

Combinación de hongos micorrízicos y fertilización fosforada en el crecimiento de dos agaves silvestres

Combination of mycorrhizal fungi and phosphorus fertilization in the growth of two wild agaves

Ledia Itzel García-Martínez¹ , Saúl Sánchez-Mendoza¹  y Angélica Bautista-Cruz^{2*} 

¹ NovaUniversitas, Carretera Oaxaca a Puerto Ángel km 35.5. 71510 Ocotlán de Morelos, Oaxaca, México.

² Instituto Politécnico Nacional, CIIDIR-Oaxaca. Hornos 1003, Col. Noche Buena. 71230 Xoxocotlán, Oaxaca, México.

* Autora para correspondencia (mbautistac@ipn.mx)

RESUMEN

Los hongos micorrízicos arbusculares pueden contribuir significativamente en la nutrición vegetal, en especial en la asimilación de fósforo (P). Los agaves silvestres son sobreexplotados debido a la producción intensiva de mezcal, ocasionando la disminución de sus poblaciones naturales. Se evaluó el efecto de la inoculación con hongos micorrízicos arbusculares comerciales y la aplicación de diferentes dosis de P sobre el crecimiento y contenido de sólidos solubles totales (SST) de dos agaves silvestres: agave tobalá (*Agave potatorum* Zucc) y agave coyote (*Agave* spp.) en condiciones protegidas. Los productos micorrízicos comerciales utilizados fueron *Glomus cubense* (M1) y Glumix (M2) y cuatro dosis de P: 0, 14.4, 29 y 43.5 mg kg⁻¹. El ensayo se estableció en un experimento bifactorial 3 × 4 en un diseño completamente al azar. Las variables respuesta fueron altura de planta (AP), número de hojas (NH), diámetro de tallo (DT), volumen radicular (VR), densidad de raíces (DR), peso fresco de hoja (PFH), peso fresco de tallo (PFT), peso fresco de raíz (PFR) y SST. Con referencia al control, M2 incrementó 18.2% el NH, 53.5% el PFH, 38.1% el PFT y 36% el DT en agave tobalá; mientras en agave coyote, la AP aumentó 12% y el SST 21.3%. En agave tobalá la dosis de 43.5 mg kg⁻¹ de P mejoró 13.2% la AP, 34.9% el PFH, 36.1% el PFT, 21.5% el DT y 20.4% el VR. En agave coyote la dosis de 29 mg kg⁻¹ de P aumentó 16.4% la AP, 44.4% el PFT y 18.6% el DT; el SST incrementó 40% con 43.5 mg kg⁻¹ de P

y el PFH 51% con 14.4 mg kg⁻¹ de P. En agave tobalá, M2 + 43.5 mg kg⁻¹ de P favoreció el PFH, PFT y DT. En agave coyote, M2 + 14.4 mg kg⁻¹ de P, M2 + 29 mg kg⁻¹ de P y M2 + 43.5 mg kg⁻¹ de P promovieron la AP, DT y SST. La promoción en el crecimiento de ambos agaves se debió a la aplicación individual de micorrizas y P más que a la interacción de ambos factores.

Palabras clave: agave mezcalero, fertilización fosforada, micorrizas, nutrición vegetal.

SUMMARY

Arbuscular mycorrhizal fungi can contribute significantly to plant nutrition, especially in the phosphorus (P) assimilation. Wild agave populations are overexploited due to the intensive production of mezcal, causing the decline of natural populations. The effect of the inoculation with commercial mycorrhizal fungi and the application of different doses of P on the growth and total soluble solids content (SST) of two wild agaves: tobalá agave (*Agave potatorum* Zucc) and coyote agave (*Agave* spp.) in protected conditions was evaluated. The commercial mycorrhizal products used were *Glomus cubense* (M1) and Glumix (M2) and four doses of P: 0, 14.4, 29 and 43.5 mg kg⁻¹. The assay was established into a 3 × 4 bifactorial experiment in a completely randomized design. The response variables were plant height (AP), number of leaves (NH), stem diameter (DT), root volume (VR), root density (DR), leaf fresh weight (PFH), stem fresh weight (PFT), root fresh weight (PFR), root fresh weight (PFT), root

Cita recomendada:

García-Martínez, L. I., S. Sánchez-Mendoza y A. Bautista-Cruz. 2020. Combinación de hongos micorrízicos y fertilización fosforada en el crecimiento de dos agaves silvestres. *Terra Latinoamericana* 38: 771-780. DOI: <https://doi.org/10.28940/terra.v38i4.702>

Recibido: 11 de diciembre de 2019.

Aceptado: 23 de mayo de 2020.

Publicado en *Terra Latinoamericana* 38: 771-780.

fresh weight (PFR) and SST. In regard to the control, M2 increased NH by 18.2%, PFH by 53.5%, PFT by 38.1% and DT by 36% in tobalá agave; whereas in coyote agave, AP increased by 12% and SST by 21.3%. In tobalá agave the dose of 43.5 mg kg⁻¹ of P improved the AP by 13.2%, PFH by 34.9%, PFT by 36.1%, DT by 21.5% and VR by 20.4%. In coyote agave, the dose of 29 mg kg⁻¹ of P favored the AP by 16.4%, PFT by 44.4% and DT by 18.6%. SST increased 40% with 43.5 mg kg⁻¹ of P and the PFH increased 51% with 29 mg kg⁻¹ of P. In tobalá agave, M2 + 43.5 mg kg⁻¹ of P improved the PFH, PFT and DT. In coyote agave, M2 + 29 mg kg⁻¹ of P, M2 + 14.4 mg kg⁻¹ of P and M2 + 43.5 mg kg⁻¹ of P promoted AP, DT and SST. The promotion of growth in both agaves was rather due to the individual application of mycorrhizal fungi and P than the interaction of both factors.

Index words: *mezcalero agave*, *phosphorus fertilization*, *mycorrhizal fungi*, *plant nutrition*.

INTRODUCCIÓN

La simbiosis micorrízica arbuscular es una de las estrategias más comunes que las plantas utilizan para incrementar la absorción de nutrientes (Montero *et al.*, 2010), esta asociación simbiótica contribuye a la absorción de fósforo (P) y nitrógeno (N) (Smith y Smith, 2011) y puede aumentar la cantidad de agua disponible para la planta en regiones áridas y semiáridas (Baum *et al.*, 2015). Los hongos micorrízicos son capaces de activar mecanismos de defensa frente a patógenos en plantas hospederas (Olawuyi *et al.*, 2014) e inducir cambios en la fisiología vegetal (Armada *et al.*, 2015). Diversos estudios han mostrado la eficiencia de los hongos micorrízicos en la promoción del crecimiento de plantas como *Agave angustifolia* Haw. (Robles-Martínez *et al.*, 2013), *Aloe vera* L. (Mota-Fernández *et al.*, 2011), *Agave tequilana* Weber, var. Azul (Pimienta-Barrios *et al.*, 2009) y *Agave inaequidens* K. Koch (Quiñones-Aguilar *et al.*, 2016). Por otra parte, el P es uno de los principales macronutrientes responsables del crecimiento de las plantas y el desarrollo de las raíces, es esencial para muchos procesos metabólicos, incluyendo la fotosíntesis, la descomposición de los azúcares y la transferencia de energía y nutrientes (Lynch y Brown, 2008), cuando la planta cuenta con un abastecimiento limitado de P, aun cuando el resto

de los nutrientes estén en concentraciones adecuadas, se manifiesta un crecimiento, desarrollo y nutrición deficiente (Martínez-Ramírez *et al.*, 2013).

Muchas especies silvestres del género *Agave* son económicamente importantes para el estado de Oaxaca, México, ya que constituyen la materia prima para la producción de mezcal, bebida alcohólica tradicional oaxaqueña (Chagoya-Méndez, 2004). Debido a la producción intensiva de mezcal (1 360 259 L en 2014), los agaves silvestres tienen alta demanda (Consejo Regulador del Mezcal, 2016), lo que genera una sobreexplotación que trae como consecuencia que sus poblaciones naturales se vean seriamente amenazadas (García-Mendoza, 2007), por lo que es necesario realizar investigaciones enfocadas a su manejo agronómico. Generalmente los suelos donde se desarrollan especies del género *Agave*, son pobres en materia orgánica, N y P (Bautista-Cruz *et al.*, 2007). Estudios previos han revelado efectos positivos de la aplicación de P sobre el crecimiento de agaváceas, variables como altura de planta, número de hojas desplegadas, diámetro de tallo y acumulación de biomasa son las que mejor respuesta han presentado (Martínez-Ramírez *et al.*, 2013; Luna-Luna *et al.*, 2017). El objetivo de este trabajo fue evaluar el efecto de la inoculación con hongos micorrízicos comerciales y la aplicación de diferentes dosis de P sobre el crecimiento y contenido de sólidos solubles totales (SST) de dos agaves silvestres: agave tobalá (*Agave potatorum* Zucc) y agave coyote (*Agave* spp.) en condiciones protegidas.

MATERIALES Y MÉTODOS

Área de Estudio

El estudio se realizó en Ocotlán de Morelos (16° 48' N, 96° 40' O), Oaxaca, México, a 1523 m de altitud, temperatura media anual de 20.5 °C y precipitación media anual de 695 mm. Se colectaron semillas de agave tobalá y agave coyote en el Municipio de Santa Catarina Minas perteneciente al distrito de Ocotlán de Morelos. Se seleccionaron plantas sanas que presentaron la mayor altura y diámetro de tallo. Se colectaron frutos (cápsulas) vigorosos y libres de plagas, de cada fruto se seleccionaron semillas sanas las cuales se almacenaron en bolsas de papel kraft de 30.5 × 13 × 8 cm (calibre 60 g).

Inoculación con Hongos Micorrízicos Comerciales y Aplicación de Diferentes Dosis de Fósforo en Agaves Silvestres

Las semillas de agave se colocaron en charolas germinadoras de poliestireno de 200 cavidades, como sustrato se utilizó una mezcla de suelo franco arcilloso, arena y estiércol vacuno composteado en una proporción 2:1:1 v/v. Se aplicaron riegos en intervalos de tres a cinco días, periodo en el cual visiblemente se apreció que el sustrato disminuyó su contenido de humedad. Después de dos meses de crecimiento de las plántulas de agave en charolas germinadoras en condiciones protegidas en un macro túnel de 8×4 m con cubierta plástica, se trasplantaron a bolsas de polietileno de 20×16 cm, las cuales se llenaron con 3.5 kg del mismo sustrato empleado en la siembra de semillas. Se evaluaron cuatro dosis de P (superfosfato de calcio triple (00-46-00%): 0, 14.4, 29 y 43.5 mg kg⁻¹ y, dos productos micorrízicos comerciales en polvo: *Glomus cubense* (M1) (Comité Estatal de Fertilizantes Orgánicos) (equivalente a 5000 esporas viables en 100 g de inóculo) y Glumix (Biokrone) (M2) (*Glomus fasciculatum*, *Glomus constrictum*, *Glomus tortuosum*, *Glomus geosporum*, *Glomus intraradices*, equivalente a 2000 esporas viables en 100 g de inóculo). El fertilizante fosforado se aplicó en forma circular a 5 cm del tallo y 5 cm de profundidad. Una semana después de la aplicación del fertilizante se aplicaron 5 g de inóculo micorrízico directamente a la raíz de cada planta. Se efectuaron dos aplicaciones de productos micorrízicos y fertilizante; la primera, dos semanas después del trasplante y la segunda a los seis meses. Cada planta se regó con aproximadamente 1 L de agua corriente una vez por semana. El tiempo total de evaluación fue de 12 meses a partir del trasplante en condiciones protegidas.

El experimento se estableció en un diseño completamente al azar con arreglo bifactorial 3×4 , con un total de 12 tratamientos y 10 repeticiones para cada uno. La unidad experimental fue una maceta con una planta de agave. Los factores y niveles de estudio fueron: 1) tipo de producto micorrízico y, 2) dosis de P. Al final del periodo de evaluación a todas las plantas se le determinó altura (AP), número de hojas (NH); diámetro de tallo (DT) con un vernier digital marca Maxwell; volumen radicular (VR) en una probeta de 250 mL con un volumen conocido de agua se

introdujeron las raíces y se midió el volumen de agua desplazado; densidad de raíces (DR) por medio de la relación masa-volumen; peso fresco de hoja (PFH), tallo (PFT) y raíz (PFR). El contenido de sólidos solubles totales en tallo (SST) se determinó con un refractómetro portátil RHB-32 ATC.

Análisis Estadístico

Los datos obtenidos se sometieron a análisis de varianza de clasificación doble y pruebas múltiples de separación de medias de Tukey con nivel de significancia $P \leq 0.05$, mediante el software estadístico SAS v. 9.1 (SAS Institute, 2004).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Efecto de Productos Micorrízicos Comerciales en el Crecimiento y Contenido de Sólidos Solubles Totales en Agaves Silvestres

Con respecto al control sin inoculación micorrízica, M2 incrementó 18.2% el NH, 53.5% el PFH, 38.1% el PFT y 36% el DT en agave tobalá (Cuadro 1). En agave coyote la AP aumentó 12% y los SST 21.3%, con M2 (Cuadro 2). Trinidad-Cruz *et al.* (2017) reportaron incrementos para PFH y biomasa seca total en *A. cupreata* inoculado con un consorcio formulado con *Acaulospora morrowiae*, *A. spinosa*, *Claroideoglomus etunicatum*, *Funneliformis geosporum* y *F. mosseae*. Robles-Martínez *et al.* (2013) no encontraron diferencias significativas en el peso seco de raíces de *A. angustifolia* Haw. inoculado con los consorcios micorrízicos denominados CN1, CN2, CN3, CN4, CN5, CN6 y GI con respecto al control. Se observó en los resultados obtenidos que la inoculación micorrízica tampoco favoreció la acumulación de biomasa radicular en las dos especies de agave evaluadas. Quiñones-Aguilar *et al.* (2016) reportaron incrementos en el DT y PFH de *A. inaequidens* inoculado con *Glomus deserticola*. Estos mismos autores describen que el PFR y la biomasa fresca total en plantas de *A. inaequidens* aumentó en presencia de la inoculación de *Acaulospora excavata*. En este caso, la inoculación micorrízica también promovió incrementos en DT, PFH y PFT en plantas de agave tobalá. Pimienta-Barríos *et al.* (2009) no encontraron diferencias significativas en el NH de *A. tequilana*

Cuadro 1. Valor medio de variables de crecimiento y sólidos solubles totales en el tallo de *Agave potatorum* Zucc (agave tobalá) como respuesta a la aplicación de dos productos micorrízicos comerciales y cuatro dosis de P.**Table 1. Average value of growth variables and total soluble solids in the stem of *Agave potatorum* Zucc (tobalá agave) in response to the application of two commercial mycorrhizal products and four doses of P.**

Factor	AP	NH	PFH	PFT	PFR	DT	DR	VR	SST
	cm		----- g -----			cm	g cm ⁻³	cm ⁻³	°Brix
P (mg kg ⁻¹)									
0	9.61 b	11.10 a	94.79 b	26.28 b	8.98 a	3.29 b	1.32 a	7.13 ab	8.80 a
14.4	9.81 ab	11.33 a	102.25 ab	28.73 ab	6.65 a	3.61 ab	1.06 a	7.80 ab	8.06 a
29.0	9.43 b	10.86 a	87.82 b	26.70 ab	6.82 a	3.59 ab	1.07 a	6.53 b	7.93 a
43.5	10.88 a	11.83 a	127.89 a	35.78 a	7.85 a	4.00 a	1.13 a	10.00 a	7.33 a
DMS	1.22	1.55	31.67	9.37	2.74	0.48	0.36	3.01	1.74
Micorriza									
M1	9.91 a	10.92 b	95.88 b	29.78 ab	8.03 a	3.79 a	1.33 a	6.75 a	7.60 b
M2	10.15 a	12.42 a	129.42 a	33.84 a	8.17 a	4.08 a	0.98 b	8.85 a	7.15 b
Control	9.71 a	10.50 b	84.26 b	24.49 b	6.53 a	3.00 b	1.13 ab	8.00 a	9.35 a
DMS	0.97	1.22	24.93	7.38	2.16	0.38	0.28	2.37	1.37

DMS = diferencia mínima significativa; CV = coeficiente de variación; AP = altura de planta; NH = número de hojas; PFH = peso fresco de hoja; PFT = peso fresco de tallo; PFR = peso fresco de raíz; DT = diámetro de tallo; DR = densidad de raíces; VR = volumen radicular; SST = sólidos solubles totales en tallo. M1 = *Glomus cubense*; M2 = Glumix. Medias con letras iguales por columna no son estadísticamente diferentes (Tukey, $P < 0.05$).

DMS = least significant difference; CV = coefficient of variation; AP = plant height; NH = number of leaves; PFH = fresh weight of leaf; PFT = fresh stem weight; PFR = fresh weight of root; DT = stem diameter; DR = root density; VR = root volume; SST = total soluble solids in stem. M1 = *Glomus cubense*; M2 = Glumix. Means with the same letters per column are not statistically different (Tukey, $P < 0.05$).

Cuadro 2. Valor medio de variables de crecimiento y sólidos solubles totales en el tallo de *Agave* spp. (agave coyote) como respuesta a la aplicación de dos productos micorrízicos comerciales y cuatro dosis de P.**Table 2. Average value of growth variables and total soluble solids in the stem of *Agave* spp. (coyote agave) in response to the application of two commercial mycorrhizal products and four doses of P.**

Factor	AP	NH	PFH	PFT	PFR	DT	DR	VR	SST
	cm		----- g -----			cm	g cm ⁻³	cm ⁻³	°Brix
P (mg kg ⁻¹)									
0	17.58b	13.40a	131.97b	46.403b	12.22a	4.02b	0.97a	12.73a	8.66b
14.4	17.58b	13.46a	199.31a	66.37a	11.74a	4.73a	0.86a	14.13a	7.93b
29.0	20.47a	14.06a	184.79ab	67.01a	14.72a	4.77a	0.85a	17.33a	9.33ab
43.5	16.68b	13.03a	139.77b	59.22ab	13.34a	4.58ab	0.89a	15.00a	12.13a
DMS	2.16	2.13	56.99	19.89	4.00	0.56	0.13	4.66	2.97
Micorriza									
M1	17.65ab	12.87a	149.85a	58.97a	11.17b	4.38a	0.81b	13.85a	8.30b
M2	19.33a	14.32a	182.72a	63.23a	13.15ab	4.78a	0.90ab	15.00a	11.10a
Control	17.25b	13.27a	159.31a	57.65a	14.70a	4.42a	0.96a	15.55a	9.15ab
DMS	1.7	1.68	44.85	15.68	3.15	0.44	0.103	3.67	4.32
CV (%)	17.76	23.49	35.77	34.2	31.67	12.72	14.96	32.42	32.21

DMS = diferencia mínima significativa; CV = coeficiente de variación; AP = altura de planta; NH = número de hojas; PFH = peso fresco de hoja; PFT = peso fresco de tallo; PFR = peso fresco de raíz; DT = diámetro de tallo; DR = densidad de raíces; VR = volumen radicular; SST = sólidos solubles totales en tallo. M1 = *Glomus cubense*; M2 = Glumix. Medias con letras iguales por columna no son estadísticamente diferentes (Tukey, $P < 0.05$).

DMS = least significant difference; CV = coefficient of variation; AP = plant height; NH = number of leaves; PFH = fresh weight of leaf; PFT = fresh stem weight; PFR = fresh weight of root; DT = stem diameter; DR = root density; VR = root volume; SST = total soluble solids in stem. M1 = *Glomus cubense*; M2 = Glumix. Means with the same letters per column are not statistically different (Tukey, $P < 0.05$).

inoculado con *G. intraradices* y *G. fasciculatum* con respecto al control, resultado contrario al reportado en este estudio. Los estudios que evalúen el efecto de hongos micorrízicos como promotores de la síntesis de azúcares en agaves son escasos. No se ha observado un incremento en el contenido de sacarosa, fructuosa y glucosa en el tallo de plantas de *A. americana* inoculadas con *Glomus fasciculatum* y *Penicillium* sp. (Zacaría-Toledo *et al.*, 2016). En este estudio no se obtuvo un efecto positivo de los productos micorrízicos en el SST en el tallo de agave tobalá, pero sí en agave coyote.

Efecto de Diferentes Dosis de Fósforo en el Crecimiento y Contenido de Sólidos Solubles Totales en Agaves Silvestres

Con respecto al control, en agave tobalá con la dosis de 43.5 mg kg⁻¹ de P se obtuvieron incrementos de 13.2, 34.9, 36.1 y 21.5% para AP, PFH, PFT y DT, respectivamente (Cuadro 1). En agave coyote con la dosis de 29 mg kg⁻¹ de P se registró un aumento de 16.4% para AP, 44.4% para PFT y 18.6% para DT. Con 43.5 mg kg⁻¹ de P el aumento fue de 40% para SST, con 14.4 mg kg⁻¹ de P fue de 51% para PFH (Cuadro 2). Son pocos los estudios que evalúan el efecto individual del P en el crecimiento de agaves. En *A. tequilana* el rendimiento estimado del tallo se duplicó con respecto al control cuando las plantas se fertilizaron con 120N-80P-60K kg ha⁻¹ (Valenzuela y González, 1995). Similarmente, Enríquez del Valle (2007) reportó que plantas de *A. angustifolia* que crecieron en vivero incrementaron en AP, DT, NH, área foliar y acumulación de materia seca como respuesta a un mayor abastecimiento de nutrimentos (10 kg de N y 15 kg de P) y cuando estas plantas llegaron a la etapa adulta desarrollaron tallos más grandes y con mayor contenido de azúcares. Por otra parte, Martínez-Ramírez *et al.* (2013) tampoco encontraron diferencias significativas para NH al evaluar dosis de fertilización altas (90-60-45 kg ha⁻¹), medias (60-40-30 kg ha⁻¹) y bajas (30-20-15 kg ha⁻¹) en *A. potatorum* y *A. angustifolia*, los fertilizantes que aplicaron fueron superfosfato triple, sulfato de potasio y sulfato de amonio. Zacaría-Toledo *et al.* (2016) encontraron que la adición de 10 g de vermicomposta y 1 g de roca fosfórica en plantas de

A. americana cultivadas en contenedores favoreció el contenido de fructuosa y fructanos en tallo. En este caso, la adición de P benefició el SST en el tallo de agave coyote, pero no en agave tobalá. Los resultados positivos de la aplicación de P en las variables de crecimiento y acumulación de biomasa en las plantas de agave posiblemente se deben a que el P es uno de los principales macronutrientes responsables del crecimiento de las plantas y el desarrollo de las raíces, ya que es constituyente de compuestos tales como enzimas y proteínas, un componente estructural de fosfoproteínas, fosfolípidos y ácidos nucleicos, es esencial para muchos procesos metabólicos, incluyendo la fotosíntesis, la descomposición de los azúcares y la transferencia de energía y nutrimentos (Lynch y Brown, 2008).

Efecto de la Interacción de Dos Productos Micorrízicos Comerciales y Cuatro Dosis de Fósforo en el Crecimiento de Agaves Silvestres

Aunque se observó una respuesta significativa en el PFH, PFT y DT en agave tobalá con la aplicación conjunta de micorrizas y P, fue el factor micorriza el que generó la mayor variación en estas variables, superando los niveles de variabilidad generados por el factor P y la interacción M + P que le siguieron en importancia (Cuadro 3). Con respecto al control, la interacción M2 + 43.5 mg kg⁻¹ de P generó incrementos de 136.5% para PFH, 106.2% para PFT y 64.3% para DT en agave tobalá. El SST incrementó 22.2% con la interacción sin micorriza + 29 mg kg⁻¹ de P (Cuadro 4). Esto sugiere que independientemente de las concentraciones de P en el suelo, los hongos micorrízicos son capaces de facilitar la absorción del nutriente (Quiñones-Aguilar *et al.*, 2014). Por ejemplo, Smith y Smith (2011) reportaron que las plantas de *Trifolium subterraneum* L. inoculadas con *G. mosseae* + P triplicaron su contenido de P en el tejido, en comparación con las inoculadas con *G. mosseae* sin P, lo cual indicó que la micorriza continuó transfiriendo el nutriente, incluso con suficiencia de este elemento.

En agave coyote la AP aumentó 37.9% con la interacción M2 + 29 mg kg⁻¹ de P, el DT incrementó 37.3% con M2 + 14.4 mg kg⁻¹ de P y el SST aumentó

Cuadro 3. Cuadrados medios y nivel de significancia de algunas variables de crecimiento y sólidos solubles totales en el tallo de plantas de *Agave potatorum* Zucc (agave tobalá) y *Agave* spp. (agave coyote) como respuesta a la aplicación de productos micorrízicos comerciales, diferentes dosis de P y la interacción de ambos factores.

Table 3. Mean squares and level of significance of some growth variables and total soluble solids in the stem of plants of *Agave potatorum* Zucc (tobalá agave) and *Agave* spp. (coyote agave) in response to the application of commercial mycorrhizal products, different doses of P and the interaction of both factors.

FV	GL	PFH	PFT	PFR	DT	DR	VR	SST	FV	GL	AP	NH
		- - - - - g - - - - -			cm	g cm ⁻³	cm ⁻³	°Brix			cm	
Agave tobalá									Agave tobalá			
M	3	10997.41*	440.17*	16.52	6.29*	0.59*	22.31	27.01*	M	2	1.96	40.90*
P	3	4589.53*	290.76*	17.28	1.27*	0.20	34.35*	5.44	P	3	12.95*	5.12
M×P	9	2404.95	185.73	41.88*	0.78*	0.23	17.13	10.66*	M×P	6	7.32*	6.79
Error	48	1062.64	93.12	7.99	0.24	0.14	9.63	0.03*	Error	108	3.33	5.33
CV (%)		31.59	32.85	37.28	13.74	32.88	39.45	22.41	CV (%)		10.38	20.47
Agave coyote									Agave coyote			
M	3	5724.26	170.44	62.79*	0.95	0.11*	15.05	41.21*	M	2	48.56*	22.43
P	3	16458.93*	1270.79*	26.32	1.84*	0.04	55.86	50.55*	P	3	81.97*	5.49
M×P	9	12711.43*	613.39	29.59	0.72	0.06*	33.38	22.95*	M×P	6	20.45	17.22
Error	48	3439.77	420.49	16.98	0.33	0.01	23.03	9.40	Error	108	10.31	10.04
CV (%)		35.77	34.20	31.67	12.72	14.96	32.42	32.21	CV (%)		17.76	23.49

FV = fuentes de variación; M = producto micorrízico comercial; P = dosis de fósforo; CV = coeficiente de variación; GL = grados de libertad; PFH = peso fresco de hoja; PFT = peso fresco de tallo; PFR = peso fresco de raíz; DT = diámetro de tallo; DR = densidad de raíces; VR = volumen radicular; SST = sólidos solubles totales en tallo; AP = altura de planta; NH = número de hojas; * Significativo $P \leq 0.05$.

FV = sources of variation; M = commercial mycorrhizal product; P = dose of phosphorus; CV = coefficient of variation; GL = degrees of freedom; PFH = fresh weight of leaf; PFT = fresh stem weight; PFR = fresh weight of root; DT = stem diameter; DR = root density; VR = root volume; SST = total soluble solids in stem; AP = plant height; NH = number of leaves; * Significant $P \leq 0.05$.

135.3% con M2 + 43.5 mg kg⁻¹ de P (Cuadro 5). Este efecto es atribuido principalmente al P, que fue el factor que generó la mayor variación en estas variables (Cuadro 3). El efecto de la aplicación conjunta micorriza + P ha sido evaluado en diversos cultivos, por ejemplo, en papaya (*Carica papaya*) al incrementar la dosis de P (0, 30, 60 y 90 mg kg⁻¹) aumentó la AP y el DT en plantas micorrizadas con *Glomus* sp. Zac-2 (Quiñones-Aguilar *et al.*, 2014), en este estudio se obtuvo una respuesta similar para estas variables en agave coyote. Mota-Fernández *et al.* (2011) evaluaron el efecto de la combinación micorriza + P (0.3, 0.6 y 0.9 mM) en plantas de *Aloe vera* y encontraron la mayor AP con el tratamiento 0.9 mM de P + *G. claroideum*, el mayor número de hojas se obtuvo con 0.3 mM de P + *G. fasciculatum*, para la variable peso fresco y seco de planta el

tratamiento 0.6 mM de P y sin micorriza presentó los valores más altos. Dias-Moreira *et al.* (2019) evaluaron el crecimiento de plantas de café inoculadas con *Rhizophagus clarus*, *Claroideoglossum etunicatum* y *Dentiscutata heterogama* fertilizadas con 0, 0.74, 1.48 y 2.96 g P₂O₅ kg⁻¹ y observaron mayor altura en las plantas inoculadas con *R. clarus* y *C. etunicatum*, con la dosis más baja de P (0.74 g P₂O₅ kg⁻¹). Arango *et al.* (2012) determinaron el efecto de la inoculación con *G. mosseae*, *G. intraradices* A₄ y *G. intraradices* B₁ y dos niveles de P (10 y 40 mg kg⁻¹) en el crecimiento de *Mentha piperita* L. Estos autores reportaron que *G. intraradices* A₄ y la dosis más alta de P promovió significativamente el desarrollo de esta planta. El efecto positivo de las interacciones M2 + 90 kg ha⁻¹ de P, M2 + 60 kg ha⁻¹ de P y SM + 90 kg ha⁻¹ de P en el crecimiento de agave tobalá y agave coyote,

Cuadro 4. Valor medio de variables de crecimiento y sólidos solubles totales en el tallo de *Agave potatorum* Zucc (agave tobalá) como respuesta a la interacción de dos productos micorrízicos comerciales y cuatro dosis de P.
Table 4. Average value of growth variables and total soluble solids in the stem of *Agave potatorum* Zucc (tobalá agave) as a response to the interaction of two commercial mycorrhizal products and four doses of P.

Interacción Micorriza+P	AP	NH	PFH	PFT	PFR	DT	DR	VR	SST
	cm		g			cm	g cm ⁻³	cm ⁻³	°Brix
SM+0 mg kg ⁻¹	9.65 ab	10.80 a	67.05 c	20.12 b	7.13 ab	2.66 e	1.15 a	6.40 ab	9.00 b
SM+14.4 mg kg ⁻¹	10.15 ab	11.00 a	98.53 abc	27.83 ab	8.79 ab	3.16 cde	0.96 a	9.20 ab	8.40 abc
SM+29.0 mg kg ⁻¹	9.46 ab	10.10 a	68.68 bc	21.79 ab	6.98 ab	2.95 e	1.07 a	6.60 ab	11.0 a
SM+43.5 mg kg ⁻¹	9.59 ab	10.10 a	102.78 abc	28.21 ab	3.22 b	3.22 bcde	1.35 a	9.80 ab	9.00 ab
M1+0 mg kg ⁻¹	9.15 ab	10.20 a	78.54 abc	25.28 ab	8.49 ab	3.12 de	1.37 a	7.00 ab	9.00 ab
M1+14.4 mg kg ⁻¹	8.99 ab	10.20 a	68.25 bc	21.54 ab	4.36 b	3.41 abcde	1.49 a	3.60 b	7.20 abc
M1+29.0 mg kg ⁻¹	10.03 ab	11.30 a	104.40 abc	34.69 ab	7.85 ab	4.21 abc	1.26 a	6.80 ab	7.80 abc
M1+43.5 mg kg ⁻¹	11.49 ab	12.00 a	132.33 abc	37.63 ab	11.44 a	4.43 a	1.18 a	9.60 ab	6.40 bc
M2+0 mg kg ⁻¹	10.03 ab	12.30 a	138.77 ab	33.45 ab	11.32 a	4.10 abcd	1.42 a	8.00 ab	8.40 abc
M2+14.4 mg kg ⁻¹	10.31 ab	12.80 a	139.96 a	36.82 ab	6.82 ab	4.26 ab	0.74 a	10.60 a	8.60 abc
M2+29.0 mg kg ⁻¹	8.72 b	11.20 a	90.38 abc	23.62 ab	5.65 ab	3.60 abcd	0.90 a	6.20 ab	5.00 c
M2+43.5 mg kg ⁻¹	11.56 a	13.40 a	158.57 a	41.492 a	8.89 ab	4.37 a	0.87 a	10.60 a	6.60 bc
DMS	2.72	3.45	70.79	20.95	6.13	1.08	0.82	6.74	3.91

SM = sin micorriza; DMS = diferencia mínima significativa; AP = altura de planta; NH = número de hojas; PFH = peso fresco de hoja; PFT = peso fresco de tallo; PFR = peso fresco de raíz; DT = diámetro de tallo; DR = densidad de raíces; VR = volumen radicular; SST = sólidos solubles totales en tallo. M1 = *Glomus cubense*; M2 = Glumix. Medias con letras iguales por columna no son estadísticamente diferentes (Tukey, $P < 0.05$).

SM = no micorrizae; DMS = least significant difference; AP = plant height; NH = number of leaves; PFH = fresh weight of leaf; PFT = fresh stem weight; PFR = fresh weight of root; DT = stem diameter; DR = root density; VR = root volume; SST = total soluble solids in stem. M1 = *Glomus cubense*; M2 = Glumix. Means with the same letters per column are not statistically different (Tukey, $P < 0.05$).

posiblemente se deba a la capacidad de los hongos micorrízicos para captar y movilizar P de las zonas de la rizosfera donde las raíces no son capaces de obtenerlo. La variabilidad en el crecimiento de las plantas de agave asociadas con hongos micorrízicos se puede deber a varios factores como la especie de hongo micorrízico, la especie de agave, la complementariedad funcional o sinergismo de los hongos micorrízicos y, a la respuesta de cada hospedero (alta o baja dependencia a los hongos micorrízicos) (Camprubi *et al.*, 2011). La capacidad y la eficiencia de los hongos micorrízicos para absorber P varía entre diferentes especies (variación interespecífica) y entre cepas de la misma especie (variación intraespecífica) aún con la misma especie vegetal hospedera (Abdel-Fattah y Asrar, 2012).

CONCLUSIONES

M2 y la aplicación de 43.5 mg kg⁻¹ y 29 mg kg⁻¹ de P promovieron el crecimiento en agave tobalá y agave coyote. M2 incrementó 18.2% el número de hojas (NH), 53.5% el peso fresco de hojas (PFH), 38.1% el peso fresco del tallo (PFT) y 36% el diámetro del tallo (DT) en agave tobalá. Mientras en agave coyote, la altura de planta (AP) aumentó 12% y el contenido de sólidos solubles totales en el tallo (SST) 21.3%. En agave tobalá con la dosis de 43.5 mg kg⁻¹ de P se obtuvieron incrementos de 13.2, 34.9, 36.1 y 21.5% para AP, PFH, PFT y DT, respectivamente. En agave coyote con la dosis de 29 mg kg⁻¹ de P se registró un aumento de 16.4% para AP, 44.4% para PFT y 18.6% para DT. Con 43.5 mg kg⁻¹ de P el aumento fue de 40%

Cuadro 5. Valor medio de variables de crecimiento y sólidos solubles totales en el tallo de *Agave* spp. (agave coyote) como respuesta a la interacción de dos productos micorrízicos comerciales y cuatro dosis de P.

Table 5. Average value of growth variables and total soluble solids in the stem of *Agave* spp. (coyote agave) in response to the interaction of two commercial mycorrhizal products and four doses of P.

Interacción Micorriza+P	AP	NH	PFH	PFT	PFR	DT	DR	VR	SST
	cm		g			cm	g cm ⁻³	cm ⁻³	°Brix
SM+0 mg kg ⁻¹	16.75 b	12.90 ab	160.68 abc	43.73 a	15.40 a	3.80 b	1.06 a	14.60 a	6.80 b
SM+14.4 mg kg ⁻¹	16.27 b	13.20 ab	148.18 abc	53.34 a	12.87 a	4.40 ab	1.00 a	13.60 a	7.80 b
SM+29.0 mg kg ⁻¹	19.50 ab	14.20 ab	190.76 abc	75.77 a	16.52 a	5.03 ab	0.86 ab	19.00 a	9.60 ab
SM+43.5 mg kg ⁻¹	16.51 b	12.80 ab	137.62 bc	57.77 a	14.02 a	4.45 ab	0.93 a	15.00 a	12.40 ab
M1+0 mg kg ⁻¹	18.35 ab	13.10 ab	99.25 c	46.86 a	10.32 a	3.99 ab	0.82 ab	12.60 a	9.60 ab
M1+14.4 mg kg ⁻¹	16.33 b	12.90 ab	183.88 abc	65.19 a	9.12 a	4.56 ab	0.64 a	14.60 a	8.20 b
M1+29.0 mg kg ⁻¹	18.83 ab	11.60 b	133.19 bc	54.83 a	10.44 a	4.13 ab	0.86 ab	12.40 a	7.40 b
M1+43.5 mg kg ⁻¹	17.10 b	13.90 ab	183.08 abc	69.01 a	14.79 a	4.85 ab	0.93 a	15.80 a	8.00 a
M2+0 mg kg ⁻¹	17.65 b	14.20 ab	135.98 bc	51.02 a	10.94 a	4.27 ab	1.03 a	11.00 a	9.60 ab
M2+14.4 mg kg ⁻¹	20.15 ab	14.30 ab	265.86 a	80.59 a	13.24 a	5.22 a	0.95 a	14.20 a	7.80 b
M2+29.0 mg kg ⁻¹	23.10 a	16.40 a	230.40 ab	70.45 a	17.208 a	5.20 a	0.83 ab	20.60 a	11.00 ab
M2+43.5 mg kg ⁻¹	16.43 b	12.40 ab	98.62 c	50.89 a	11.20 a	4.43 ab	0.80 ab	14.20 a	16.00 a
DMS	4.79	4.73	127.37	44.53	8.94	1.25	0.29	10.42	6.65

SM = sin micorriza; DMS = diferencia mínima significativa; AP = altura de planta; NH = número de hojas; PFH = peso fresco de hoja; PFT = peso fresco de tallo; PFR = peso fresco de raíz; DT = diámetro de tallo; DR = densidad de raíces; VR = volumen radicular; SST = sólidos solubles totales en tallo. M1 = *Glomus cubense*; M2 = Glumix. Medias con letras iguales por columna no son estadísticamente diferentes (Tukey, $P < 0.05$).

SM = no micorriza; DMS = least significant difference; AP = plant height; NH = number of leaves; PFH = fresh weight of leaf; PFT = fresh stem weight; PFR = fresh weight of root; DT = stem diameter; DR = root density; VR = root volume; SST = total soluble solids in stem. M1 = *Glomus cubense*; M2 = Glumix. Means with the same letters per column are not statistically different (Tukey, $P < 0.05$).

para SST, con 14.4 mg kg⁻¹ de P fue de 51% para PFH. El incremento en el crecimiento de ambos agaves se debió a la aplicación individual de productos a base de hongos micorrízicos y P más que a la interacción de ambos factores.

DECLARACIÓN DE ÉTICA

No aplicable.

CONSENTIMIENTO PARA PUBLICACIÓN

No aplicable.

DISPONIBILIDAD DE DATOS

Todos los datos generados o analizados durante este estudio se incluyen en este artículo publicado (y sus archivos de información complementaria).

CONFLICTO DE INTERESES

Los autores declaran que no tienen intereses en competencia.

FONDOS

A NovaUniversitas por el apoyo económico para la compra de materiales e insumos utilizados en el experimento.

CONTRIBUCIÓN DE LOS AUTORES

La contribución de cada uno de los autores se indica a continuación:

Ledia Itzel García Martínez, el trabajo forma parte de la tesis de licenciatura de Ledia Itzel, ella llevó a cabo la parte experimental de la investigación y participó en la escritura del manuscrito. Saúl Sánchez-Mendoza,

es director de tesis de Ledia Itzel García Martínez, contribuyó con ideas originales para el proyecto de investigación, participó en la parte experimental de la investigación, análisis estadístico e interpretación de los datos generados y escritura del manuscrito. Angélica Bautista-Cruz contribuyó con ideas originales para el proyecto de investigación, análisis estadístico e interpretación de los datos generados, estructura y escritura del manuscrito.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen los valiosos comentarios de dos revisores anónimos que contribuyeron a mejorar el trabajo. De igual manera nuestro agradecimiento al Dr. Alfredo Josué Gámez Vázquez por sus sugerencias en el análisis estadístico de los datos.

LITERATURA CITADA

- Abdel-Fattah, G. M. and A. A. Asrar. 2012. Arbuscular mycorrhizal fungal application to improve growth and tolerance of wheat (*Triticum aestivum* L.) plants grown in saline soil. *Acta Physiol. Plant.* 34: 267-277. doi: <http://dx.doi.org/10.1007/s11738-011-0825-6>.
- Arango, M. C., M. F. Ruscitti, M. G. Ronco, and J. Beltrano. 2012. Mycorrhizal fungi inoculation and phosphorus fertilizer on growth, essential oil production and nutrient uptake in peppermint (*Mentha piperita* L.). *Rev. Bras. Plantas Med.* 14: 692-699. doi: <http://dx.doi.org/10.1590/S1516-05722012000400018>.
- Armada, E., R. Azcón, O. M. López-Castillo, M. Calvo-Polanco, and J. M. Ruiz-Lozano. 2015. Autochthonous arbuscular mycorrhizal fungi and *Bacillus thuringiensis* from a degraded Mediterranean area can be used to improve physiological traits and performance of a plant of agronomic interest under drought conditions. *Plant Physiol. Biochem.* 90: 64-74. doi: <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2015.03.004>.
- Baum, C., W. El-Tohamy, and N. Gruda. 2015. Increasing the productivity and product quality of vegetable crops using arbuscular mycorrhizal fungi: A review. *Sci. Hortic.* 187: 131-141. doi: <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2015.03.002>.
- Bautista-Cruz, A., R. Carrillo-González, M. R. Arnaud-Viñas, C. Robles, and F. de León-González. 2007. Soil fertility properties on *Agave angustifolia* Haw. plantations. *Soil Tillage Res.* 96: 342-349. doi: <https://doi.org/10.1016/j.still.2007.08.001>.
- Camprubi, A., V. Estaun, and C. Calvet. 2011. Greenhouse inoculation of psammophilic plant species with arbuscular mycorrhizal fungi to improve survival and early growth. *Eur. J. Soil Biol.* 47: 194-197. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ejsobi.2011.02.001>.
- Chagoya-Mendez, V. 2004. Diagnóstico de la cadena productiva del sistema producto maguey-mezcal. SAGARPA, SEDAF y COMMAC. Oaxaca, México.
- Consejo Regulador del Mezcal. 2016. Informe de actividades. http://www.crm.org.mx/PDF/INF_ACTIVIDADES/INFORME2015.pdf (Consulta: octubre 3, 2016).
- Dias-Moreira, S., A. Cabral-Franca, P. Henrique-Grazziotti, F. D. Soares-Leal, and E. de Barrios-Silva. 2019. Arbuscular mycorrhizal fungi and phosphorus doses on coffee growth under a non-sterile soil. *Rev. Caatinga Mossoró* 32: 72-80. doi: <http://dx.doi.org/10.1590/1983-21252019v32n108rc>.
- Enríquez del Valle, J. R. 2007. La micropropagación de agaves y su fertilización en vivero. *Agroproduce* 16: 16-17.
- García-Mendoza, A. J. 2007. Los agaves de México. *Ciencias* 87: 14-23.
- Luna-Luna, S., J. R. Enríquez V., G. Rodríguez O., J. C. Carrillo R. y V. A. Velasco V. 2017. Anatomía y morfología de plantas micropropagadas-aclimatadas de *Agave potatorum* Zucc. fertilizadas en vivero. *Rev. Fitotec. Mex.* 40: 491-494.
- Lynch, J. P. and K. M. Brown. 2008. Root strategies for the acquisition of phosphorus. pp. 83-116. In: P. J. White and J. P. Hammond (eds.). *The ecophysiology of plant-phosphorus interactions*. Plant Ecophysiology, vol 7. Springer, Dordrecht, The Netherlands. Online ISBN: 978-1-4020-8435-5.
- Martínez-Ramírez, S., A. Trinidad-Santos, G. Bautista-Sánchez y E. C. Pedro-Santos. 2013. Crecimiento de plántulas de dos especies de mezcal en función del tipo de suelo y nivel de fertilización. *Rev. Fitotec. Mex.* 36: 387-393.
- Montero, L., C. Duarte, R. Cun, J. A. Cabrera y P. J. Gonzáles. 2010. Efectividad de biofertilizantes micorrízicos en el rendimiento del pimiento (*Capsicum annum* L. var. Verano 1) cultivado en diferentes condiciones de humedad del sustrato. *Cult. Trop.* 31: 11-14.
- Mota-Fernández, S., J. D. Álvarez-Solis, M. Abud-Archila, L. Dendooven, and A. F. Gutiérrez-Miceli. 2011. Effect of arbuscular mycorrhizal fungi and phosphorus concentration on plant growth and phenols in micropropagated *Aloe vera* L. plantlets. *J. Med. Plants Res.* 5: 6260-6266. doi: <https://doi.org/10.5897/JMPR11.271>.
- Olawuyi, O. J., A. C. Odebode, S. A. Olakojo, O. O. Popoola, A. O. Akanmu, and J. O. Izenegu. 2014. Host-pathogen interaction of maize (*Zea mays* L.) and *Aspergillus niger* influenced by arbuscular mycorrhizal fungi (*Glomus deserticola*). *Arch. Agron. Soil Sci.* 60: 1577-1591. doi: <https://doi.org/10.1080/03650340.2014.902533>.
- Pimienta-Barrios, E., J. Zañudo-Hernández y E. López Alcocer. 2009. Efecto de las micorrizas arbusculares en el crecimiento, fotosíntesis y anatomía foliar de plantas jóvenes de *Agave tequilana*. *Acta Bot. Mex.* 89: 63-78.
- Quiñones-Aguilar, E. E., A.C. Montoya-Martínez, G. Rincón-Enriquez, P. Lobit, and L. López-Pérez. 2016. Effectiveness of native arbuscular mycorrhizal consortia on the growth of *Agave inaequidens*. *J. Soil Sci. Plant Nutr.* 16: 1052-1064. doi: <http://dx.doi.org/10.4067/S0718-95162016005000077>.
- Quiñones-Aguilar, E. E., L. López-Pérez, and G. Rincón-Enriquez. 2014. Growth dynamics of papaya due to mycorrhizal inoculation and phosphorous fertilization. *Rev. Chapingo Ser. Hortic.* 20: 223-237. doi: <https://doi.org/10.5154/rchsh.2013.05.018>.
- Robles-Martínez, M. L., C. Robles, F. Rivera, M. P. Ortega y L. Pliego. 2013. Inoculación con consorcios nativos de hongos de micorriza arbuscular en *Agave angustifolia* Haw. *Rev. Mex. Cienc. Agríc.* 6: 1231-1240.

- SAS Institute. 2004. SAS 9.1 SQL Procedure User's Guide. Cary, NC, USA.
- Smith, A. F. and S. E. Smith. 2011. What is the significance of the arbuscular mycorrhizal colonization of many economically important crop plants? *Plant Soil* 348: 63-79. doi: <https://doi.org/10.1007/s11104-011-0865-0>.
- Trinidad-Cruz, J. R., E. E. Quiñones-Aguilar, G. Rincón-Enríquez, L. López-Pérez, and L.V. Hernández-Cuevas. 2017. Mycorrhization of *Agave cupreata*: Biocontrol of *Fusarium oxysporum* and plant growth promotion. *Rev. Mex. Fitopatol.* 35: 151-169. doi: <http://dx.doi.org/10.18781/r.mex.fit.1607-5>.
- Valenzuela Z., A. G. y D. R. González E. 1995. Fertilización de agave tequilero (*Agave tequilana* Weber) en la región de Tequila, Jalisco, México. Ensayo de una metodología para analizar crecimiento en cultivos multianuales mediante una técnica no destructiva. *Terra* 13: 81-95.
- Zacarias-Toledo, R., D. González-Mendoza, M. A. Rodríguez-Mendiola, J. J. Villalobos-Maldonado, V. F. Gutiérrez-Oliva, L. Dendooven, M. Abud-Archila, C. Arias-Castro, and F. A. Gutiérrez-Miceli. 2016. Plant growth and sugars content of *Agave americana* L. cultivated with vermicompost and rock phosphate and inoculated with *Penicillium* sp. and *Glomus fasciculatum*. *Comp. Sci. Utilizat.* 24: 259-265. doi: <https://doi.org/10.1080/1065657X.2016.1155512>.