



**ALIADOS
INVISIBLES
DEL NOGAL
PECANERO:
EL PAPEL DE
LOS HONGOS
MICORRÍZICOS
ARBUSCULARES**

RESUMEN

Los hongos micorrízicos arbusculares (HMA) establecen una simbiosis mutualista con las raíces de la mayoría de las plantas terrestres, favoreciendo la absorción de agua y nutrientes, así como la regulación fisiológica frente a condiciones ambientales adversas. En cultivos perennes como el nogal pecanero (*Carya illinoensis*), esta interacción ha cobrado relevancia debido a su potencial para mejorar la productividad y la calidad del fruto, especialmente en regiones semiáridas donde la disponibilidad hídrica es limitada. La diversidad de HMA en sistemas pecaneros depende del suelo, manejo agronómico y clima, siendo los microorganismos nativos una alternativa prometedora como bioinsumos. Bajo estrés hídrico, los HMA mejoran la tolerancia vegetal mediante ajustes fisiológicos, activación antioxidante y mayor eficiencia en la absorción de fósforo. Además, pueden incrementar compuestos fenólicos y flavonoides en la nuez, fortaleciendo su valor nutracéutico. En conjunto, el uso de HMA representa una estrategia sostenible para mejorar la resiliencia productiva, la fertilidad del suelo y la calidad funcional del fruto.

ABSTRACT

Arbuscular mycorrhizal fungi (AMF) establish a mutualistic symbiosis with the roots of most terrestrial plants, enhancing water and nutrient uptake, as well as physiological regulation under adverse environmental conditions. In perennial crops such as pecan (*Carya illinoensis*), this interaction has gained relevance due to its potential to improve productivity and fruit quality, especially in semi-arid regions where water availability is limited. The diversity of AMF in pecan production systems depends on soil type, agronomic management, and climatic conditions, with native microorganisms representing a promising alternative as bioinputs. Under water stress conditions, AMF improve plant tolerance through physiological adjustments, activation of antioxidant systems, and increased efficiency in phosphorus uptake. Additionally, AMF can increase the concentration of phenolic compounds and flavonoids in pecan nuts, enhancing their nutraceutical value. Overall, the use of AMF represents a sustainable strategy to improve crop resilience, soil fertility, and the functional quality of the fruit.

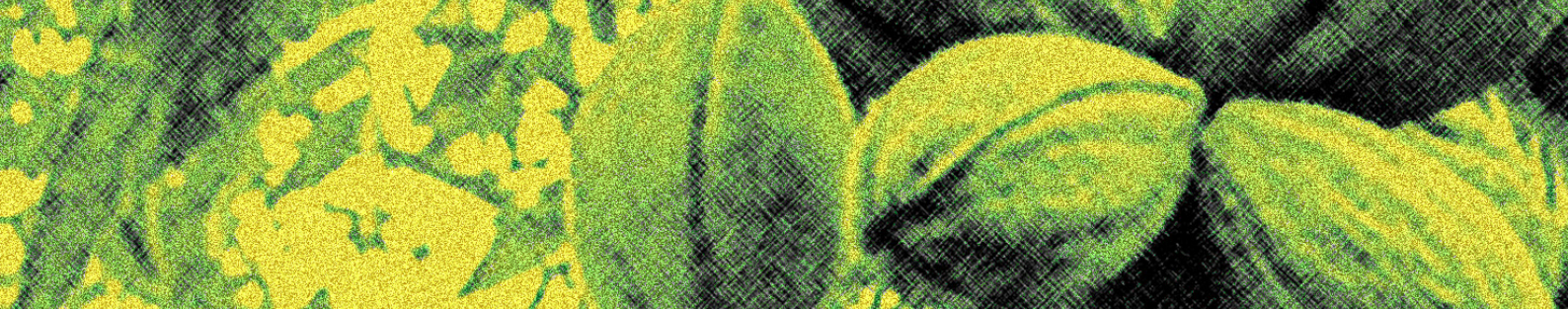


Palabras clave: Hongos Micorrízicos Arbusculares (HMA), simbiosis planta-microorganismo, nogal pecanero, déficit hídrico.

Key words: Arbuscular Mycorrhizal Fungi (AMF), plant-microorganism symbiosis, pecan tree, water deficit.

¹ Universidad Autónoma de Chihuahua, Facultad de Ciencias Agrotecnológicas, Universidad Autónoma de Chihuahua, Av. Pascual Orozco s/n, Campus 1, Santo Niño, Chihuahua, Chih., México, CP: 31000; a317608@uach.mx

² Universidad Autónoma de Chihuahua, Facultad de Ciencias Agrícolas y Forestales, Km. 2.5 carretera a Rosales, Poniente, CP 33000, Delicias, Chihuahua, México. spalvarez@uach.mx, cvu945005@uach.mx, luranga@uach.mx, rcontrerasm@uach.mx



INTRODUCCIÓN

Existe una asociación simbiótica altamente beneficiosa entre los hongos micorrízicos arbusculares (HMA) y las raíces de las plantas (Field *et al.*, 2019; Smith y Read, 2008). Estos hongos son uno de los componentes más relevantes de la microbiota del suelo, debido a su papel en la nutrición mineral, la absorción de agua y la regulación fisiológica de las plantas (Alam *et al.*, 2023). Esta simbiosis HMA-planta ocurre en la mayoría de las especies vegetales terrestres y permite mejorar la adaptación a condiciones ambientales difíciles, incluyendo sequía, salinidad y altas temperaturas (Bowles *et al.*, 2016). Los HMA forman una asociación con las raíces, facilitando el intercambio de carbono de la planta hacia el hongo y nutrientes del suelo hacia la planta (Jiang *et al.*, 2017).

En cultivos perennes de importancia económica como el nogal pecanero [*Carya illinoensis* (Wangenh.) K. Koch, 1869], la interacción con microorganismos del suelo ha cobrado interés debido a su potencial para mejorar la productividad y la calidad del fruto (Muñoz-Márquez *et al.*, 2009). Estudios recientes han demostrado que los microorganismos del suelo que se encuentran en la parte más cercana a las raíces de las plantas, pueden influir en la absorción de nutrientes y en el rendimiento de la nuez, lo que sugiere que la manipulación de estas interacciones podría optimizar la producción en sistemas agrícolas comerciales.

Además, el nogal pecanero es un cultivo altamente sensible a la disponibilidad hídrica, especialmente en regiones semiáridas (Stock *et al.*, 2025). La presencia de micorrizas puede mejorar la tolerancia al déficit hídrico mediante el aumento de la eficiencia en el uso del agua y la absorción de nutrientes, lo que representa una estrategia potencial para mitigar los efectos del cambio climático sobre la producción agrícola (Guerrero-Galán *et al.*, 2018; Babuin *et al.*, 2016).

EL NOGAL PACANERO Y EL ESTRÉS

El nogal pecanero (*C. illinoensis*) es considerado uno de los frutales de mayor importancia en México (Figura 1). Su principal valor económico radica en la producción de su fruto, la nuez pecanera, la cual destaca por su alto valor nutritivo. En 100 g de porción comestible, contiene aproximadamente 70% de lípidos, 14% de carbohidratos, 9% de proteínas, 3% de agua y 3% de fibra, además de vitaminas A, B y C, y minerales como calcio, hierro, potasio, fósforo y magnesio. Debido a esta composición, presenta un elevado aporte energético cercano a las 700 kcal (Reyes-Vázquez y Urrea-López, 2016).

Este cultivo necesita grandes cantidades de agua, más de 1,100 mm por año, lo que puede generar problemas cuando el recurso es limitado, especialmente en condiciones de sequía. En este contexto, se han desarrollado estrategias para el uso del agua eficiente, como programación de riegos basados en la temperatura ambiental, los cuales han demostrado mejorar el manejo hídrico del cultivo. Sin embargo, además del manejo agronómico, también la capacidad natural de la planta al déficit hídrico juega un papel importante (Sifuentes-Ibarra *et al.*, 2015).

El manejo adecuado del riego es necesario para el cultivo del nogal pecanero, ya que aumenta tanto el rendimiento del fruto como la calidad de la cosecha. La presencia de deficiencia hídrica durante el período de llenado del fruto resulta en germinación prematura y menor desarrollo de materia seca, según el estudio de Godoy-Ávila y Huitrón-Ramírez (1998). Los estudios sobre la programación del riego de esta especie han sido poco útiles, ya que suelen basarse de métodos indirectos, como medir la humedad del suelo, estimar cuánta agua pierde la planta por evaporación, observaciones de su crecimiento y seguir calendarios de riego previamente establecidos (Stein *et al.*, 1989). Por otra parte, los métodos que analizan como responde el árbol a nivel interno brindan claros beneficios, ya que permiten a los investigadores conocer directamente el estado hídrico de la planta, lo que muestra cómo las condiciones ambientales afectan tanto a los elementos atmosféricos como al suelo (Bonany *et al.*, 2000).

Los árboles de nogal pecanero funcionan como integradores ambientales, ya que sus huertas proveen diversos servicios ecosistémicos que trascienden la producción agrícola, además de que reflejan las condiciones climáticas actuales a través de sus patrones de crecimiento y reproducción (Mexal y Herrera, 2014).

Teniendo en cuenta la sensibilidad de este cultivo a la falta de agua, Cao *et al.* (2019) analizaron la influencia de diferentes portainjertos de plántulas para evaluar su tolerancia al estrés hídrico en árboles injertados de la variedad 'Pawnee'. Los resultados demostraron que la selección de portainjertos afecta significativamente, ya que algunos ayudan a la planta a conservar mejor el agua, adaptarse internamente a la falta de humedad y regular la pérdida de agua a través de las hojas. Cabe destacar que ciertos portainjertos mostraron un rendimiento superior en condiciones de déficit hídrico, lo que indica una mayor capacidad para afrontar el estrés hídrico. Entre las variedades evaluadas, 'Posey', 'Peruque' y 'Riverside' mostraron los niveles más altos de tolerancia a la sequía, mientras que 'Giles' y 'Frutoso' fueron las más susceptibles.

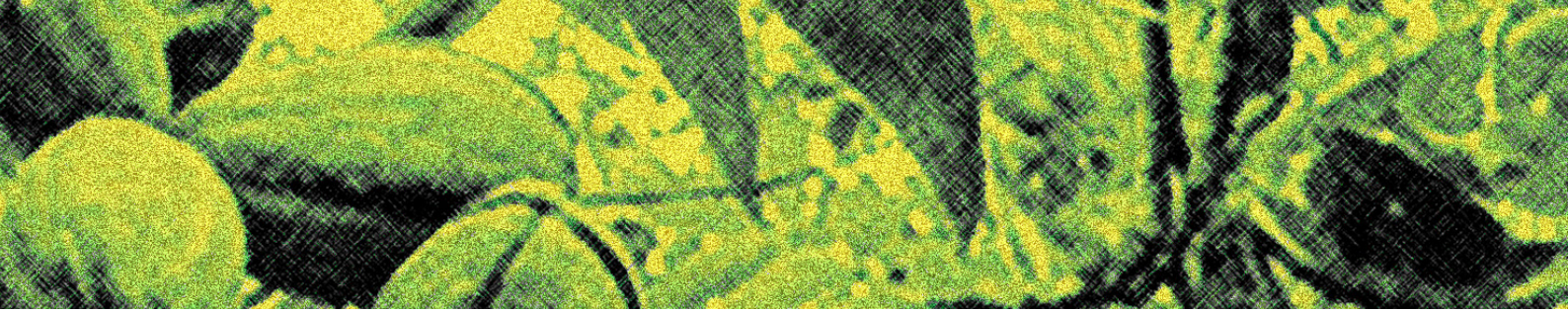
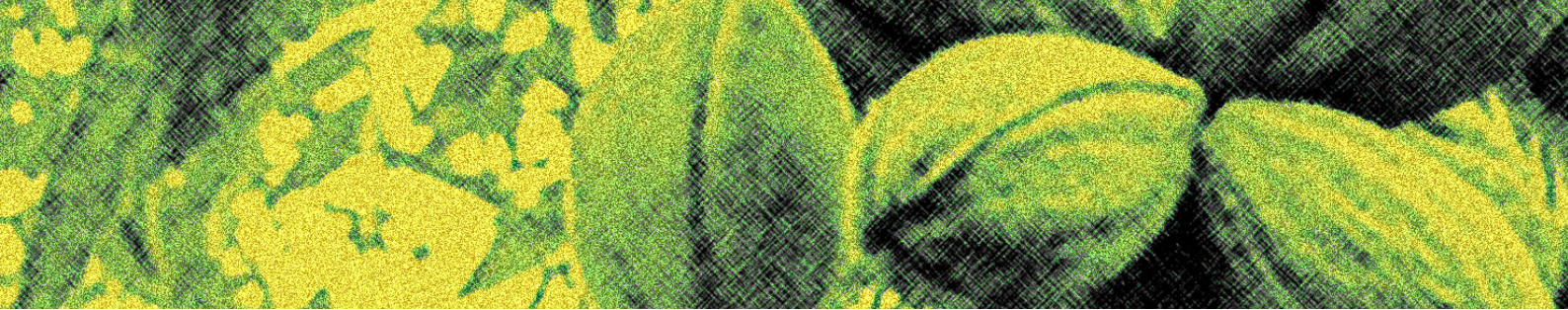


Figura 1. Nogal pecanero (*Carya illinoensis* [Wangenh.] K. Koch 1869) y sus frutos (Fuente: autores).



DIVERSIDAD Y PRESENCIA DE HMA EN LOS NOGALES

La diversidad de HMA asociados al nogal pecanero depende del tipo de suelo, manejo agronómico y condiciones climáticas. Investigaciones han documentado la presencia de comunidades de HMA en suelos de huertos pecaneros mediante análisis morfológicos y moleculares, que son el estudio de sus características en cuanto a estructura y apariencia y su información genética (Muñoz-Márquez *et al.*, 2009), evidenciando que la diversidad microbiana puede variar entre sistemas productivos y condiciones ambientales (Fernández-Bidondo *et al.*, 2018) (Figura 2).

Se ha observado que la comunidad micorrízica asociada a plantas en campo suele ser más diversa que en sistemas controlados, lo que resalta la importancia del estudio de HMA nativos. Esto sugiere que los microorganismos locales podrían estar mejor adaptados a las condiciones específicas del suelo y el clima, incrementando su potencial como bioinsumos agrícolas (Fernández-Bidondo *et al.*, 2018).

Asimismo, la presencia de micorrizas en huertos pecaneros se relaciona con factores de manejo como fertilización nitrogenada, la cual puede modificar la cantidad de microorganismos benéficos que viven alrededor de las raíces en el suelo (Dierks *et al.*, 2022; Marco *et al.*, 2022; Gobert y Plassard, 2002). Esto demuestra que hay una compleja relación entre el suelo, la planta y los microorganismos dentro de los sistemas de producción agrícola (Ren *et al.*, 2023).

Existe muy poca literatura que aborde la temática de los HMA en el nogal pecanero. Algunos hongos ectomicorrízicos que se caracterizan por colonizar la capa superficial de las raíces, se identificaron por Ma *et al.* (2021), entre ellos *Boletus edulis*, *Calvatia uiacina* y *Cantharellus cibarius*, extraídos de nogales. Estos hongos demostraron que pueden promover el crecimiento de las plantas y permitir que los nogales resistan el estrés ambiental. En otro estudio, también

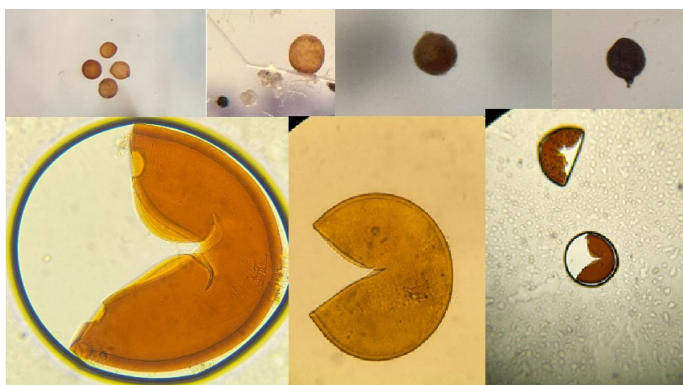


Figura 2. Diversidad de esporas de HMA en árboles de nogal pecanero (*C. illinoensis*) en Delicias, Chihuahua (Fuente: autores).

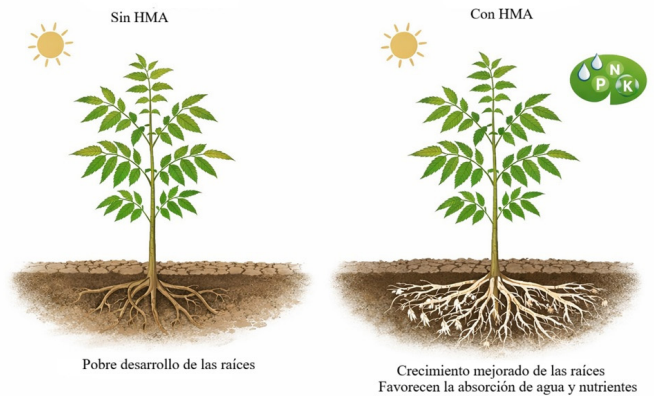


Figura 3. Comparación del crecimiento del nogal pecanero (*C. illinoensis*) con y sin HMA (Fuente: <https://chatgpt.com> versión Plus).

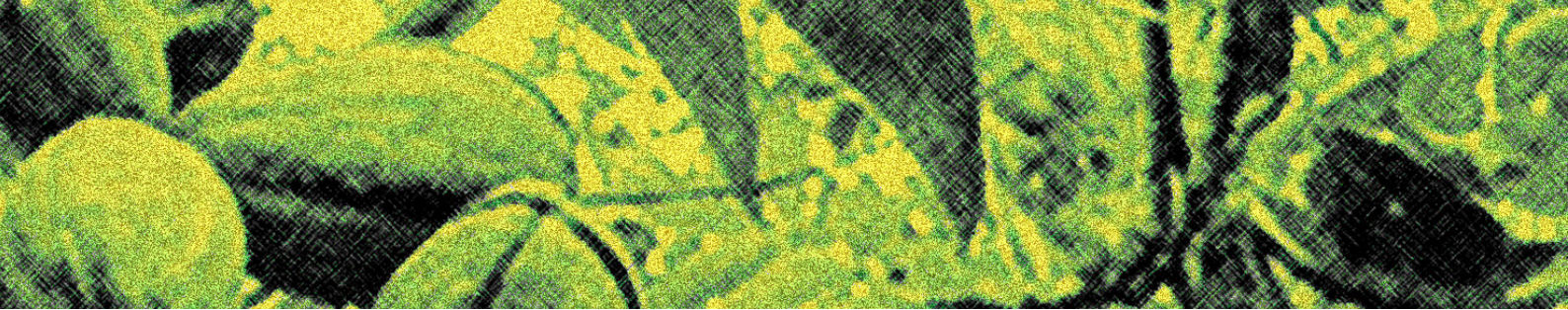
enfocado a la identificación de ectomicorrizas Bonito *et al.* (2011) analizaron cinco huertos de nogal en el sur de Georgia, EUA, identificándose cuarenta y cuatro taxones ectomicorrízicos distintos, entre los que destacan los géneros *Tuber* y *Scleroderma*; molecularmente los dos tipos de secuencias más abundantes pertenecían a *T. lyonii* (17 %) y a una especie de *Tuber* no descrita (~20 %).

MECANISMOS FISIOLÓGICOS DE LOS HMA EN LA TOLERANCIA AL ESTRÉS HÍDRICO EN EL NOGAL

El agua es uno de los recursos críticos más importantes para el crecimiento y desarrollo de las plantas, especialmente en regiones en donde su disponibilidad es escasa (Hassan *et al.*, 2020; Amiri *et al.*, 2015). Los HMA contribuyen a la tolerancia al estrés abiótico mediante múltiples mecanismos fisiológicos y bioquímicos (Ruiz-Lozano *et al.*, 2012). Entre ellos destacan la mejora en la absorción de agua y nutrientes, el ajuste osmótico y la regulación hormonal en la planta hospedera (Duan *et al.*, 2021) (Figura 3).

En condiciones de sequía severa, estos efectos se potencian a través de la simbiosis planta-HMA, la cual incrementa la capacidad de captación de agua mediante el desarrollo de pelos radicales y la expansión del sistema hifal en el suelo. Asimismo, los HMA modifican la permeabilidad de las raíces y favorecen la formación de agregados del suelo, creando microambientes que optimizan la disponibilidad de agua (Faghihinia *et al.*, 2023).

Behrooz *et al.* (2019) utilizaron *Glomus mosseae*, *G. etunicatum* y una mezcla de ambas especies para inocular plántulas de nogal de un año de edad; encontraron que *G. etunicatum* fue la más eficiente para aliviar los síntomas de sequía. Este estudio demostró no solo que la mejora de la tolerancia a la sequía en plantas de nogal micorrizado



depende de las especies de HMA, sino también que los HMA en este cultivo estimulan las respuestas de crecimiento y la absorción de nutrientes, lo que ayuda a la adaptación de estas plantas a la sequía.

A nivel molecular, los HMA pueden inducir la expresión de genes relacionados con transporte de agua, homeostasis iónica y detoxificación celular, estos procesos permiten mantener la funcionalidad celular bajo condiciones de estrés ambiental (Abdallah *et al.*, 2025). Un ejemplo de estos estudios moleculares fue realizado por Aroca *et al.* (2009) al identificar y clonar seis genes de acuaporinas (proteínas que permiten el flujo rápido de agua), provenientes de los HMA *Glomus intraradices* y *Rhizophagus clarus* demostrando que los HMA regulan la expresión de estos genes en la planta hospedera de distintas maneras: pueden incrementarla para favorecer la absorción de agua, reducirla para limitar la pérdida hídrica y el estrés oxidativo, o mantenerla estable según las condiciones ambientales. Esta modulación de las acuaporinas no solo ocurre bajo sequía, sino que también es fundamental para mantener las células bien hidratadas, turgentes (tejidos firmes) y con la capacidad de absorber agua aún en condiciones de salinidad y estrés por metales pesados.

Además, la colonización micorrízica mejora la arquitectura de las raíces y la eficiencia en la absorción de fósforo, un nutriente clave en el metabolismo energético y la síntesis de metabolitos secundarios, es decir, el funcionamiento interno de la planta (Ge *et al.*, 2022; Nell *et al.*, 2010). Según Eskimez *et al.* (2025) la inoculación con HMA del género *Glomus* spp. de portainjertos de nogal obtenidos de cultivo *in vitro* demostró ser una estrategia eficaz para mejorar la nutrición vegetal y el crecimiento; incrementándose significativamente la colonización radicular y favoreciendo la absorción de nutrientes esenciales, destacando aumentos en nitrógeno, fósforo y, especialmente, manganeso, así como mejoras en potasio y zinc. Este incremento en la absorción de nutrientes se asoció con un mayor desarrollo estructural de las plantas, reflejado en el aumento del diámetro del tallo, crecimiento de ramas y un desarrollo general más amplio. En conjunto, estos resultados resaltan el papel clave de los HMA como herramienta sostenible para mejorar la nutrición y productividad del nogal, especialmente en condiciones de suelo limitantes.

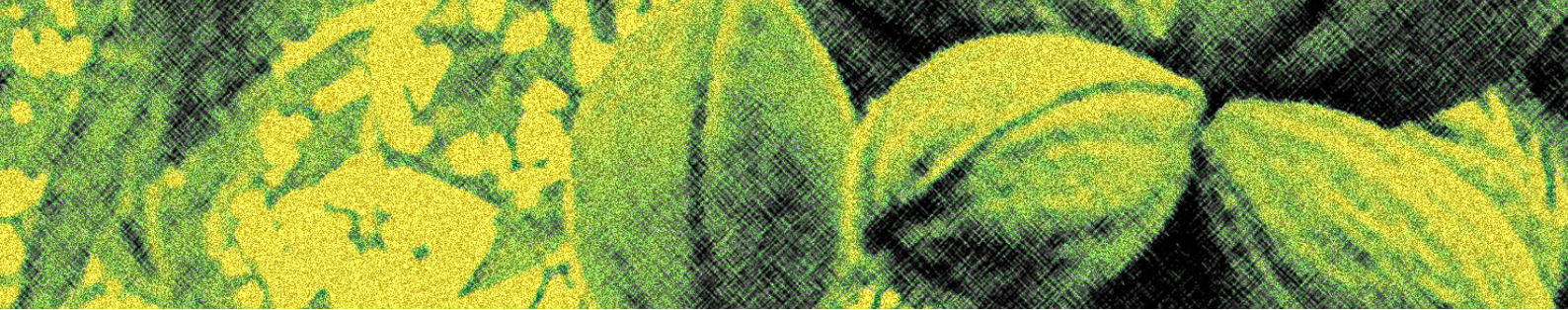
REGULACIÓN DEL METABOLISMO ANTIOXIDANTE Y LOS HMA EN NOGAL
La sequía genera un desequilibrio metabólico en las plantas debido a la acumulación de desechos peligrosos, lo que afecta negativamente la productividad. Sin embargo, la inoculación con HMA contribuye a mitigar este efecto al fortalecer los sistemas antioxidantes (Zou *et al.*, 2021) (Figura 4).



Figura 4. Papel de los HMA en la mitigación el estrés oxidativo inducido por sequía (Fuente: <https://chatgpt.com> versión Plus).

Un análisis de varios estudios realizado por Chandrasekaran y Paramasivan (2022), demostró que los HMA aumentan significativamente la tolerancia al estrés hídrico, principalmente mediante la activación de enzimas antioxidantes. No obstante, la magnitud de estos beneficios depende de factores como la especie vegetal, el tipo de HMA y la intensidad del estrés. En conjunto, los resultados confirman el papel clave de los HMA en la regulación del estrés oxidativo bajo condiciones de sequía. Uno de los efectos más relevantes de los HMA en plantas bajo estrés hídrico es la regulación del metabolismo antioxidante.

Ma *et al.* (2022) demostraron que los HMA pueden mitigar la acumulación de toxinas (daño oxidativo), causado por la sequía mediante la activación de sistemas antioxidantes y la regulación de proteínas que activan defensas ante el estrés. En nogal, la inoculación con *Diversispora spurca* mejoró el crecimiento de las plantas incluso bajo estrés hídrico, a pesar de una reducción en la colonización micorrízica. Además, incrementó la acumulación de compuestos antioxidantes, así como la actividad de enzimas antioxidantes, reduciendo la acumulación de residuos tóxicos y el daño celular. A nivel molecular, se observó la sobreexpresión de algunos genes, especialmente bajo condiciones de



sequía. En conjunto, estos resultados indican que los HMA fortalecen la tolerancia al estrés hídrico en nogal mediante la activación de defensas antioxidantes y la regulación de genes asociados al estrés.

Diversos estudios han demostrado que la inoculación con HMA puede incrementar significativamente la acumulación de compuestos fenólicos y flavonoides, los cuales actúan como antioxidantes naturales. Un ejemplo de esto es el incremento de algunos metabolitos (fenoles totales y prolina) en plantas de nogal bajo estrés hídrico inoculadas con *Glomus mosseae* y *G. etunicatum* (Behrooz *et al.*, 2019). Se ha reportado que estos compuestos pueden aumentar hasta 50–60% en plantas micorrizadas bajo condiciones de estrés hídrico (Kasote *et al.*, 2015).

En otro estudio el análisis metabolómico en nogal inoculado con *D. spurca* reveló que los HMA indujeron cambios importantes en el perfil de metabolitos radiculares, promoviendo la acumulación diferencial de compuestos específicos, destacando el incremento de metabolitos relacionados con la respuesta al estrés, como flavonoides y compuestos fenólicos, los cuales contribuyen a la protección celular. Estos resultados indican que los HMA modulan el metabolismo de la planta, favoreciendo la adaptación al estrés hídrico mediante ajustes bioquímicos y fisiológicos (Zou *et al.*, 2023).

IMPLICACIONES AGRONÓMICAS DEL USO DE HMA EN NOGAL PECANERO

El uso de HMA nativos como biofertilizantes representa una alternativa sostenible frente al uso excesivo de fertilizantes químicos. La simbiosis micorrízica, como ya se ha planteado, mejora la eficiencia en el uso de nutrientes lo que puede reducir costos de producción (Wahab *et al.*, 2023). Además, la inoculación micorrízica

puede incrementar la resiliencia del cultivo frente a eventos climáticos extremos, particularmente sequías prolongadas, que representan uno de los principales desafíos para la producción pecanera en regiones semiáridas (Samanta *et al.*, 2025).

Desde el punto de vista ecológico, la promoción de microbiota benéfica del suelo contribuye a la estabilidad del agroecosistema y al mantenimiento de la fertilidad del suelo a largo plazo (Wahab *et al.*, 2023). Las perspectivas futuras apuntan a mejorar la eficiencia de los HMA mediante métodos de mejoramiento e ingeniería genética, junto con la investigación de las vías de señalización molecular que determinan las relaciones planta-hongo. La combinación de métodos de agricultura de precisión con bioformulaciones avanzadas e innovaciones biotecnológicas mejorará la capacidad de los HMA para adaptarse a diferentes condiciones ambientales y sistemas de cultivo, lo que permitirá su uso exitoso en la fruticultura comercial (Sharma *et al.*, 2025).

CONCLUSIONES

Los hongos micorrízicos arbusculares representan una herramienta biotecnológica prometedora para mejorar la sostenibilidad del cultivo de nogal pecanero. Su capacidad para mejorar la absorción de nutrientes, aumentar la tolerancia al estrés hídrico y estimular la producción de compuestos antioxidantes los posiciona como un componente clave en la agricultura moderna.

El estudio de HMA nativos asociados a huertas de nogal pecanero podría permitir el desarrollo de estrategias de manejo biológico adaptadas a condiciones locales, contribuyendo no solo a la productividad y a incrementar la calidad nutracéutica del fruto, sino también a una agricultura sustentable.

Literature cited



- Abdallah, M.M., C. Suo, Y. Cui, R.H. Ullah, H.H. Nhung, L. Li, C. Liu. 2025. Arbuscular mycorrhizal fungi as integrative modulators of plant tolerance to drought, salinity, and heavy metal stress: mechanistic insights and future directions. *Journal of Genetic Engineering and Biotechnology*. 24: 100636. <https://doi.org/10.1016/j.jgeb.2025.100636>
- Alam, M.Z., T.R. Choudhury, M.A.U. Mridha. 2023. Arbuscular mycorrhizal fungi improve biomass growth, mineral content, and antioxidant activity in tomato plants under drought stress. *Journal of Food Quality*. 2023(1): 2581608. <https://doi.org/10.1155/2023/2581608>
- Amiri, R., A. Nikbakht, N. Etemadi. 2015. Alleviation of drought stress on rose geranium [*Pelargonium graveolens* (L.) Herit.] in terms of antioxidant activity and secondary metabolites by mycorrhizal inoculation. *Scientia Horticulturae*. 197: 373-380. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2015.09.062>
- Aroca, R., A. Bago, M. Sutka, J. A. Paz, C. Cano, G. Amodeo, J.M. Ruiz-Lozano. 2009. Expression analysis of the first arbuscular mycorrhizal fungi aquaporin described reveals concerted gene expression between salt-stressed and nonstressed mycelium. *Molecular Plant-Microbe Interactions*. 22(9): 1169-1178. <https://doi.org/10.1094/MPMI-22-9-1169>
- Babuín, M.F., M. Echeverría, A.B. Menéndez, S.J. Maiale. 2016. Arbuscular mycorrhizal pecan nut seedlings alleviate the effect of restricted water supply. *Hortscience*. 51(3): 212-215. <https://doi.org/10.21273/HORTSCI.51.3.212>
- Behrooz, A., K. Vahdati, F. Rejali, M. Lotfi, S. Sarikhani, C. Leslie. 2019. Arbuscular mycorrhiza and plant growth-promoting bacteria alleviate drought stress in walnut. *HortScience*. 54: 1087-1092. <https://doi.org/10.21273/HORTSCI.54.1087-1092>
- Bonany, J., F. Camps, J. Salvia, M. Cohen. 2000. Relationship between trunk diameter fluctuations, stem water potential and fruit growth rate in potted adult apple trees. *Acta Horticulturae*. 511: 43-49.
- Bonito, G., T. Breneman, R. Vilgalys. 2011. Ectomycorrhizal fungal diversity in orchards of cultivated pecan (*Carya illinoensis*; Juglandaceae). *Mycorrhiza*. 21(7): 601-612. <https://doi.org/10.1007/s00572-011-0368-0>
- Bowles, T.M., F.H. Barrios-Masias, E.A. Carlisle, T.R. Cavagnaro, L.E. Jackson. 2016. Effects of arbuscular mycorrhizae on tomato yield, nutrient uptake, water relations, and soil carbon dynamics under deficit irrigation in field conditions. *Science of the Total Environment*. 566-567, 1223-1234. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.05.178>
- Cao, F., Y. Wei, X. Wang, Y. Li, F. Peng. 2019. A study of the evaluation of the pecan drought resistance of grafted 'Pawnee' trees from different seedling rootstocks. *Hort-Science*. 54(12): 2139-2145. <https://doi.org/10.21273/HORTSCI.54.12.2139>
- Chandrasekaran, M. y M. Paramasivan. 2022. Arbuscular mycorrhizal fungi and antioxidant enzymes in ameliorating drought stress: a meta-analysis. *Plant Soil*. 480: 295-303. <https://doi.org/10.1007/s11104-022-05582-3>
- Dierks, J., W.J. Blaser-Hart, H.A. Gamper, J. Six. 2022. Mycorrhizal fungi-mediated uptake of tree-derived nitrogen by maize in smallholder farms. *Nature Sustainability*. 5: 64-70. <https://doi.org/10.1038/s41893-021-00791-7>
- Duan, H.X., C.L. Luo, S.Y. Zhu, W. Wang, M. Naseer, Y.C. Xiong. 2021. Density-and moisture-dependent effects of arbuscular mycorrhizal fungus on drought acclimation in wheat. *Ecological Applications*. 31(8): Article e02444. <https://doi.org/10.1002/eap.2444>
- Eskimez, İ., M. Bilginturan, Ş. Mertoglu, P. Mehmet, K. Barış, M. Kerem. 2025. Mycorrhizal symbiosis improves nutrient uptake and growth performance of walnut rootstock (cv. 'Vlach') in calcareous soils. *Applied Fruit Science*. 67, 426. <https://doi.org/10.1007/s10341-025-01664-5>
- Faghihinia, M., J. Jansa, L.J. Halverson, y P.L. Staddon. 2023. Hypophosphate microbiome of arbuscular mycorrhizal fungi: A realm of unknowns. *Biology and Fertility of Soils*, 59, 17-34. <https://doi.org/10.1007/s00374-022-01683-4>
- Fernández-Bidondo, L., R.P. Colombo, M. Recchi, V.A. Silvani, M. Pérgola, A. Martínez, A.M. Godeas. 2018. Detection of arbuscular mycorrhizal fungi associated with pecan (*Carya illinoensis*) trees by molecular and morphological approaches. *MycKeys*. 42: 73-88. <https://doi.org/10.3897/mycokeys.42.26118>
- Field, K.J., M.I. Bidartondo, W.R. Rimington, G.A. Hoysted, D. Beerling, D.D. Cameron, J.G. Duckett, J.R. Leake, S. Pressel. 2019. Functional complementarity of ancient plant-fungal mutualisms: contrasting nitrogen, phosphorus and carbon exchanges between Mucoromycotina and Glomeromycotina fungal symbionts of liverworts. *New Phytologist*. 223: 908-921. <https://doi.org/10.1111/nph.15819>
- Ge, S., L. He, L. Jin, X. Xia, L. Li, G.J. Ahammed, Z. Qi, J. Yu, Y. Zhou. 2022. Light-dependent activation of HY5 promotes mycorrhizal symbiosis in tomato by systemically regulating strigolactone biosynthesis. *New Phytologist*. 233(4): 1900-1914. <https://doi.org/10.1111/nph.17883>

- Gobert, A. y C. Plassard. 2002. Differential NO₃⁻ dependent patterns of NO₃⁻ uptake in *Pinus pinaster*, *Rhizopogon roseolus* and their ectomycorrhizal association. *New Phytologist*. 154: 509-516. <https://doi.org/10.1046/j.1469-8137.2002.00378.x>
- Godoy-Ávila, C. y Ma. V. Huitrón-Ramírez. 1998. Relaciones hídricas de hojas y frutos de nogal pecanero durante el crecimiento y desarrollo de la nuez. *Agrociencia*. 32(4): 331-338. <https://www.agrociencia-colpos.org/index.php/agrociencia/article/view/1564>
- Guerrero-Galán, G. Houdinet, M. Calvo-Polanco, K.E. Bonaldi, K. García, S.D. Zimmermann. 2018. Chapter Ten - *The role of plant transporters in mycorrhizal symbioses*. Pp. 303-342. In: Maurel, Ch (Eds). *Advances in botanical research*, Academic Press. <https://doi.org/10.1016/bs.abr.2018.09.012>
- Hassan, M.U., M. Aamer, U. Chattha, M. Haiying, T. Shahzad, B. Barbanti. 2020. The critical role of zinc in plants facing the drought stress. *Agriculture*. 10(9): 396. <https://doi.org/10.3390/agriculture10090396>
- Jiang, Y., W. Wang, Q. Xie, N. Liu, L. Liu, D. Wang, X. Zhang, C. Yang, X. Chen, D. Tang, E. Wang E. 2017. Plants transfer lipids to sustain colonization by mutualistic mycorrhizal and parasitic fungi. *Science*. 356(6343): 1172-1175. <https://doi.org/10.1126/science.aam9970>
- Kasote, D., M.S. Katyare, S.M. Hegde, V.H. Bae. 2015. Significance of antioxidant potential of plants and its relevance to therapeutic applications. *International Journal of Biological Sciences*. 11: 982. <https://doi.org/10.7150/ijbs.12096>
- Ma, W.-Y., Q.-S. Wu, Y.-J. Xu, K. Kuča, 2021. Exploring mycorrhizal fungi in walnut with a focus on physiological roles. *Notulae Botanicae Horti Agrobotanici Cluj-Napoca*. 49(2): 12363. <https://doi.org/10.15835/nbha49212363>
- Ma, W.-Y., Q.-Y. Qin, Y.-N. Zou, K. Kuča, B. Giri, Q.-S. Wu, A. Hashem, A.-B.F. Al-Arjani, K.F. Almutairi, E.F. Abd-Allah, Y.-J. Xu. 2022. Arbuscular mycorrhiza induces low oxidative burst in drought-stressed walnut through activating antioxidant defense systems and heat shock transcription factor expression. *Frontiers in Plant Science*. 13: 1089420. <https://doi.org/10.3389/fpls.2022.1089420>
- Marco, S., M. Loredana, V. Riccardo, B. Raffaella, C. Walter, N. Luca. 2022. Microbe-assisted crop improvement: a sustainable weapon to restore holobiont functionality and resilience. *Horticulture Research*. 9(2022). uhac160. <https://doi.org/10.1093/hr/uhac160/6648882>
- Mexal, J., E. Herrera. 2020. Servicios ambientales de árboles: énfasis en la industria del nogal pecanero. *Tecnociencia Chihuahua*. 8(1): 39-45. <https://doi.org/10.54167/tch.v8i1.651>
- Muñoz-Márquez, E., C. Macías-López, A. Franco-Ramírez, E. Sánchez-Chávez, J. Jiménez-Castro, J. González-García. 2009. Identificación y colonización natural de hongos micorrízicos arbusculares en nogal. *Terra Latinoamericana*. 27(4): 355-361. <https://www.scielo.org.mx/pdf/tl/v27n4/v27n4a10.pdf>
- Nell, M., C. Wawrosch, S. Steinkellner, H. Vierheilig, B. Kopp, A. Lössl, C. Franz, J. Novak, K. Zitterl-Eglseer. 2010. La colonización de raíces por hongos micorrízicos arbusculares simbióticos aumenta las concentraciones de ácido sesquiterpénico en *Valeriana officinalis* L. *Planta Medica*. 76(04): 393-398. <https://doi.org/10.1055/s-0029-1186180>
- Ren, W., L. Zhang, N. Maness, X. Wang, W. Tang, T. Xu. 2023. Changes in the diversity of pecan (*Carya illinoensis*) rhizosphere microbial community with different nitrogen fertilization, a case study in Oklahoma pecan orchard. *Scientia Horticulturae*. 321: 112365. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2023.112365>
- Reyes-Vázquez, N.C. y R. Urrea-López. 2016. *Retos y oportunidades para el aprovechamiento de la Nuez pecanera en México*. Centro de Investigación y Asistencia en Tecnología y Diseño del Estado de Jalisco, A.C. (CIATEJ), Guadalajara, Jalisco, México, 124 pp. https://www.researchgate.net/profile/Rafael-Urrea-Lopez/publication/314101984_Retos_y_opportunidades_para_el_aprovechamiento_de_la_Nuez_pecanera_en_Mexico/links/58b59a0b45851591c5d182aa/Retos-y-opportunidades-para-el-aprovechamiento-de-la-Nuez-pecanera-en-Mexico.pdf
- Ruiz-Lozano, J.M., R. Porcel, G. Bárzana, R. Azcón, R. Aroca. 2012. *Contribution of arbuscular mycorrhizal symbiosis to plant drought tolerance: state of the art*. Pp. 335-362. In: Aroca, R. (Eds) *Plant responses to drought stress*. Springer, Berlin, Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-642-32653-0_13
- Samanta, I., K. Ghosh, R. Saikia, Savita, P. J. Maity, G. Chowdhary. 2025. Arbuscular mycorrhizal fungi – a natural tool to impart abiotic stress tolerance in plants. *Plant Signaling and Behavior*. 20(1). <https://doi.org/10.1080/15592324.2025.2525843>
- Sharma, S., V.R. Singh, U. Sharma, Sh. Sharma, J. Likhita, Sh. Thakur, N. Sharma, A. Kumar, R. Kumar. 2025. Appraisal of arbuscular mycorrhiza in fruit production and mitigation against stress: Current insights and prospects. *Reviews in Agricultural Science*. 13(4): 1-29. https://doi.org/10.7831/ras.13.4_1
- Sifuentes-Ibarra, E., J.A. Samaniego-Gaxiola, A.A. Salgado, J.H. Núñez-Moreno, B. Valdez-Gascón, R.G. Gutiérrez-Soto, J. del R. Ruelas-Islas, J.M. Cervantes. 2015. Programación del riego en nogal pecanero (*Carya illinoensis*), mediante un modelo integral basado en tiempo térmico. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*. 6(8): 1893-1902. <https://www.scielo.org.mx/pdf/remexca/v6n8/2007-0934-remexca-6-08-01893.pdf>
- Smith, S.E. y D.J. Read. 2008. *Mycorrhizal symbiosis*. Third Edition, Academic press, New York, 787 pp. <https://doi.org/10.2136/sssaj2008.0015br>
- Stein, L.A., G.A. McEachern, J.B. Storey. 1989. Summer and fall moisture stress and irrigation scheduling influence pecan growth and production. *HortScience*. 24: 607-611. <https://journals.ashs.org/hort/hort/published/rest/pdf-watermark/v1/journals/hortsci/24/4/article-p607.pdf/watermark-pdf/>
- Stock, M.L., R.J. Heerema, J.J. Randall, A.L. Romero-Olivares, S.A. Belton, C. Velasco-Cruz, N. Pietrasiak. 2025. Uncovering the morphological and phylogenetic diversity of mushrooms in pecan orchards in the Southwestern United States. *Fungal Biology*. 129: 1878-6146. <https://doi.org/10.1016/j.funbio.2025.101608>
- Wahab, A., M. Muhammad, A. Munir, G. Abdi, W. Zaman, A. Ayaz, C. Khizar, S.P.P Reddy. 2023. Role of arbuscular mycorrhizal fungi in regulating growth, increasing productivity, and their potential influence on ecosystems subjected to abiotic and biotic stresses. *Plants*. 12 (17): 3102. <https://doi.org/10.3390/plants12173102>
- Zou, Y.N., Q.S. Wu, K. Kuča. 2021. Unravelling the role of arbuscular mycorrhizal fungi in mitigating the oxidative burst of plants under drought stress. *Plant Biology*. 1: 50-57. <https://doi.org/10.1111/plb.13161>
- Zou, Y.N., Q.Y. Qin, W.Y. Ma, L.J. Zhou, Q.Sh. Wu, Y.J. Xu, K. Kuča, A. Hashem, A.B. F. Al-Arjani, K.F. Almutairi, E.F. Abd-Allah. 2023. Metabolomics reveals arbuscular mycorrhizal fungi-mediated tolerance of walnut to soil drought. *BMC Plant Biology*. 23(1): 118. <https://doi.org/10.1186/s12870-023-04111-3>