mx

RESUMEN

Agave americana var. *Oaxacensis*, es una especie silvestre usada en la obtención de mezcal. Presenta baja reproducción asexual y una producción de semillas hasta los 15-20 años. El objetivo de este estudio fue evaluar el efecto de estimulantes y solución nutritiva en la producción de hijuelos. El experimento se realizó en San Agustín Amatengo, Ejutla de Crespo, Oaxaca, México, con un diseño de bloques completos al azar, con factorial 3x2. El factor estimulante incluyó: un tratamiento sin estimulante 0,25 L ha⁻¹ de SeaMel Booster y 2.0 L ha⁻¹ Algaroot^{MR}, el factor nutrición incluyó: solución Steiner al 0 y 100%. Cada tratamiento se integró con cuatro repeticiones, y la unidad experimental se conformó por seis plantas. En las plantas madre se midieron: diámetro de base de la roseta, diámetro de roseta, altura de la planta y número de hijuelos. En los hijuelos, se cuantificaron las variables anteriores más el número de hojas. Se obtuvieron muestras de suelo para determinar propiedades físicas y químicas. Las variables diámetro de base de la roseta, diámetro de roseta y altura en plantas madre no mostraron efectos significativos debido al uso del estimulante y

la nutrición. El estimulante Algaroot^{MR} produjo significativamente el mayor número de hijuelos en plantas madre, mientras que las variables morfológicas fueron mayores en los hijuelos. El pH del suelo fue medianamente alcalino con efectos despreciables de la salinidad. El contenido de materia orgánica y nitrógeno alcanzó un nivel medio, mientras que el de fósforo estuvo en un rango medio a alto. La densidad aparente del área muestreada se sitúa en suelos frances y arenosos, con texturas franco limoso, franco arenoso y arenoso franco.

Palabras clave: Agave silvestre, diagnóstico del suelo, maguey arroqueño.

ABSTRACT

Agave americana var. Oaxacensis is a wild species used in the production of mezcal. It has low asexual reproduction and seed production until 15-20 years of age. The objective of this study was to evaluate the effect of stimulants and nutrient solution on the production of offshoots. The experiment was carried out in San Agustín Amatengo, Ejutla de Crespo, Oaxaca, Mexico, with a randomized complete block design, with 3x2 factorial arrangement. The stimulant factor included the following treatments: no stimulant, 2.5 L ha⁻¹ of SeaMel Booster, and 2.0 L ha⁻¹ AlgarootTM; the nutritional factor consisted of: 0 and 100% Steiner solution. Each treatment included four replications, and the experimental unit consisted of six plants. In the mother plants, the following variables were measured: rosette base diameter, rosette diameter, plant height and number of offshoots. In the offshoots, the same variables were evaluated, with the addition of the number of leaves. Soil samples were collected to determine physical and chemical properties. The variables rosette base diameter, rosette diameter and plant height did not show significant effects due to the use of stimulant or nutrition. However, the stimulant Algaroot^{MR} produced the largest number of offshoots in mother plants, while the morphological variables were enhanced in the offshoots. The soil was moderately alkaline, with negligible salinity. Organic matter and nitrogen levels were estimated as medium, while P levels ranged from medium. The bulk density of the sampled area corresponded to loam and sandy soils, with textures identified as silty loam, sandy loam and loamy sand.

Keywords: Wild agave, soil diagnosis, arroqueño maguey.

INTRODUCCIÓN

México cuenta con 215 especies de Agave, por lo que es considerado como un país diverso, de las cuales al menos 151 especies son endémicas de Oaxaca y son el producto primario para la obtención del mezcal (García-Mendoza, 2004).

Los municipios de Miahuatlán, Ejutla de Crespo, Sola de Vega, Yautepec, Zimatlán, Tlacolula, Ocotlán y Santiago Matatlán en el estado de Oaxaca (Méjico) comprenden la "región o ruta del mezcal", donde se agrupan la mayor cantidad de especies de agaves y productores de mezcal (Illsey-Granich et al., 2009). En el país, actualmente se utilizan alrededor de 42 especies del género *Agave* destinadas para la destilación del mezcal; las poblaciones silvestres se están extinguiendo debido a la falta de técnicas para su reproducción (Torres et al., 2013).

De acuerdo con el Consejo Mexicano Regulador de la Calidad del Mezcal (COMERCAM, 2022), se ha originado un creciente aumento en la demanda de mezcal proveniente de agaves silvestres. Por lo anterior, estas poblaciones se ven seriamente amenazadas y en riesgo de extinción. Los productores de mezcal mencionan

que, al emitir el escapo o quiote, las plantas de agave concentran los azúcares en este órgano, razón por la cual cortan el escapo una vez que ha iniciado su crecimiento, y con tal práctica permite que los azúcares se concentren en el tallo o piña que utilizan para la obtención del mezcal. Esta actividad limita la posibilidad de la reproducción sexual y por ende se pierde la producción de semillas (Delgado-Lemus, 2008; Torres, 2009).

El *Agave americana* var. Oaxacensis, también llamado por los productores arroqueño, es endémico y silvestre de México, y en Oaxaca desde tiempos prehispánicos se utiliza para la fabricación de fibras duras (Palma-Cruz, 2000), y como producto primario para la fabricación de mezcal (García-Mendoza, 2011). La elaboración del mezcal con esta especie es limitada, ya que existen pocas plantas, en parte, por ser una especie con un ciclo de vida muy prolongado. Según Cruz-García (2019) tarda entre 15 y 20 años hasta alcanzar la madurez, y posteriormente cosecharse (Bautista y Smit, 2012). Ante esta problemática, los productores han optado por establecer plantaciones de agave con especies de ciclos más cortos, por ejemplo, *Agave angustifolia* Haw, que alcanza la madurez adecuada entre los

siete y nueve años (CONABIO, 2006).

Las plantas del género *Agave* son plantas monocárpicas por lo que una vez que alcanzan la madurez emiten un quiole o escapo (Nobel, 2011) cuyas flores son polinizadas por mamíferos como los murciélagos, asegurando la diversidad genética (Trejo-Salazar et al., 2015). La reproducción asexual es limitada para obtener nuevas plantas (García-Mendoza, 2007), debido a que el número de hijuelos en el rizoma (Gentry, 2021), que son tallos subterráneos modificados (Troiani et al., 2017) es reducido y depende de cada especie (Nieto et al., 2016). Por tal motivo, en el presente estudio se evaluó la producción de hijuelos por efecto de la aplicación de estimulantes y solución nutritiva, en plantas de *Agave americana* var. Oaxacensis, además de determinar las variables morfológicas en los nuevos ejemplares producidos en San Agustín Amatengo, Ejutla de Crespo, Oaxaca, México. Es primordial, generar estrategias eficaces de conservación del germoplasma, principalmente en las especies silvestres que se distribuyen en las zonas que abarca las regiones de las Denominaciones de Origen, y establecer nuevas plantaciones que satisfaga la demanda.

MATERIALES Y MÉTODOS

Área de estudio

El estudio se llevó a cabo en el municipio de San Agustín Amatengo, perteneciente al distrito de Ejutla de Crespo (México), específicamente en el paraje "El Mogote", con coordenadas geográficas $16^{\circ}30'54''$ latitud Norte; y $96^{\circ}47'45''$ longitud Oeste y con una altitud de 1.363 m. También, se realizó la determinación de propiedades físicas y químicas de las muestras de suelo donde crece esta especie, para conocer la situación actual de la fertilidad.

Desarrollo del experimento

En agosto del 2022, en una plantación con 3 años desde su establecimiento, se seleccionaron 144 plantas de la especie *Agave americana* var. Oaxacensis, siendo este el periodo óptimo para su reproducción (Flores et al., 2009); una vez que este cultivo llegue a su etapa de maduración (15-20 años aproximadamente) será destinado a la elaboración de mezcal.

Descripción de los tratamientos

El producto SeaMel Booster compuesto por: 22% K₂O, 6% SO₄, 3% N, 1% P₂O₅, 1,5% Ca, 2,5-8,5% MgO y 30% de Fe, Mn, Cr, Co, Cu, Se, Zn, I, Cl, S, Mo, Si, Ti, Au; la dosis recomendada y aplicada fue de 2,5 L ha⁻¹ y Algaroot^{MR} en su mayoría por auxinas 0,351%, giberelinas 0,0112%

y citocinas 0,0146% usando la dosis 2 L ha⁻¹. Los tratamientos se aplicaron con una frecuencia mensual por 12 meses consecutivos.

La solución nutritiva utilizada fue la "solución universal de Steiner" (1961), la cual consiste en (me L⁻¹): 10 de NO₃, 3 de H₂PO₄, 7 de SO₄, 7 de K, 7 de Ca, 6 de Mg y de los micronutrientos (g L⁻¹): 5,6 de Fe, 1,8 de Mn, 0,22 de Zn, 2,88 de B, 0,18 de Cu y 0,02 de Mo; con pH de 6,5, diluyendo 100 mL de cada compuesto por cada litro de agua y se agregaron 500 mL de la solución final a cada una de las plantas.

Análisis estadístico

Se realizó un análisis de varianza con el paquete estadístico SAS en su versión 9.4 mediante el diseño experimental de bloques completos al azar (DBCA), con cuatro repeticiones y arreglo factorial 3×2. Los factores fueron: estimulantes (sin, SeaMel Booster y Algaroot^{MR}) y nutrición (sin, concentración al 100%); la combinación de los factores y niveles dieron como resultado seis tratamientos. Se realizó la comparación de medias (Tukey, P ≤ 0,05). También se realizó una correlación de Pearson entre las variables morfológicas de las plantas madre y las variables morfológicas de los hijuelos, con la finalidad de conocer la relación entre las variables. La unidad experimental se conformó por seis plantas, teniendo un total de 36 en cada bloque.

Determinaciones físicas y químicas de suelo

En el área experimental se observaron diferencias entre el color del suelo, motivo por el cual se dividió en cuatro bloques. Se realizó el muestreo edáfico recolectando dos muestras compuestas por cada bloque a 20 cm de profundidad; una vez obtenidas, se secaron, molieron y tamizaron. Se determinaron propiedades físicas y químicas: textura a través del método del hidrómetro de Boyoucous, pH y conductividad eléctrica (CE) por del método AS-02 y AS-18, respectivamente, medidos con potenciómetro, materia orgánica (MO) por la metodología de Walkley y Black y se estimó el % de Nitrógeno (N), Fósforo (P) por el método de Olsen y la densidad aparente por el método gravimétrico. Los análisis se realizaron con base en la Norma Oficial Mexicana (NOM-021-SEMARNAT-2000, 2002), que establece las especificaciones de fertilidad, salinidad y clasificación de suelos, estudio, muestreo y análisis.

Variables evaluadas

Antes de la aplicación de los tratamientos se registraron las variables en plantas de *Agave americana* var. Oaxacensis de tres años (plantas

madre) para considerarlas como referencia: 1) altura (cm), 2) diámetro de la base de la roseta (cm), 3) diámetro de la roseta (cm) y 4) número de hijuelos (Tabla 1).

Transcurridos siete meses desde el inicio de la aplicación de los tratamientos, comenzó la aparición de hijuelos. Posteriormente, en cada hijuelo se registraron las variables: 1) altura (cm), 2) diámetro de la base de la roseta (cm), 3) diámetro de la roseta (cm) y 4) número de hojas. Cada variable se midió con un flexómetro mensualmente.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Variables obtenidas en las plantas madre de *Ag. americana* var. Oaxacensis

El análisis de varianza mostró que el "efecto del factor estimulante" y la interacción nutrición-estimulante, presentaron diferencias altamente significativas y significativas, respectivamente

en la variable número de hijuelos. Las variables diámetro de la base de la roseta, diámetro de roseta y altura no mostraron diferencias significativas. El factor "nutrición" con la solución nutritiva, en su concentración al 100%, no mostró significancia en las variables evaluadas; esto puede ser atribuido a que el suelo contaba con buen nivel de fertilidad.

Las variables diámetro de la base de la roseta, diámetro de roseta y altura no mostraron diferencias significativas durante los doce meses en que se aplicaron los tratamientos, lo anterior se puede atribuir al corto tiempo de registro de los datos y a las condiciones favorables en la fertilidad del suelo, que no permitió observar diferencias.

La cantidad de hijuelos producidos fue significativamente mayor cuando las plantas recibieron el estimulante Algaroot^{MR}, esto es, 3,5 hijuelos en promedio por cada planta madre (Tabla 2).

Tabla 1. Valores promedio al inicio del experimento en plantas de *Ag. americana* var. Oaxacensis de tres años.

Table 1. Average values at the beginning of the experiment in three-year-old plants of *A. americana* var. Oaxacensis.

Tratamientos por aplicar	Variables			
	DBR (cm)	DR (cm)	ALT (cm)	NHJ
Testigo	20,66	152,92	144,88	0,83
Solución nutritiva (SN)	21,20	154,25	137,71	0,87
SN + SeaMel B	20,79	157,42	144,08	0,83
SeaMel B	22,12	159,92	139,58	0,91
SN + Algaroot ^{MR}	22,75	159,29	142,67	0,66
Algaroot ^{MR}	22,62	154,46	139,96	0,83

DBR: diámetro de base de la roseta, DR: diámetro de roseta ALT: altura NHJ: número de hijuelos.

Tabla 2. Crecimiento en plantas de *Ag. americana* var. Oaxacensis después de doce meses de aplicados los tratamientos.

Table 2. Growth in *A. Americana* var. Oaxacensis plants after twelve months of treatments.

Tratamientos	Variables			
	DBR (cm)	DR (cm)	ALT (cm)	NHJ
Testigo	38,79 a	199,04 a	182,38 a	1,83 a
Solución nutritiva (SN)	38,33 a	193,58 a	178,42 a	2,04 a
SN + SeaMel B	39,00 a	198,96 a	185,04 a	1,83 a
SeaMel B	39,91 a	206,50 a	189,04 a	1,58 a
SN + Algaroot ^{MR}	39,62 a	203,33 a	182,25 a	2,45 ab
Algaroot ^{MR}	39,83 a	194,76 a	180,29 a	3,50 b
Diferencia mínima significativa	9,40	34,18	25,59	1,10

DBR: diámetro de base de roseta, DR: diámetro de roseta ALT: altura NHJ: número de hijuelos. Valores con letras iguales no son estadísticamente diferentes (Tukey, P ≤ 0,05) dentro de cada columna.

La correlación entre las variables morfológicas en plantas de *Agave americana* var. Oaxacensis mostró que la altura se incrementó cuando aumentó el diámetro de roseta ($r=0,92$). Al aumentar el número de hijuelos, disminuyó el diámetro de la base de la roseta (piña) ($r=-0,98$).

Los resultados de la correlación negativa entre las variables número de hijuelos y diámetro de base de la roseta, pueden ser comparados con el estudio realizado por Cisne-Contreras et al. (2010) en fresa (*Fragaria spp*) con la variedad Britget, ya que reportaron un aumento en el número de estolones cuando el número de coronas disminuyó, semejante a lo sucedido con *Agave americana* var. Oaxacensis de este estudio.

El aumento en el número de hijuelos se atribuye a las auxinas, citocinas y giberelinas que contiene el producto Algaroot^{MR}. Estos reguladores de crecimiento son caracterizados por intervenir en diferentes fenómenos biológicos del agave como la formación de raíces adventicias y la elongación de los rizomas. Promueven también la división celular en combinación con alguna citocina. Los rizomas emitidos por cada planta madre, se producen del brote de las yemas axilares en el tallo, lo que podría tener una relación proporcional a la cantidad de yemas a brotar y posteriormente producir hijuelos (Garay-Arroyo et al., 2014; Taiz y Zeiger, 2010).

Recientes estudios, como el que realizaron Cruz-Vasconcelos et al. (2024), confirman que el suministro de auxinas, en su caso ácido-3-indolbutílico, favorece que las plantas progenitoras de *Agave salmiana* produzcan un número superior de hijuelos (3,3 – 3,7 en promedio). Las funciones de los reguladores de crecimiento son diferentes en cada proceso metabólico y más aún entre especies; estos han sido estudiados en relación con el crecimiento vegetal que les proporcionan a las plantas (Borjas-Ventura et al., 2020).

La información del uso de reguladores de crecimiento se enfoca principalmente en la nueva tecnología de propagación *in vitro*, respecto al crecimiento de las plantas cultivadas en estas condiciones controladas (Arzate-Fernández et al., 2020; Cancino-García et al., 2020; Reyes-Zambrano et al., 2016). Dévora-Rodríguez et al. (2021) con *Agave duranguensis* y Ríos-Ramírez et al. (2021) con *Agave angustifolia* Haw, demuestran que la aplicación de citocinas en la etapa de producción de brotes promueve la estimulación de un mayor número de estos, no obstante, son escasas las investigaciones de la aplicación de los reguladores de crecimiento en plantaciones establecidas en campo (Borjas-Ventura et al., 2020).

Hijuelos producidos de *Ag. americana* var. Oaxacensis

El análisis de varianza solo mostró que el efecto del "factor estimulante" presentó diferencias significativas para las variables diámetro de la base de la roseta, diámetro de roseta y altura. La variable número de hojas no mostró diferencias significativas.

El tratamiento Algaroot^{MR}, superó los valores de los tratamientos restantes en la altura de la planta, ya que fue significativamente mayor cuando las plantas madre recibieron dicho producto, comparado con el testigo. En el diámetro de la base de la roseta y el diámetro de la roseta, de igual forma Algaroot^{MR}, los hijuelos mostraron un mayor crecimiento y significativo, comparado con el tratamiento solución nutritiva + SeaMel Booster, que obtuvo los valores más bajos. La variable número de hojas no presentó diferencias significativas y el estimulante Algaroot^{MR} permitió el mayor número de hojas desplegadas (Tabla 3).

La correlación entre las variables morfológicas en hijuelos de *Agave americana* var. Oaxacensis, mostró que el diámetro de la base de la roseta se incrementó cuando aumentó el diámetro de la roseta y el número de hojas, siendo $r=0,86$ y $r=0,89$, respectivamente. En el resto de las variables, la correlación fue menos de $r=0,60$. Esto es coherente, ya que a medida que va aumentando el diámetro de la base de la roseta, existen más hojas desplegadas y, por consiguiente, la roseta se vuelve más grande.

Este estudio, en comparación con el de Sánchez-Mendoza y Bautista-Cruz (2022) donde también evaluaron diferentes fitohormonas (auxinas, citocinas y giberelinas) en el desarrollo de hijuelos de *Agave angustifolia* Haw, obtuvieron un incremento de 20,2% en el número de hojas desplegadas y 13,6% en la altura. Estos resultados demuestran que el suministro de diferentes reguladores de crecimiento, favorecen significativamente a los hijuelos de distintas especies de agave y obtengan un mejor crecimiento.

En la presente investigación, el crecimiento de los hijuelos de *Agave americana* var. Oaxacensis, en las variables morfológicas evaluadas, se encuentra relacionado con los ingredientes activos del producto aplicado Algaroot^{MR}, como las auxinas que son las encargadas de la elongación y división celular, además del estímulo de la dominancia apical (Vega-Celedón et al., 2016). Las giberelinas, por su parte, incrementan significativamente la altura de las plantas (Yoshida et al., 2018), y las citocinas participan en contra del estrés biótico y abiótico (Cortleven et al., 2019; Choi et al., 2011).

Tabla 3. Variables morfológicas en hijuelos de *Agave americana* var. Oaxacensis de seis meses de edad.**Table 3. Morphological variables in six-months-old offshoots of *A. americana* var. Oaxacensis.**

Tratamientos	Variables			Número de hojas
	DBR (cm)	DR (cm)	Altura (cm)	
Testigo	5,89 ab	23,27 ab	15,57 c	8,18 a
Solución nutritiva (SN)	5,72 ab	23,22 ab	30,54 a	8,23 a
SN + SeaMel B	5,07 b	21,47 b	26,05 b	7,48 a
SeaMel B	5,23 b	24,79 ab	27,73 ab	7,14 a
SN+ Algaroot ^{MR}	6,04 ab	23,66 ab	30,48 a	9,01 a
Algaroot ^{MR}	7,52 a	28,68 a	31,41 a	9,40 a
Diferencia mínima significativa	2,26	6,98	4,22	3,13

DBR: diámetro de base de roseta, DR: diámetro de roseta. Valores con letras iguales no son estadísticamente diferentes (Tukey, P ≤ 0.05) dentro de cada columna.

Determinaciones físicas y químicas del suelo

En la Tabla 4, se muestran los resultados y la clasificación con base a la Norma Oficial Mexicana NOM-021-SEMARNAT-2000 (2002), obtenidos de las determinaciones de suelo en laboratorio.

El suelo cultivado con *Agave americana* var. Oaxacensis presentó valores promedio de pH "medianamente alcalino" (Tabla 4); Valenzuela (2003) reporta que diversas especies de agave obtienen buenos resultados con pH de 6,0 – 8,0; Fregoso-Zamorano et al. (2023) analizaron sitios con *A. tequilana* Weber y encontraron suelos con pH "medianamente alcalinos" (7,78) y "fuertemente alcalinos" (8,78). El INIFAP (2012) indica que diversas especies de *Agave* tiene un amplio intervalo de adaptación teniendo diferentes valores de pH en el suelo.

La CE se indicó como "efectos despreciables de la salinidad" (Tabla 4). Cervera-Herrera et al. (2018), en suelos con *Agave angustifolia* Haw, encontraron valores promedio de 0,56 dS cm⁻¹, que no pertenecen a suelos salinos.

La MO y N estimado se encontraron en clase "media". Otros investigadores (Álvarez-Sánchez et al., 2010) obtuvieron "baja" concentración de materia orgánica (0,81-1,20%) y "media" concentración de nitrógeno (1,81-2,30%), en suelo cultivado con *Agave tequilana* Weber variedad azul.

En el suelo analizado se encontraron texturas, "franco limoso", "franco arenoso" y "arenoso franco". Ruíz-Corral (2007) argumenta que las especies del género *Agave* se desarrollan en suelos con texturas franco, franco-arenosos o franco-arcillosos, en zonas que presentan baja precipitación; los agaves prefieren suelos con textura arcillosa o limo-arcillosa que tiene una

mayor retención de humedad.

El contenido de fósforo se encontró en la clase "media" y "alta". El fósforo en la fisiología de la planta interviene en las reacciones que utilizan energía dentro de las células, como la acumulación de adenosín trifosfato (ATP). Estas moléculas se forman como resultado de la fotosíntesis y son utilizadas en la respiración de la planta. Por consiguiente, es de vital importancia para la generación de células nuevas en la producción de raíces al inicio de los ciclos vegetativos (Fernández, 2007).

La densidad aparente encontrada en los bloques entra en los suelos "francos y arenosos", y se caracterizan por tener mayor porosidad.

CONCLUSIONES

La aplicación de Algaroot^{MR} permitió significativamente una mayor producción de hijuelos, respecto de la aplicación de la solución nutritiva. Además, el mismo producto, estimuló significativamente a las plantas madre de *Agave americana* var. Oaxacensis, a producir 3,5 hijuelos de rizoma, respecto de las plantas que no recibieron el estimulante al producir 1,83 hijuelos. Las plantas progenitoras con mayor diámetro en la base de la roseta produjeron menor número de hijuelos.

Algaroot^{MR} también promovió el crecimiento en los hijuelos, en su diámetro de base de la roseta, diámetro de roseta, altura y número de hojas, esto es, 7,52; 28,68; 31,4 y 9,40 cm, en comparación con las plantas testigo, cuyos valores fueron 5,89; 23,27; 15,57 y 8,18, respectivamente en las mismas variables.

La textura del suelo donde crece este *Agave*

Tabla 4. Propiedades físicas y químicas del suelo (dos lecturas por bloque).
Table 4. Physical and chemical properties of the soil (two measurements per-block).

Determinación	Bloque			
	1	2	3	4
pH	7,58; 7,64	7,61; 7,54	7,78; 7,43	7,44; 7,43
Interpretación		"Medianamente alcalino"		
Conductividad eléctrica (dS cm ⁻¹)	0,58; 0,87	0,80; 0,83	0,74; 0,86	0,83; 0,65
Interpretación		"Efectos despreciables de la salinidad"		
Textura				
Arena (%)	36,44	59,72	79,72	78,44
Arcillo (%)	9,72	9,00	9,00	9,00
Limo (%)	53,84	31,28	11,28	12,56
Interpretación	"Franco limoso"	"Franco arenoso"		"Arenoso franco"
Arena (%)	52,44	78,44	80,44	68,44
Arcillo (%)	9,00	9,00	9,00	9,00
Limo (%)	38,56	12,56	10,56	22,56
Interpretación		"Arenoso franco"		"Franco arenoso"
Materia orgánica (%)	2,09; 2,11	2,33; 2,26	2,31; 2,11	2,34; 2,39
Interpretación		"Medio"		
Nitrógeno (%)	0,10; 0,10	0,11; 0,11	0,11; 0,10	0,11; 0,11
Interpretación		"Medio"		"Medio"
Fósforo (mg kg ⁻¹)	8,76; 8,70	14,02; 14,00	15,41; 15,22	16,51; 16,23
Interpretación	"Medio"		"Alto"	
Densidad aparente (g cm ⁻³)	1,24; 1,25	1,37; 1,37	1,42; 1,37	1,26; 1,21
Interpretación		"Francos" y "Arenosos"		

americana se encontró mayoritariamente, la textura "Franco" que retiene la humedad sin saturarse.

Contribución de autores

Participación activa en la revisión bibliográfica: Vicente Arturo Velasco Velasco, Judith Ruiz Luna y José Raymundo Enríquez del Valle; participación activa en la elaboración de la metodología: Vicente Arturo Velasco Velasco, Judith Ruiz Luna y Yuri Villegas Aparicio; participación activa en la discusión de los resultados: Vicente Arturo Velasco Velasco, Judith Ruiz Luna y Karen del Carmen Guzmán Sebastián; revisión y aprobación de la versión final del artículo: Vicente Arturo Velasco Velasco y Judith Ruiz Luna.

LITERATURA CITADA

- Álvarez-Sánchez, M. E., J. Velázquez-Mendoza, R. Maldonado-Torres, G. Almaguer-Vargas y A. L. Solano-Agama. 2010. Diagnóstico de la fertilidad y requerimiento de cal de suelos cultivados con agave azul (*Agave tequilana* Weber). Revista Terra Latinoamericana 28(3):287-293.
- Arzate-Fernández, A. M., I. Martínez-Velasco, C. Álvarez-Aragón, S.Y. Martínez-Martínez, S, y H. T. Norman-Mondragón. 2020. Respuesta morfogenética de dos especies de agave regeneradas *in vitro*. Tropical and Subtropical Agroecosystems 23(47):1-16.
- Bautista J. A. y M.A. Smit. 2012. Sustentabilidad y agricultura en la "región del mezcal" de Oaxaca. Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas 3(1):5-20. <https://doi.org/10.29312/remexca.v3i1.1477>

- Borjas-Ventura, R., A. Julca-Otiniano y L. Alvarado-Huamán. 2020. Las hormonas vegetales, un componente importante del desarrollo de la agricultura. Revista de la Biosfera Selva Andina 8(2):150–164.
- Cancino-García, V. H., J. H. Ramírez-Prado y C. De la Peña. 2020. La percepción de auxinas en el agave depende de los factores de respuesta a la auxina de la especie. Informes científicos. Sci. Rep. 10: 3860. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-60865-y>
- Cervera-Herrera, J. C., J. L. Leirana-Alcocer y J. A. Navarro-Alberto. 2018. Factores ambientales relacionados con la cobertura de *Agave angustifolia* (Asparagaceae) en el matorral costero de Yucatán, México. Acta Botánica Mexicana 124:75–84. <https://doi.org/10.21829/abm124.2018.1252>
- Choi, J., D. Choi, S. Lee, C. Ryu y I. Hwang. 2011. Citoquininas e inmunidad vegetal: ¿viejos enemigos o nuevos amigos? Tendencias Ciencia de las Plantas 16(7):388-394. <https://doi.org/10.1016/j.tplants.2011.03.003>
- Cisne-Contreras, J., Á. Benavides-González y R. Laguna-Miranda. 2010. Producción de hijas de estolones en dos variedades de fresa (*Fragaria spp*) en El Castillito, Las Sabanas, Madriz. La Calera 9(12):41–45. <https://doi.org/10.5377/calera.v9i12>.
- COMERCAM- Consejo Mexicano Regulador de la Calidad del Mezcal. 2023. Informe estadístico. Disponible en: https://comercam-dom.org.mx/wp-content/uploads/2023/05/INFORME-2023_PUBLICO.pdf. (Consulta 03 de abril 2024).
- CONABIO- Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad. 2006. Mapa de mezcales y diversidad. Disponible en: <https://www.biodiversidad.gob.mx/usos/mezcales/mMapa.html>. (Consulta 20 de marzo 2024).
- Cortleven, A., J.E Leuendorf, M. Frank, D. Pezzetta, S. Bolt y T. Schmülling. 2019. Acción de citoquinas en respuesta al estrés abiótico y biótico en plantas. Entorno de Células Vegetales 42(3):998–1018.
- Cruz-García, H., J. R. Enríquez-del Valle, G. V. Campos-Angeles, G. Rodríguez-Ortiz y V.A. Velasco-Velasco. 2019. Desarrollo de plantas micropagadas de *Agave americana* var. Oaxacensis durante su aclimatación en invernadero. Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas 10(7):1491–1503. <https://doi.org/10.29312/remexca.v10i7.1625>
- Cruz-Vasconcelos, S. T., C. Ramírez-Herrera, N. Cruz-Huerta, A. Gómez-Guerrero y J.V. Reyes-Hernández. 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. <https://doi.org/10.35196/rfm.2024.1.27>
- Delgado-Lemus, A. M. 2008. Aprovechamiento y disponibilidad espacial de *Agave potatorum* en San Luis Atolotitlán, Puebla, México. Tesis de Maestría en ciencias. Universidad Nacional Autónoma de México, México. Disponible en: <https://repositorio.unam.mx/contenidos/97852>
- Dévora-Rodríguez, D. G., C. Pulido-Díaz, J.A. Chávez-Simental, I. A. Ortiz-Sánchez, H.M. Loera-Gallegos y J.A. Prieto-Ruiz. 2021. Reguladores de crecimiento en el desarrollo vegetativo de vitroplantas de *Agave durangensis* Gentry. Ecosistemas y Recursos Agropecuarios 8(1):2720. <https://doi.org/10.19136/era.a8n1.2720>
- Fernández, M. 2007. Fósforo: amigo o enemigo. ICIDCA. Sobre los Derivados de la Caña de Azúcar XLI(2):51–57.
- Flores, L., H. E., J. A. Ruiz C., R. A. Martínez P., D. R. González E. y L. Nava V. 2009. Determinación del potencial productivo de especies vegetales para el estado de Jalisco: Distrito de Desarrollo Rural 066 Lagos de Moreno. Folleto Técnico Núm. 2. INIFAP-CIRPAC-C.E. Altos de Jalisco. Tepatitlán, Jal. México. 54 p.
- Fregoso-Zamorano, B. E., O.R. Mancilla-Villa, R. D. Guevara-Gutiérrez, A. Moreno-Hernández, P. Figueroa-Bautista, Á. Can-Chulim y V. M. Villalvazo-López. 2023. Caracterización edafológica con cultivo de agave azul (*Agave tequilana* Weber) en Tonaya y Tuxcacuesco, Jalisco, México. Revista Terra Latinoamericana 41. <https://doi.org/10.28940/terra.v41i0.1592>
- Garay-Arroyo, A., M. P. Sánchez, B. García-Ponce, E. R. Alvarez-Buylla y C. Gutiérrez. 2014. La homeostasis de las auxinas y su importancia en el desarrollo de *Arabidopsis thaliana*. REB-Revista de Educación Bioquímica 33(1):13-22.
- García Mendoza, A. J. 2007. Los agaves de México. Ciencias 87:14–23.
- García-Mendoza, A.J. 2004. Agaváceas. En: García-Mendoza, A.J., M.J. Ordóñez, M. J., Briones-Salas, M. A. (eds.). Biodiversidad de Oaxaca. p:159-169. Instituto de Biología, UNAM-Fondo Oaxaqueño para la Conservación de la Naturaleza- Worl Wild Life Fund, México.

- Gentry, S. A. 2021. Agaves de América del Norte continental. Prensa de la Universidad de Arizona 25-47 p. <https://doi.org/10.2307/j.ctv1t4m2h4>
- Illsey-Granich, C., D. Giovannucci, y C. Bautista. 2009. La dinámica territorial de la zona mezcalera de Oaxaca. Entre la cultura y el comercio. Centro Latinoamericano para el Desarrollo Rural. Grupo de Estudios Ambientales, A.C. 37 p. Disponible en: <https://www.rimisp.org/wp-content/uploads/2013/03/22rimispCardumen.pdf>. (Consulta 20 marzo 2024).
- INIFAP. 2012. Agave (*Agave tequilana* Weber Azul). Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias. Disponible en: [Http://www.Inifapcirne.Gob.Mx/Biblioteca/Paquetes2012/14.Pdf](http://www.Inifapcirne.Gob.Mx/Biblioteca/Paquetes2012/14.Pdf). (Consulta 12 de abril 2024).
- Nieto, A. R., J. Vargas M., J. C. Nieto A., A. Rodríguez O., V. M. Jiménez P., J. Hernández C. y M. Ortíz B. 2016. El cultivo de maguey pulquero (*Agave salmiana*) en el Valle del Mezquital. Universidad Politécnica de Francisco I. Madero, Hidalgo, México. 52 p.
- Nobel, P. S. 2011. Sabiduría del Desierto, Agaves y Cactus: CO₂, Agua, Cambio Climático. 2a edición. Colegio de Postgraduados. Texcoco, México. 172 p.
- NOM-021-SEMARNAT-2000. Disponible en: <http://www.ordenjuridico.gob.mx/Documentos/Federal/wo69255.pdf> (Consulta 9 marzo 2024).
- Palma-Cruz, F. de J. 2000. Agaves productores de fibras duras en el estado de Oaxaca, México. Boletín de la Sociedad Botánica de México 66(1):93-102. <https://doi.org/10.17129/botsci.1615>.
- Reyes-Zambrano, S.J., C.A. Lecona-Guzmán, F.A. Barredo-Pool, J.D. Ambrosio-Calderón, M. Abud-Archila y R. Rincón-Rosales. 2016. Optimización de los reguladores de crecimiento para maximizar el número de brotes en *Agave americana* L. por organogénesis indirecta. Gayana Botánica 73(1):120-129. <https://doi.org/10.4067/S0717-66432016000100014>
- Ríos Ramírez, S. del C., J.R. Enríquez del Valle, G. Rodríguez Ortiz, J. Ruiz Luna, y V.A. Velasco Velasco. 2021. Crecimiento de *Agave angustifolia* Haw. con relación a la condición nutrimental. Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas 12(5):865-873. <https://doi.org/10.29312/remexca.v12i5.2638>
- Ruiz-Corral, J. 2007. Requerimientos agroecológicos y potencial productivo del *Agave tequilana* Weber en México. Ed. Conocimiento y prácticas agronómicas para la producción de *Agave tequilana* Weber en la zona de denominación de origen del tequila. Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP). Centro de Investigación Regional del Pacífico Centro. p. 11-36. Disponible en: http://www.inifapcirne.gob.mx/Revistas/Archivos/agave_final_baja%20resolucion.pdf
- Sánchez-Mendoza, S., y A. Bautista-Cruz. 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). <https://doi.org/10.22201/enesl.20078064e.2022.24.82738>
- Steiner, A. A. 1961. Un método universal para preparar soluciones nutritivas de una determinada composición deseada. Planta y suelo 15(2):134-154. <https://doi.org/10.1007/BF01347224>
- Taiz, L. y E. Zeiger 2010. Fisiología vegetal. 5^a edición. Sinauer Associates Inc. Sunderland, Massachusetts, USA. 782 p.
- Torres, I. 2009. Dinámica poblacional de dos morfos de *Agave potatorum* Zucc. en el Valle de Tehuacán- Cuicatlán: Bases para su manejo sustentable. Tesis de Maestría en Ciencias. Universidad Nacional Autónoma de México. Disponible en: <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.11655.60327>
- Torres, I., A. Casas., A. Delgado-Lemus y S. Rangel-Landa. 2013. Aprovechamiento, demografía y establecimiento de *Agave potatorum* en el Valle de Tehuacán, México: Aportes etnobiológicos y ecológicos para su manejo sustentable. Zonas Áridas 15(1):92-109.
- Trejo-Salazar, R. E., E. Scheinvar y L. E. Eguiarte. 2015. ¿Quién poliniza realmente los agaves? Diversidad de visitantes florales en 3 especies de *Agave* (Agavoideae: Asparagaceae). Revista Mexicana de Biodiversidad 86:358-369. <https://doi.org/10.1016/j.rmb.2015.04.007>
- Troiani, H. O., A. O. Prina, W. A. Muñoz, M. A. Tamame y L. Beinticinco. 2017. Botánica, Morfología, Taxonomía y Fitogeografía. Universidad Nacional de La Pampa. Santa Rosa, La Pampa, Argentina. 321 p.
- Valenzuela, Z., A. G. 2003. El agave tequilero: cultivo e industria de México. Mundi-Prensa. México, D. F. 115 p.

Vega-Celedón, P., H. Canchignia Martínez, M. González y M. Seeger. 2016. Biosíntesis de ácido indol-3-acético y promoción del crecimiento de plantas por bacterias. *Cultivos Tropicales* 37(especial):33–39.

Yoshida, H., E. Tanimoto, T. Hirai, Y. Miyanoiri, R. Mitani, M. Kawamura y M. Ueguchi-Tanaka. 2018. Evolución y diversificación del receptor de giberelina vegetal GID1. *Actas de la Academia Nacional de Ciencias de los Estados Unidos de América* 115(33):E7844–E7853. <https://doi.org/10.1073/pnas.1806040115>

