

Comparación de dos suelos para la producción de inoculantes micorrízicos en San Luis Potosí, México

Comparison of two soils for the production of mycorrhizal inoculants in San Luis Potosí, México

Aracely Mena Echevarría, Heriberto Méndez Cortes, Hugo M. Ramírez Tobías, Ángel Natanael Rojas Velázquez

Facultad de Agronomía y Veterinaria, Universidad Autónoma de San Luis Potosí. Km. 14.5 Carretera San Luis Potosí, Matehuala, Ejido Palma de la Cruz, Soledad de Graciano Sánchez, C.P. 78321. San Luis Potosí, México.

RESUMEN

Antecedentes: En la actualidad la tecnología de producción de biofertilizantes micorrízicos ha experimentado un impulso notable. Sin embargo, es necesario mejorar la calidad de biofertilizantes con especies micorrízicas eficientes que beneficien a los cultivos.

Objetivo: Identificar la diversidad de hongos micorrízicos arbusculares (HMA) de dos suelos de San Luis Potosí y su respuesta en el crecimiento de *Sorghum vulgare* y *Zea mays*.

Métodos: Se utilizaron dos tipos de suelo (húmedo y semiárido) y plantas trampa de *Sorghum vulgare* y *Zea mays*. Se evaluó el crecimiento, comportamiento micorrízico y el flujo de CO₂ del sustrato.

Resultados y conclusiones: Se identificaron 11 especies de hongos micorrízicos pertenecientes a tres familias del Phylum Glomeromycota. La familia Glomeraceae fue más abundante seguida de Acaulosporaceae y Claroideo-glomeraceae. Los cultivos aumentaron su biomasa aérea en el sustrato semiárido y la biomasa radicular en el sustrato húmedo. La mayor tasa de flujo de CO₂ se encontró en el sustrato semiárido. El número de esporas fue superior en el sustrato semiárido y el porcentaje y eficiencia de colonización fue mayor en el *Zea mays* del sustrato semiárido. La mayor diversidad de HMA se replicó en el cultivo trampa de *Sorghum vulgare*.

Palabras clave: ambientes, micorrizas arbusculares, cultivo trampa

ABSTRACT

Background: Currently, the technology for the production of mycorrhizal biofertilizers has experienced a notable boost. However, it is necessary to improve the quality of the biofertilizers by selecting efficient mycorrhizal species that benefit the crops.

Objective: Identify the diversity of arbuscular mycorrhizal fungi (AMF) of two soils of San Luis Potosí and its response in the growth of *Sorghum vulgare* y *Zea mays*.

Methods: Two types of soils (wet and semi-arid), and *Sorghum vulgare* y *Zea mays* trap plants were used. Growth, mycorrhizal behavior and the CO₂ flux of the substrate were evaluated.

Results and conclusions: Eleven mycorrhizal fungal species belonging to three families of the Phylum Glomeromycota were identified. The Glomeraceae family was the most abundant followed by the Acaulosporaceae and the Claroideo-glomeraceae. The crops increased their aerial biomass in the semi-arid substrate and the root biomass in the wet substrate. The highest CO₂ flow rate was found in the semi-arid substrate. The number of spores was greatest in the semi-arid substrate and the percentage and efficiency of colonization was greatest in the *Zea mays* of the semi-arid substrate. The greatest diversity of AMF was replicated in the *Sorghum vulgare* trap culture.

Keywords: environments, arbuscular mycorrhizae, trap culture

ARTICLE HISTORY

Received 15 July 2020 / Accepted 20 November 2020

Published on line: 26 February 2021

CORRESPONDING AUTHOR

✉ Heriberto Méndez Cortes, heriberto.mendez@uaslp.mx

ORCID: 0000-0001-9537-9794

INTRODUCCIÓN

México se caracteriza por presentar una amplia variedad de ambientes terrestres, dentro de los cuales se destacan los húmedos, áridos y semiáridos (Martínez *et al.*, 2014). Gran diversidad de microorganismos habitan tales ambientes e interactúan con las comunidades de plantas presentes en ellos (Olalde y Aguilera, 1998). Entre los más estudiados se encuentran los hongos micorrízicos arbusculares (HMA), que desempeñan un papel clave al regular los ciclos de nutrientes y del carbono, además de que establecen asociaciones simbióticas mutualistas con la mayoría de las plantas.

En el estado de San Luis Potosí, predominan el bosque mesófilo de montaña, selvas altas y medianas, selvas bajas, zonas semiáridas, y zonas áridas (CONAFOR, 2014). Los ambientes húmedos se caracterizan por presentar suelos profundos o someros con altos niveles de precipitación, baja evapotranspiración, abundante materia orgánica y pH ácido (González *et al.*, 2012). Por otra parte, los ambientes semiáridos presentan baja disponibilidad de agua, suelos variables en profundidad, textura, pH, conductividad eléctrica y fertilidad, siendo frecuentes los suelos con perfil incipiente o poco desarrollados (Mazuela, 2013). Los HMA influyen en la estructura de los ambientes y en su multifuncionalidad (Van der Heijden *et al.*, 2015). La asociación se basa en un intercambio mutuo entre la planta y el hongo, favoreciendo este último una mayor absorción de nutrientes hacia la planta y ésta a su vez obtiene productos derivados de la fotosíntesis para su mantenimiento (Bonfante y Genre, 2010).

Las asociaciones simbióticas pueden ser aprovechadas para favorecer el crecimiento y desarrollo de los cultivos (Smith y Smith, 2015), mejorar las propiedades físicas y nutricionales de los suelos (Smith y Smith 2012), y contrarrestar los efectos negativos de los estreses biótico y abiótico (Díaz *et al.*, 2013; Chen *et al.*, 2018). Ello permite la incorporación de prácticas agroecológicas en el manejo de los cultivos para mejorar la sostenibilidad de estos sistemas de producción (Benami *et al.*, 2020). Algunos trabajos correlacionan el desarrollo de las plantas con los niveles de colonización, número de esporas y riqueza de especies en ambientes áridos y húmedos, donde se encuentran respuestas asociadas a las poblaciones de HMA presentes (Montaño *et al.*, 2007; Méndez, 2013; Furrázola *et al.*, 2017). Al respecto Berruti *et al.* (2016) plantean

que el 75 % de la propagación de especies micorrízicas arbusculares, se ha realizado mediante el método de plantas trampa que permiten seleccionar especies micorrízicas eficientes para ser utilizadas como inoculantes micorrízicos. Entre los cultivos más comunes se encuentran el sorgo (*Sorghum vulgare* Pers.) y el maíz (*Zea mays* L.) cultivos con alta dependencia micorrízica y que cuentan con ciclos fenológicos cortos y un amplio sistema radicular (Fernandez, 2003).

Benami *et al.* (2020) manifiestan la necesidad de realizar investigaciones que permitan lograr un mayor desarrollo en la tecnología de producción de inoculantes micorrízicos. Ellos hacen referencia a retos por solucionar en la producción de inóculos comerciales de HMA, lo que permite identificar especies con alta eficiencia micorrízica. Rillig *et al.* (2016) plantean la necesidad de investigar con profundidad la tecnología micorrízica y proponen incluir en este estudio un monitoreo del manejo agrícola, aspectos de fitomejoramiento, ingeniería agroecológica y la microbiota asociada. Teniendo en cuenta estas consideraciones, el presente trabajo tuvo como objetivo identificar la diversidad de HMA de dos suelos de San Luis Potosí y su respuesta en el crecimiento de plantas de *Sorghum vulgare* y *Zea mays*.

MATERIALES Y MÉTODOS

El experimento se desarrolló en la Facultad de Agronomía y Veterinaria de la Universidad Autónoma de San Luis Potosí. Se utilizó suelo franco arenoso arcilloso de dos ambientes (húmedo y semiárido) y las especies empleadas como cultivos trampa fueron *Sorghum vulgare* y *Zea mays*. El suelo del ambiente húmedo es de tipo luvisol (WRB, 2015), con un clima del tipo semicálido húmedo con lluvia todo el año (García, 2004), un bioma denominado bosque mesófilo de montaña (Rzedowski, 2006). El sitio se encuentra en el municipio de Xilitla, San Luis Potosí, México, en las siguientes coordenadas geográficas: 21° 23' N y 98° 59' O y a una altitud de 600 a 900 m. El suelo del ambiente semiárido es de tipo leptosol (WRB, 2015) con un clima del tipo seco o árido con regímenes de lluvias en verano (García, 2004), un bioma denominado de matorral xerófilo (Rzedowski, 2006) proveniente del municipio de Villa Hidalgo, S.L.P. México, en las siguientes coordenadas geográficas: 22° 27' N y 100° 42' O; con altitud de 1700 msnm. En cada sitio se

obtuvieron tres submuestras aleatorias a una profundidad de 0-20 cm, las cuales se homogenizaron para formar dos muestras compuestas. Las características físico-químicas de las muestras de los suelos se muestran en la Tabla 1.

Reproducción de especies de HMA

La reproducción de los HMA se realizó en un invernadero en condiciones semicontroladas durante los meses de abril a junio de 2017. El sustrato estuvo conformado por una mezcla del suelo proveniente de los ambientes antes mencionados y arena esterilizada (proporción 1:1). Se empleó la metodología del cultivo trampa descrita por Brundrett *et al.* (1996). Se sembraron cinco semillas por maceta de cada una de las especies de las plantas hospederas elegidas y se establecieron cinco macetas al azar por tratamiento. Previo a la siembra se realizó un conteo inicial de la cantidad de esporas presente en cada suelo: el proveniente del ambiente húmedo (H) contenía 124 esporas (100 g de suelo) y el que provenía del ambiente semiárido (SA) contenía 53 esporas (100 g de suelo). La fertilización se realizó con solución nutritiva Long Ashton (LANS) baja en fósforo (22 mg L⁻¹) (Hewitt, 1966).

Identificación de las características morfológicas de las especies micorrízicas

Para la identificación de los HMA, se montaron las esporas en láminas semipermanentes con alcohol polivinílico-lacto-glicerol "PVLG" (Morton *et al.*, 1993) y reactivo de Melzer (Koske y Tessier, 1983). Las observaciones de las estructuras microscópicas de estas esporas se realizaron en el microscopio compuesto (Nikon Model Eclipse. Japón); en estas observaciones se tomaron en cuenta las características morfológicas básicas propuestas por Walker (1983) y Morton (1988). Con lo anterior se determinó: la forma, tamaño, características de la pared externa, estructuras de germinación, hifa de sostén y reacción al reactivo de Melzer

de las esporas extraídas. Posterior a ello, se identificaron las especies con base en la colección internacional de cultivos de hongos micorrizógenos arbusculares y vesiculares (<http://invam.caf.wvu.edu>), el manual para la identificación de hongos micorrízicos vesículo-arbusculares (Schenck y Perez, 1990), las descripciones de especies depositadas en el Departamento de Patología de Plantas de la Universidad de Agricultura en Szczecin, Polonia (<http://www.agro.ar.szczecin.pl/~jblaszkowski/>), así como las publicaciones originales de las especies. Se empleó como referencia la clasificación del *Phyllum Glomeromycota* propuesto por Redecker *et al.* (2013) y Wijayawardene *et al.* (2018). Los especímenes identificados fueron depositados en el Laboratorio de Fitopatología de Facultad de Agronomía y Veterinaria de la UASLP.

Variables estudiadas

Las evaluaciones se realizaron a los 107 días después de la siembra. Se evaluó la biomasa seca total de la parte aérea y la biomasa seca total de raíz, las cuales fueron secadas en una estufa Riossa Nom a 70 °C hasta alcanzar peso constante. El peso se registró en una balanza analítica digital Ohaus®.

El flujo de CO₂ del sustrato se midió con un sistema portátil de medición de intercambio de gases (LI-6400 Li-Cor) acoplado a la cámara de flujo de CO₂ (6400-09). En cada maceta se eliminó el material vegetal y se insertó un anillo de 10.5 cm de diámetro. Se realizaron tres ciclos de lectura de los niveles de CO₂ en cada maceta.

Para el número de esporas se siguió el procedimiento de Gerdemann y Nicholson (1963), las esporas extraídas se contabilizaron en una placa de conteo con círculos concéntricos donde se depositaban las esporas, lo que facilitaba su conteo; mientras para el porcentaje y eficiencia de colonización se utilizó el método de Phillips y Hayman (1970), Giovanetti y Mosseae (1980) y Trouvelot *et al.* (1986).

Tabla 1. Análisis físico y químico de suelos de dos ambientes del estado de San Luis Potosí

Ambientes	pH (1:2)	MO (%)	CaCO ₃ (%)	N (kg ha ⁻¹)	P ₂ O ₅ (kg ha ⁻¹)	K (kg ha ⁻¹)	Densidad aparente (kg m ⁻³)	Arena (%)	Limo (%)	Arcilla (%)
Tropical húmedo	5.9	3.8	28.5	4.9	13	1.35	1.47	46	22	32
Semiárido	7.6	3.2	1.6	3.48	29	2.78	1.45	44	30	26

Análisis estadístico

Se realizó una prueba de *t* de student para dos muestras independientes ($p \leq 0.05$). El número de esporas g^{-1} se transformó mediante la raíz cuadrada, mientras que el porcentaje de colonización micorrízica por la función $\arcsen\sqrt{x}$, por no presentar una distribución normal. Los análisis estadísticos se ejecutaron con el software SAS para Windows 9.0.

RESULTADOS

Identificación de las especies micorrízicas

Se identificaron 11 especies de hongos micorrízicos que pertenecen a tres familias del Phylum Glomeromycota. La familia Glomeraceae fue la más abundante con un 63 % del total, mientras que la familia Acaulosporaceae tuvo el 27 % y la familia Claroideo-glomeraceae un 9 %. En el sustrato del ambiente húmedo con el cultivo trampa de *Sorghum vulgare* se identificó a *Claroideoglomus etunicatum* (W.N. Becker & Gerd.) C. Walker & A. Schüßler, *Acaulospora morrowiae* Spain & N.C. Schenck, *Sclerocystis rubiformis* Gerd. & Trappe, *Glomus macrocarpum* Tul. & C. Tul., *Acaulospora denticulata* Sieverd. & S. Toro, *Acaulospora scrobiculata* Trappe, *Glomus* sp.1 y *Glomus* sp.2. Con este mismo sustrato y el cultivo trampa de *Zea mays* se identificó a *C. etunicatum*, *A. morrowiae*, *S. rubiformis*, *G. macrocarpum* y *Glomus* sp.2. Por otro lado, el sustrato del ambiente semiárido con el cultivo trampa de *Sorghum vulgare*, se identificó a *C. etunicatum*, *A. morrowiae*, *Rhizophagus intraradices* (N.C. Schenck &

G.S. Sm.) C. Walker & A. Schüßler, *Funneliformis mosseae* (T.H. Nicolson & Gerd.) C. Walker & A. Schüßler y *Glomus* sp.3. Mientras que en el sustrato del ambiente semiárido con el cultivo trampa de *Zea mays* se identificó a *C. etunicatum* y *A. morrowiae* (Figura 1). Por otra parte, en el sustrato del ambiente húmedo se encontró el 73 % del total de las especies micorrízicas identificadas en *Sorghum vulgare* y el 45 % en *Zea mays*; mientras que en el sustrato del ambiente semiárido se encontró el 45 % en *Sorghum vulgare* y el 18 % en *Zea mays*.

Biomasa seca total de parte aérea y de raíz

La prueba *t* de student para la biomasa seca total (Tabla 2), indica que la biomasa seca aérea de los cultivos trampa de *Sorghum vulgare* y *Zea mays* fue mayor en el sustrato semiárido, superando en un 17 y 28 % respectivamente a los cultivos trampa establecidos en el sustrato del ambiente húmedo (Figura 2 A). Por otra parte, la biomasa seca de raíz no mostró diferencias en el cultivo trampa a base de *Sorghum vulgare*, mientras que los de *Zea mays* establecidos en sustrato de ambiente húmedo superaron en un 13 % a los establecidos en sustrato semiárido (Figura 2 B).

Flujo de CO₂ del sustrato de crecimiento

La prueba de *t* de student para el flujo de CO₂ (Tabla 2), muestra que las plantas trampa de *Sorghum vulgare* y *Zea mays* en el sustrato semiárido superaron en un 50 y 22 % respectivamente a las del sustrato del ambiente húmedo (Figura 3).

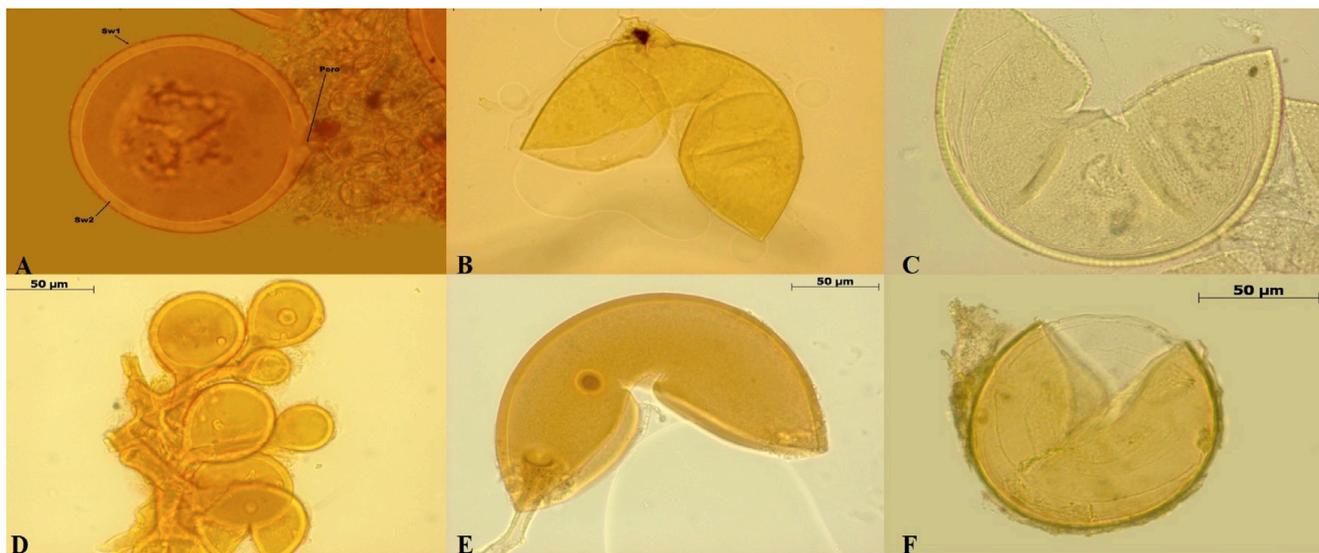


Figura 1. Esporas de algunas especies de HMA propagadas en cultivos trampa de *Sorghum vulgare* y *Zea mays*. A: *Glomus macrocarpum*. B: *Funneliformis mosseae*. C: *Acaulospora scrobiculata*. D: *Sclerocystis rubiformis*. E: *Claroideoglomus etunicatum*. F: *Acaulospora morrowiae*.

Tabla 2. Resultados de la prueba de t de student para los cultivos de *Sorghum vulgare* y *Zea mays*

Variables	Cultivos trampa			
	Sorgo		Maíz	
	t	P value	t	P value
Biomasa seca parte aérea total	3.47	0.009**	5.04	0.001**
Biomasa seca raíz total	-1.26	0.245 n.s.	-3.46	0.009**
Flujo de CO ₂ del sustrato	9.91	0.000***	2.51	0.018*
No de esporas	2.36	0.025*	3.19	0.004**
Porcentaje de colonización	1.08	0.294 n.s.	4.62	0.000***
Eficiencia de colonización	2.07	0.053 n.s.	4.14	0.001**

Prueba t de student ($P \leq 0.05$). *significativo, ** muy significativo, ***altamente significativo, n.s. no significativo.

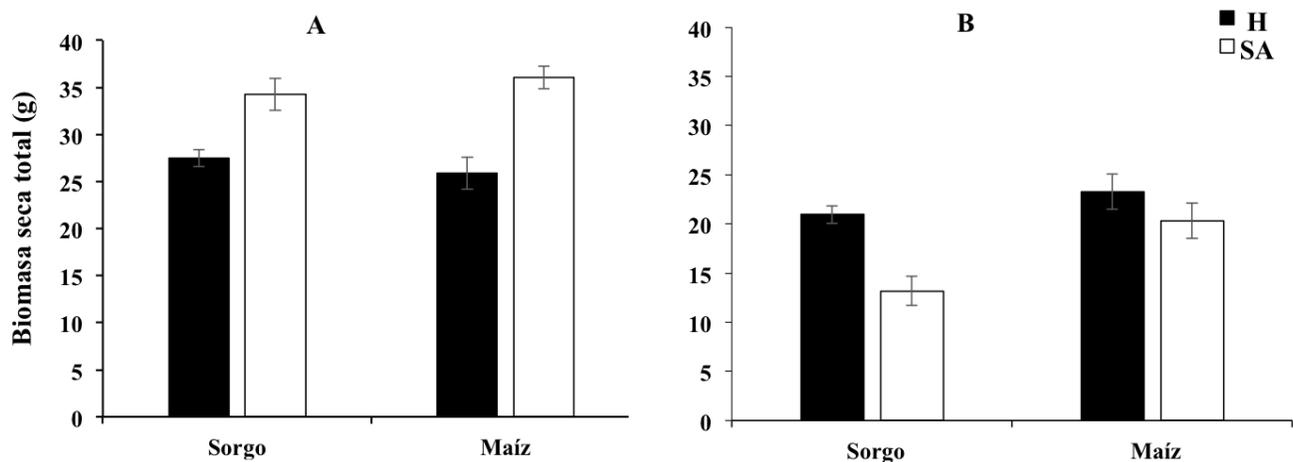


Figura 2. Biomasa seca de los cultivos trampa en *Sorghum vulgare* y *Zea mays*. A: parte aérea. B: raíz. H: sustrato de ambiente húmedo. SA: sustrato de ambiente semiárido.

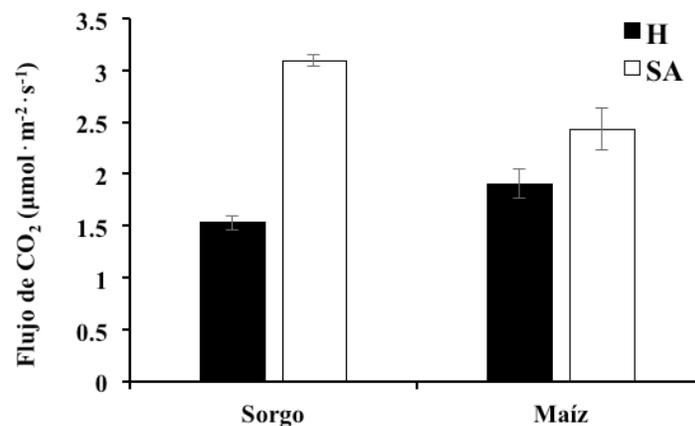


Figura 3. Flujo de CO₂ del sustrato medido al finalizar el experimento. H: Sustrato de ambiente húmedo, SA: Sustrato de ambiente semiárido.

Variables micorrízicas

La prueba de *t* de student para el número de esporas, porcentaje y eficiencia de colonización indica diferencia estadística entre los suelos. El número de esporas fue superior en las plantas trampa del ambiente semiárido. Las plantas de *Sorghum vulgare* y *Zea mays* superaron en un 18 y 28 % respectivamente a las establecidas en el sustrato del ambiente húmedo (Figura 4 A). Por otra parte, el porcentaje de colonización refleja la presencia de estructuras de HMA en la raíz y mostró diferencias significativas en *Zea mays*, donde los mejores resultados correspondieron al sustrato del ambiente semiárido. El cultivo trampa *Zea mays* superó en un 27 % a los que crecieron en el sustrato del ambiente húmedo (Figura 4 B). La eficiencia de colonización, cantidad de hifas, arbuscúlos y vesículas de HMA que se forman dentro de la raíz colonizada mostró diferencias significativas en las plantas de *Zea mays*. De igual modo, las raíces del sustrato semiárido superaron en un 52 % con respecto al sustrato húmedo (Figura 4C).

DISCUSIÓN

Identificación de las especies micorrízicas

El sustrato del ambiente húmedo tuvo mayor riqueza de HMA con respecto al sustrato del ambiente semiárido, lo cual puede estar asociado a la diversidad de plantas de estos ambientes y las características del suelo. Álvarez *et al.* (2017), han reportado hasta 49 morfo-especies de HMA en selvas tropicales, en comparación a las 19 morfo-especies de estos hongos en

matorrales xerófilos del centro de México reportadas por Monroy y Ramírez (2018). Por otra parte, *Sorghum vulgare* fue el cultivo trampa que propagó una mayor diversidad de especies de HMA, lo que puede estar asociado a un mayor producción de biomasa radical en este cultivo.

Biomasa seca total parte aérea y de raíz

Las especies de HMA de ambiente semiárido promovieron una mayor biomasa en la parte aérea, lo que indica que estos hongos pueden desarrollar mecanismos de adaptación en este tipo de ambiente. Se ha documentado que el pH es un factor que influye en la absorción de nutrientes por la planta, tal y como lo refieren Andrade y Martínez (2014). En suelos con pH alcalino, la planta disminuye la capacidad de absorción de los nutrientes; en este sentido, los HMA juegan un papel importante en la eficiencia micorrízica, tal y como sucede en los ambientes semiáridos. Aunque la biomasa seca de la raíz fue superior en el sustrato húmedo (Figura 2 B), esta variable no está relacionada a la biomasa seca aérea, lo cual sugiere que la respuesta de la biomasa aérea puede estar asociada al nivel de colonización intraradical más que al desarrollo radical.

Flujo de CO₂ del sustrato de crecimiento

El sustrato semiárido promovió la mayor tasa de flujo de CO₂. Este sustrato presentaba un 12.5 % menos de carbonatos totales que el sustrato húmedo (Tabla 1), esto indica que las especies micorrízicas del ambiente semiárido pueden aportar una mayor cantidad de CO₂ al sustrato. Smith y Smith (2015) plantean que las hifas

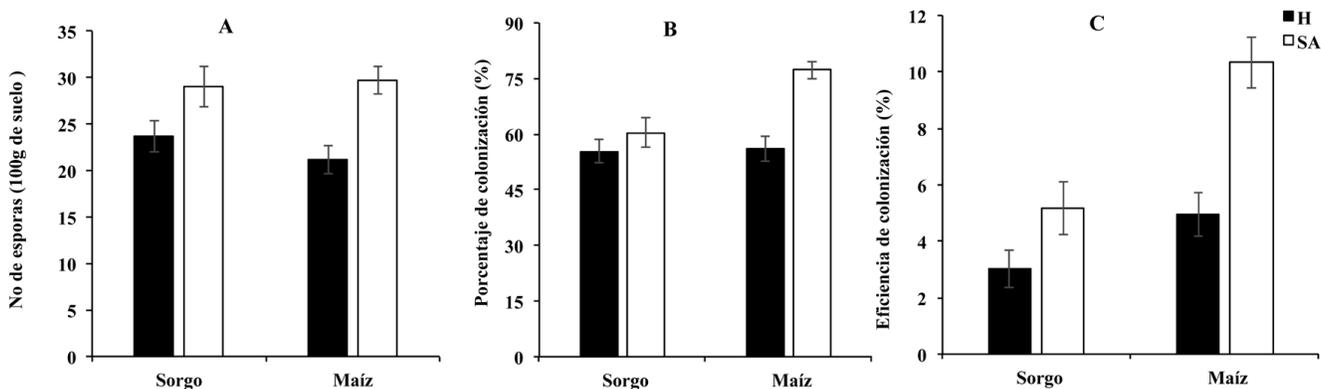


Figura 4. Variables micorrízicas. A: No. de esporas. B: Porcentaje de colonización micorrízica. C: Eficiencia de colonización micorrízica. H: Sustrato de ambiente húmedo. SA: Sustrato de ambiente semiárido.

son las encargadas del transporte del carbono producido de la fotosíntesis hasta el hongo y a su vez de los nutrientes del suelo hacia la planta. Por otro lado, Herman *et al.* (2012) y Nottingham *et al.* (2013) plantean que la transferencia del carbono al suelo en zonas que son inaccesibles para las raíces puede realizarse a través de las hifas micorrízicas. Solaiman (2014) sugieren que las hifas extraradicales y la acción de glomalina en la formación de agregados del suelo pueden contribuir al secuestro del carbono en el suelo.

Comportamiento micorrízico

Las especies del ambiente semiárido replicaron el mayor número de esporas, lo que sugiere que la diversidad de especies de HMA no incrementó el número de esporas en el cultivo trampa, sino la capacidad que tienen las especies de replicarse. El porcentaje y eficiencia de la colonización fue mayor en *Zea mays* en el sustrato del ambiente semiárido; sin embargo, el *Sorghum vulgare* mostró un comportamiento similar en ambos sustratos. Esto puede sugerir que existe selectividad entre las especies de HMA hacia el hospedero y ésta puede estar dada por la dependencia micorrízica del cultivo, las especies de HMA involucradas y las características del sustrato. Helgason *et al.* (2002) sugieren que existe selectividad entre los HMA y plantas que colonizan, lo que favorece el crecimiento y desarrollo. Bainard *et al.* (2014) demostraron que existen factores que influyen en la abundancia y diversidad de especies de HMA, siendo el pH y las propiedades químicas del suelo los que impulsan variaciones de las comunidades de HMA en el suelo.

CONCLUSIONES

Se identificaron 11 especies de HMA, siendo la familia Glomeraceae la más abundante. La mayor diversidad se replicó en el cultivo trampa de *Sorghum vulgare*. El sustrato del ambiente semiárido es más eficiente en la promoción del crecimiento aéreo, el flujo de CO₂ del suelo y la producción de esporas (número de esporas), en cultivos trampa de *Sorghum vulgare* y *Zea mays*. El sustrato del ambiente húmedo favoreció el crecimiento radicular de *Sorghum vulgare* y *Zea mays*. La eficiencia en la simbiosis micorrízica se vió reflejada por un incremento en las estructuras fúngicas de los HMA dentro de la raíz y en el crecimiento de los cultivos

trampa. La simbiosis micorrízica dependió del cultivo y las especies de HMA involucradas.

AGRADECIMIENTOS

A la Facultad de Agronomía y Veterinaria de la UASLP y al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología por la beca otorgada con el número 785163, la que ha permitido realizar los estudios de posgrado.

LITERATURA CITADA

- Álvarez Sánchez, J., I. Sánchez-Gallen, L. Hernández-Cuevas, L. Hernández-Oro, P. Meli, 2017. Diversidad, abundancia y variación estacional en la comunidad de hongos micorrizógenos arbusculares en la selva Lacandona, Chiapas, México. *Revista Mexicana de Micología* 45: 37-51.
- Andrade, M., M.E. Martínez, 2014. Fertilidad del suelo y parámetros que la definen. Universidad de la Rioja, Logroño.
- Bainard, L.D., J.D. Bainard, Ch. Hamel, Y. Yantai Gan, 2014. Spatial and temporal structuring of arbuscular mycorrhizal communities is differentially influenced by abiotic factors and host crop in a semi-arid prairie agroecosystem. *FEMS Microbiology Ecology* 88: 333-344. Doi: 10.1111/1574-6941.12300
- Benami, M.Y., Isack, D. Grotsky, D. Levy, Y. Kofman, 2020. The economic potential of arbuscular mycorrhizal fungi in agriculture. In: Nevalainen, H. (ed.), *Grand challenges in fungal biotechnology*. Springer Link, Cham. Pp. 239-280. Doi: 10.1007/978-3-030-29541-7
- Berruti, A., E. Lumini, R. Balestrini, V. Bianciotto, 2016. Arbuscular mycorrhizal fungi as natural biofertilizers: let's benefit from past successes. *Frontiers in Microbiology* 6: 1-13. Doi: 10.3389/fmicb.2015.01559
- Bonfante, P., A. Genre, 2010. Mechanisms underlying beneficial plant-fungus interactions in mycorrhizal symbiosis. *Nature Communications* 1: 1-11. Doi: 10.1038/ncomms1046
- Brundrett, M., N. Bougher, B. Dell, N. Grove, N. Malajczuk, 1996. Working with glomalean fungi. In: Lynch, P. (ed.), *Working with mycorrhizas in forestry and agriculture*. Australian Centre for International Agricultural Research, Bruce. Pp. 151-181.
- Chen, M., M. Arato, L. Borghi, E. Nouri, D. Reinhardt, 2018. Beneficial services of arbuscular mycorrhizal fungi-from ecology to application. *Frontiers in Microbiology* 9: 1-14. Doi: 10.3389/fpls.2018.01270
- CONAFOR, 2014. Inventario estatal forestal y de suelos - San Luis Potosí 2014. SEMARNAT-CONAFOR, México, Distrito Federal.
- Díaz, F.A., C.M. Alvarado, C.F. Ortiz, C.O. Grageda, 2013. Nutrición de la planta y calidad de fruto de pimiento asociado con micorriza arbuscular en invernadero. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas* 4: 315-321.
- Fernandez, F., 2003. Avances en la producción de inoculantes micorrízicos arbusculares. In: Rivera, R., Fernández, K. (eds.), *Manejo efectivo de la simbiosis micorrízica, una vía hacia la agricultura sostenible. Estudio de caso: el Caribe*. INCA, La Habana. Pp. 99-114.

- Furrazola, E., G. Heredia, G. Olvera, V. Sosa, 2017. Efecto de comunidades nativas de hongos micorrizógenos arbusculares sobre el crecimiento de plántulas de maíz y sorgo. *Acta Botánica Cubana* 216: 127-136.
- García, E., 2004. Modificaciones al sistema de clasificación climática de Köppen. Offset Larios, México, Distrito Federal.
- Gerdemann, J.W., T.H. Nicholson, 1963. Spore of mycorrhizae endogone species extracted from soil by wet sieving and decanting. *Transactions of the British Mycological Society* 46: 235-244. Doi: 10.1016/S0007-1536(63)80079-0
- Giovanetti, M., B. Mosse, 1980. An evaluation of techniques to measure vesicular-arbuscular infection in roots. *New Phytologist* 84: 489-500. Doi: 10.1111/j.1469-8137.1980.tb04556.x
- González, E.M., J.A. Meave, M.N. Ramírez, A.T. Toledo, H.F.G. Lorea, M.G. Ibarra, 2012. Los bosques de niebla de México: conservación y restauración de su componente arbóreo. *Ecosistemas* 21: 36-52.
- Helgason, T., J.W. Merryweather, J. Denison, P. Wilson, J.P.W. Young, A.H. Fitter, 2002. Selectivity and functional diversity in arbuscular mycorrhizas of co-occurring fungi and plants from a temperate deciduous woodland. *Journal of Ecology* 90: 371-384. Doi: 10.1046/j.1365-2745.2001.00674.x
- Herman, D.J., M.K., Firestone, E. Nuccio, A. Hodge, 2012. Interactions between an arbuscular mycorrhizal fungus and a soil microbial community mediating litter decomposition. *FEMS Microbiology Ecology* 80: 236-247. Doi: 10.1111/j.1574-6941.2011.01292.x
- Hewitt, E.J., 1966. Sand and water culture methods in the study of plant nutrition. Commonwealth Agricultural Bureaux, London.
- Koske, R.E., B. Tessier, 1983. A convenient, permanent slide mounting medium. *Mycological Society of America Newsletter* 34: 59.
- Martínez, M.E., E.J.E. Sosa, F. Álvarez, 2014. El estudio de la biodiversidad en México: ¿una ruta con dirección? *Revista Mexicana de Biodiversidad* 85: 1-9. Doi: 10.7550/rmb.43248.
- Mazuela, A.P.C., 2013. Agricultura en zonas áridas y semiáridas. *Ideasia* 31: 3-4. Doi: 10.4067/S0718-34292013000200001
- Méndez, C.H., M.J.G. Marmolejo, A.C. Cantú, P.V. Olalde, C.E. Estrada, L.C. Posadas, 2013. Respuesta de *Cedrela odorata* L. a diversos inoculantes micorrizos procedentes de dos ambientes tropicales. *Madera y Bosques* 19: 23-34.
- Monroy, A.A., S.K.Y. Ramírez, 2019. Relation between plant ecological succession and arbuscular mycorrhizal fungi in a xeric shrub of central Mexico. *TIP Revista Especializada en Ciencias Químico-Biológicas* 21: 13-29. Doi: 10.22201/fesz.23958723e.2018.0.157
- Montaño, N.M., R. García, F. Morales-Gómez, G. Ochoa, 2007. Las micorrizas arbusculares de islas de fertilidad de mezquite de dos matorrales semiáridos: su efecto en la morfología de *Bouteloua curtipendula*. In: Montaño, N.M., Camargo-Ricalde, S.L., García-Sánchez, R., Monroy, A. (eds.), *Micorrizas arbusculares en ecosistemas áridos y semiáridos*. Instituto Nacional de Ecología-SEMARNAT, Mundi-Prensa SA de CV, UAM-Iztapalapa, FES Zaragoza, UNAM, México, Distrito Federal. Pp. 305-334.
- Morton, J.B., 1988. Taxonomy of vesicular-arbuscular mycorrhizal fungi: classification, nomenclature, and identification. *Mycotaxon* 32: 267-324.
- Morton, J.B., S.P. Bentivenga, W.W. Wheeler, 1993. Germplasm in the international collection of arbuscular and vesicular-arbuscular mycorrhizal fungi (INVAM) and procedures for culture development, documentation and storage. *Mycotaxon* 48: 491-528.
- Nottingham, A.T., B.L. Turner, K. Winter, P.M. Chamberlain, A. Stott, E.V.J. Tanner, 2013. Root and arbuscular mycorrhizal mycelial interactions with soil microorganisms in lowland tropical forest. *FEMS Microbiology Ecology* 85: 37-50. Doi: 10.1111/1574-6941.12096
- Olalde, P.V., G.L.I. Aguilera, 1998. Microorganismos y biodiversidad. *Terra Latinoamericana* 3: 289-292.
- Phillips, J.M., D.S. Hayman, 1970. Improved procedure for clearing roots and staining parasitic and vesicular-arbuscular mycorrhizal fungi for rapid assessment of infection. *Transactions of the British Mycological Society* 55: 158-161. Doi: 10.1016/S0007-1536(70)80110-3
- Redecker, D., A.H. Schüßler, S. Stockinger, J.M. Stürmer, C. Walker, 2013. An evidence-based consensus for the classification of arbuscular mycorrhizal fungi (*Glomeromycota*). *Mycorrhiza* 23: 515-531. Doi: 10.1007/s00572-013-0486-y
- Rillig, M.C., M.A. Sosa-Hernández, J. Roy, C.A. Aguilar-Trigueros, K. Vályi, A. Lehmann, 2016. Towards an integrated mycorrhizal technology: harnessing mycorrhiza for sustainable intensification in agriculture. *Frontiers in Plant Science*. 7:1625. Doi: 10.3389/fpls.2016.01625
- Rzedowski, J., 2006. Vegetación de México. 1ra. edición digital. Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad, Pátzcuaro.
- Schenck, N.C., Y. Pérez, 1990. Manual for the identification of vesicular-arbuscular mycorrhizal fungi. 3th Edition. Synergistic Publications, Gainesville.
- Smith, F.A., S.E. Smith, 2015. How harmonious are arbuscular mycorrhizal symbioses? Inconsistent concepts reflect different mindsets as well as results. *New Phytologist* 205: 1381-1384. Doi: 10.1111/nph.13202
- Smith, S.E., F.A. Smith, 2012. Fresh perspectives on the roles of arbuscular mycorrhizal fungi in plant nutrition and growth. *Mycologia* 104: 1-13. Doi: 10.3852/11-229
- Solaiman, Z.M., 2014. Contribution of arbuscular mycorrhizal fungi to soil carbon sequestration. In: Solaiman, Z.M., Abbott, L.K., Varma, A. (eds.), *Mycorrhizal fungi. Use in sustainable agriculture and land restoration*. Springer, Berlin. Pp. 287-296. Doi: 10.1007/978-3-662-45370-4_18
- Trouvelot, A., J. Koughy, V. Gianinazzi-Pearson, 1986. Mesure du taux de mycorrhization VA d'un système racinaire. Recherche de méthodes d'estimation ayant une signification fonctionnelle. In: Gianinazzi-Pearson, V., Gianinazzi, S. (eds.), *Physiological and genetical aspects of mycorrhizae*. INRA, Paris. Pp. 217-221.
- Van der Heijden, M.G.A., F.M. Martin, M.A. Selosse, I.R. Sanders, 2015. Mycorrhizal ecology and evolution: the past, the present, and the future. *New Phytologist* 205: 1406-1423. Doi: 10.1111/nph.13288

- Walker, C., 1983. Taxonomic concepts in the Endogonaceae: spore wall characteristics in species descriptions. *Mycotaxon* 18: 443-455.
- Wijayawardene, N.N., J. Pawłowska, P.M. Letcher et al., 2018. Notes for genera: basal clades of fungi (including Aphelidiomycota, Basidiobolomycota, Blastocladiomycota, Calcarisporiellomycota, Caulochytriomycota, Chytridiomycota, Entomophthoromycota, Glomeromycota, Kickxellomycota, Monoblepharomycota, Mortierellomycota, Mucoromycota, Neocallimastigomycota, Olpidiomycota, Rozellomycota and Zoopagomycota). *Fungal Diversity* 92: 43-129. Doi: 10.1007/s13225-018-0409-5
- WRB, 2015. Working Group World Reference Base for Soil Resources (WRB), 2015 update. International soil classification system for soil nomenclature and the creation of soil map legends. *World Soil Resources Reports*,106. FAO, Roma.