

Contenido de polifenoles en granos de maíces nativos inoculados con hongos micorrízicos arbusculares

Polyphenol content in grains of maize landraces inoculated with arbuscular mycorrhizal fungi

Ismael Gutiérrez-Alarcón¹ , Olivia Márquez-Fernández² , Gerardo Alvarado-Castillo¹ ,
Dora Trejo-Aguilar¹ , Wendy Sangabriel-Conde^{1*} 

¹Facultad de Ciencias Agrícolas, Xalapa, Universidad Veracruzana. Universidad Veracruzana. Circuito Gonzalo Aguirre Beltrán s/n, CP. 91000. Zona Universitaria, Xalapa, Veracruz, México.

²Facultad de Biología, Xalapa, Universidad Veracruzana. Circuito Gonzalo Aguirre Beltrán s/n, CP. 91000. Zona Universitaria, Xalapa, Veracruz, México.

*Autor de correspondencia: wsangabriel@uv.mx

Artículo científico

Recibido: 01 de septiembre 2025

Aceptado: 26 de enero 2026

RESUMEN. Los maíces nativos de México concentran una gran diversidad genética y valiosos compuestos fenólicos como antocianinas y flavonoides. La cianidina-3-glucósido (C3G) es la antocianina predominante, y junto con flavonoides como la catequina, colorean la testa de los granos, protegen a la planta de estrés oxidativo y confieren valor antioxidante y nutraceutico para la salud humana. Estudios recientes proponen que la simbiosis con hongos micorrízicos arbusculares (HMA), puede estimular la producción de metabolitos antioxidantes mediante modificaciones de señalización molecular en la planta. El objetivo de esta investigación fue evaluar el efecto de la inoculación con HMA en granos de maíces nativos (Amarillo, Rojo y Negro), sobre el contenido de polifenoles (cianidina-3-glucósido y catequina) bajo condiciones de campo. Se aplicó un diseño experimental con dos factores: variedad e inoculante micorrízico. Se midió el porcentaje de colonización micorrízica en etapa vegetativa V7 y en etapa de transición V. Las concentraciones de C3G y catequina en los granos se determinaron mediante extracciones metanólicas y análisis espectrofotométrico a 535 y 450 nm respectivamente. Los tratamientos inoculados registraron mayores porcentajes de colonización micorrízica (Amarillo 87.95%, Negro 73.82% y Rojo 72.02%). Se registró una mayor concentración de C3G en los maíces Negro (51.26 mg kg⁻¹) y Amarillo (12.68 mg kg⁻¹) y un incremento del 9.65% de catequina exclusivamente en el maíz negro inoculado. Estos resultados ponen en evidencia que la inoculación con HMA puede ser una herramienta útil para incrementar el contenido de compuestos nutraceuticos como los polifenoles, en granos de variedades nativas de maíz.

Palabras clave: Agricultura de temporal, antioxidantes, cianidina-3-glucósido, micorrización, *Zea mays*.

ABSTRACT. Native Mexican maize contain a wide range of genetic diversity and valuable phenolic compounds such as anthocyanins and flavonoids. Cyanidin-3-glucoside (C3G) is the predominant anthocyanin, and together with flavonoids such as catechin, it contributes to grain pericarp pigmentation, enhances plant protection against oxidative stress, and provides antioxidant and nutraceutical benefits relevant to human health. Recent studies have proposed that symbiosis with arbuscular mycorrhizal fungi (AMF) can stimulate the biosynthesis of antioxidant metabolites through modifications in plant molecular signaling pathways. The objective of this study was to evaluate the effect of AMF inoculation on the content of polyphenols (C3G and catechin) in native maize grains (Yellow, Red and Black) under field conditions. A two-factor experimental design was established, with treatment factors "variety" and "mycorrhizal inoculum". The percentage of mycorrhizal colonization was measured at V7 vegetative stage and VT transition stage. Concentrations of C3G and catechin in grains were quantified through methanolic extractions and spectrophotometric analysis at 535 nm and 450 nm, respectively. Inoculated treatments showed higher rates of mycorrhizal colonization (Yellow: 87.95%, Black: 73.82%, Red: 72.02%). Higher concentrations of C3G were observed in Black (51.26 mg kg⁻¹) and Yellow maize (12.68 mg kg⁻¹), while a 9.65% increase in catechin was detected exclusively in inoculated Black maize. The results obtained show that AMF inoculation can be a useful tool for increasing the nutraceutical compounds contents, such as polyphenols, in grains of native maize varieties.

Keywords: Rainfed agriculture, antioxidants, Cyanidin-3-glucoside, mycorrhization, *Zea mays*.

Como citar: Gutiérrez-Alarcón I, Márquez-Fernández O, Alvarado-Castillo G, Trejo-Aguilar D, Sangabriel-Conde W (2026) Contenido de polifenoles en granos de maíces nativos inoculados con hongos micorrízicos arbusculares. Ecosistemas y Recursos Agropecuarios 13(1): e4760. DOI: 10.19136/era.a13n1.4760.

INTRODUCCIÓN

Mesoamérica es el centro de origen, domesticación y diversificación del maíz (*Zea mays*), uno de los cultivos más importantes para México, ya que constituye la base de la alimentación, y juega un papel central en la sociedad, cultura y economía del país. En México se reconocen entre 41 y 65 razas de maíz, de las aproximadamente 220 a 300 existentes en todo el continente americano (Kato *et al.* 2009). Estas razas se han agrupado en complejos basados en caracteres morfológicos, adaptativos, genéticos (isoenzimas) y raciales (Caballero-García *et al.* 2019). Sin embargo, cada raza incluye múltiples variantes con diferencias en forma de mazorca, color y textura de grano, adaptaciones ecológicas y diversidad genética (Barrera-Guzmán *et al.* 2020). A través del conocimiento y la experiencia, los agricultores han logrado mantener y adaptar una vasta diversidad de maíces nativos (Castillo-Nonato 2016).

Las variedades criollas destacan por su riqueza en compuestos fenólicos con propiedades antioxidantes (Salinas-Moreno *et al.* 2024). Estos metabolitos secundarios incluyen ácidos fenólicos, estilbenos, lignanos y, en mayor proporción, flavonoides, los cuales se agrupan en flavonas, flavonoles, isoflavonas, flavanonas, flavanoles (taninos condensados) y antocianinas (Guo *et al.* 2024); y son responsables de la intensa coloración de la testa de sus granos (Jiang *et al.* 2023). Sus variaciones estructurales, junto con el pH y la presencia de grupos metoxilo e hidroxilo, determinan las distintas gamas cromáticas observadas, por ejemplo, en soluciones ácidas, predominan las formas de ion oxonio o catión flavilio (AH^+), que generan colores rojos intensos, y a medida que el pH aumenta, se favorecen formas neutras o aniónicas que pueden mostrar colores púrpuras o azules (Alappat y Alappat 2020, Rabanal-Atalaya y Medina-Hoyos 2021). Se sabe que el grupo de las antocianinas se encuentran conjugadas con azúcares en forma de heterósidos, lo que les confiere solubilidad en agua y mayor estabilidad (Nurtiana 2019, Xue *et al.* 2024) influyendo en su biodisponibilidad y actividad biológica en el organismo humano. Diversos estudios han documentado que la ingesta de antocianinas puede tener efectos antioxidantes, antiinflamatorios y cardioprotectores, además de modular la microbiota intestinal (Khoo *et al.* 2017). En particular, el consumo regular de maíz pigmentado, rico en antocianinas, se ha asociado con la reducción de marcadores de estrés oxidativo y la mejora en parámetros metabólicos relacionados con obesidad y diabetes tipo 2 (Sasaki *et al.* 2007, Lao *et al.* 2017).

En términos biológicos, los compuestos fenólicos, flavonoides y antocianinas protegen a las plantas de las especies reactivas de oxígeno (ERO), que pueden causar daño oxidativo. También participan en la atracción de polinizadores y en la defensa contra organismos fitopatógenos (Naing y Kim 2021). En el grano de maíz, la biosíntesis de antocianinas ocurre en la aleurona y el pericarpio, y está regulada por genes estructurales y factores de transcripción que se expresan durante el desarrollo del grano (Li *et al.* 2019, Peniche-Pavía *et al.* 2022).

El uso de inoculantes microbianos a base de rizobacterias y hongos micorrízicos arbusculares (HMA), ha demostrado ser una alternativa ecológica para mejorar el rendimiento de cultivos y aumentar el contenido de metabolitos secundarios, incluidos los compuestos nutraceuticos (Mannino *et al.* 2021). Los HMA pertenecen al phylum Glomeromycota y forman simbiosis con la mayoría de las plantas vasculares, mejorando la absorción de nutrientes poco disponibles como fósforo y nitrógeno (Stürmer y Kemmelmeier 2021). Además, se ha reportado que la colonización

micorrízica activa rutas metabólicas en las plantas que promueven la acumulación de compuestos antioxidantes, incluidos los flavonoides y antocianinas, a través de las rutas de biosíntesis de fenilpropanoides (Šimura *et al.* 2017, Sachdev *et al.* 2021).

En este contexto, se propuso evaluar el efecto de la inoculación de hongos micorrízicos arbusculares en el contenido de compuestos fenólicos, específicamente flavonoides totales y antocianinas, en tres variedades de maíces criollos pigmentados, con miras a encontrar combinaciones funcionales que permitan incrementar la concentración de metabolitos con potencial nutracéutico y sirvan de base para el desarrollo de alternativas sostenibles para un mejor desarrollo y productividad de maíces nativos.

MATERIALES Y MÉTODOS

El experimento se llevó a cabo en La Orduña, Coatepec, Veracruz, en temporada otoño-invierno, utilizando un diseño factorial 3 * 2, la variedad de maíz (amarilla, roja y negra) y la aplicación de inoculante micorrízico (con y sin inoculante micorrízico), evaluando en total seis tratamientos resultantes de la combinación de ambos factores. El diseño experimental correspondió a un diseño de bloques completos al azar, con tres bloques para cada tratamiento, cada uno compuesto por 45 plantas, dando un total de 135 plantas por tratamiento. De cada tratamiento se seleccionaron 15 plantas, siguiendo un patrón en zig-zag y evitando los bordes de las calles.

Los granos de maíz fueron sembrados en un sistema de labranza cero (2 años) a una profundidad de 5 ± 1 cm y en una densidad de siembra de 50 000 plantas ha^{-1} (40 * 50 cm). A los tratamientos inoculados se les realizó dos aplicaciones de inóculo por planta, 15 gramos al momento de la siembra y una dosis igual 15 días después. La inoculación de HMA se hizo mediante el producto Rizofermic®, consorcio conformado por las especies *A. morrowiae*, *A. spinosa*, *A. scrobiculata*, *F. mosseae*, *F. geosporus*, *G. rosea*, *G. decipiens*, *G. macrocarpum*, *G. aggregatum*, *R. intraradices*, *S. pellucida* y *C. etunicatum*, todos nativos de suelos veracruzanos con una concentración de 60 propágulos viables por gramo de producto (Trejo *et al.* 2021).

Evaluación del porcentaje de colonización micorrízica

Se realizaron colectas de raíces en los estadíos V7 y VT (40 y 80 días después de la siembra respectivamente) a una profundidad de 10 cm en la periferia de la zona radicular excluyendo raíces gruesas (diámetro > 3 mm). Las raíces colectadas fueron lavadas con agua corriente y se conservaron en agua y alcohol (1:1 v/v, Bagyaraj y Stürmer 2012). Posteriormente, se sometieron a un proceso de clareo y tinción siguiendo la técnica modificada de Philips y Hayman (1970). El porcentaje de colonización (% cm) fue cuantificado mediante el método de gradiente de intersección descrito por Giovannetti y Mosse (1980), utilizando la siguiente fórmula:

$$\% \text{ cm} = \left(\frac{\text{Número total de intersecciones con raíces micorrizadas}}{\text{número total de intersecciones entre la raíz y las líneas de la cuadrícula}} \right) * 100$$

Cuantificación de antocianidinas y flavonoides en grano

Se realizó la cosecha de cada parcela experimental y las mazorcas procedentes de las plantas seleccionadas se separaron en bolsas plásticas debidamente rotuladas. Las mazorcas se

deshidrataron mediante secado al aire hasta conseguir un 14% de humedad, posteriormente se desgranaron manualmente y las semillas se almacenaron en sobres de papel previamente identificados, según el protocolo de CIMMYT (2012). Posteriormente, se elaboró una muestra compuesta con los granos, la cual fue molida para su procesamiento.

Lo granos molidos y tamizados a 100 μm fueron extraídos con 90 mL de metanol al 70% y 10 mL de HCl 1N, según el método de Abdel-Aal y Hucl (1999), modificado ex profeso para este trabajo. Dicha modificación consistió en que posterior al tamizado y previo a la extracción metanólica, se realizó un ablandamiento de la muestra con agua a 95° por 5 minutos. El coeficiente de extinción molar para cianidina-3-glucósido de 25 965 $\text{cm}^{-1} \text{M}^{-1}$ a se obtuvo utilizando la siguiente ecuación: $\varepsilon = A/CL$, a una longitud de onda de 535 nm. La concentración de antocianidinas se calculó utilizando un patrón de cianidina-3-glucósido, utilizando la siguiente formula:

$$C = \frac{(A * PM * 1000 * Vol * 1000)}{\varepsilon * \text{peso de muestra de maíz}}$$

Donde C = concentración (en mg Kg^{-1}); A = absorbancia; ε = absortividad molar de cianidina 3-glucósido (25 965 $\text{cm}^{-1} \text{M}^{-1}$); Vol. = volumen inicial del extracto utilizado; y PM = peso molecular de cianidina 3-glucósido (449 g M^{-1}).

La cuantificación de flavonoides totales se realizó mediante la técnica de cloruro de aluminio (Gupta 2013), modificada para el presente trabajo, para la cual se realizó la extracción de 10 g de maíz molido y tamizado a 100 μm , con un volumen de 30 mL de etanol al 90% en agua, utilizando agitación continua a 350 RPM durante 24 horas; el extracto se filtró y se tomaron 300 μL en tubos de ensayo; se agregaron 80 μL de solución de nitrito de sodio al 5%, la mezcla se incubó durante 5 minutos; (4) a continuación, se adicionaron 80 μL de solución de tricloruro de aluminio al 10% y se incubó a temperatura ambiente por un minuto; se añadieron 500 μL de una solución de hidróxido de sodio 1M y se mezcló hasta homogeneizar (6) se realizó la lectura de absorbancia en un espectrofotómetro UV a 450 nm, utilizando como blanco agua destilada, contrastando con un patrón de catequina tratado de la misma manera. Este procedimiento se realizó para 5 muestras de cada bloque, totalizando 15 muestras por tratamiento. La concentración se calculó como catequina con la siguiente formula:

$$C = \frac{A * PM * Vol}{\varepsilon}$$

Donde: C = la concentración (mg mL^{-1}); A = absorbancia; ε = absortividad molar (catequina = 2 211.000 $\text{cm}^{-1} \text{M}^{-1}$); Vol = volumen inicial del extracto utilizado; PM peso molecular de catequina (290 g M^{-1}). Finalmente, se referenciaron a la masa de grano de maíz usada.

Análisis estadístico

Los datos obtenidos se analizaron mediante análisis de varianza (ANOVA) para cada variedad de maíz, los resultados significativos se comprobaron a través de la prueba HSD de Tukey y comprobación de supuestos, Shapiro-Wilk para normalidad, Levene para homogeneidad de varianzas y Estadístico de Durbin-Watson para independencia. El nivel de significancia considerado para todas las pruebas fue de 0.05.

La captura y tabulación de los datos se realizó mediante el software Microsoft Excel®, el análisis estadístico se llevó a cabo a través de los softwares estadísticos R y su interfaz gráfica RStudio®, finalmente, la elaboración de gráficos se hizo con Minitab® 14.1.

RESULTADOS

Las tres variedades de maíces nativos inoculadas alcanzaron porcentajes de colonización micorrízica superiores a los observados en los tratamientos sin inocular. Las plantas de estos últimos también presentaron colonización radical, atribuida a la presencia de propágulos nativos de HMA en el suelo del sitio experimental, con una densidad de 12×10^{-3} propágulos g^{-1} . En las plantas inoculadas, se observó un incremento progresivo del porcentaje de colonización conforme avanzaron las etapas vegetativas. En la etapa fenológica V7, todas las variedades inoculadas registraron valores por encima del 50%, y al llegar la etapa VT se registraron valores superiores al 70%. Sin embargo, solo en la etapa VT se observaron diferencias significativas en la colonización entre tratamientos inoculados y no inoculados. La variedad Amarillo inoculada presentó el mayor porcentaje de colonización con un 87.95% (Figura 1) y alcanzó una diferencia porcentual de 64.47% respecto de su tratamiento testigo (ANI). La variedad Negro inoculado (NI) también mostró una colonización superior a la observada en el tratamiento sin inocular. La variedad Rojo registró la mayor diferencia porcentual de colonización entre tratamientos con un 94.29%.

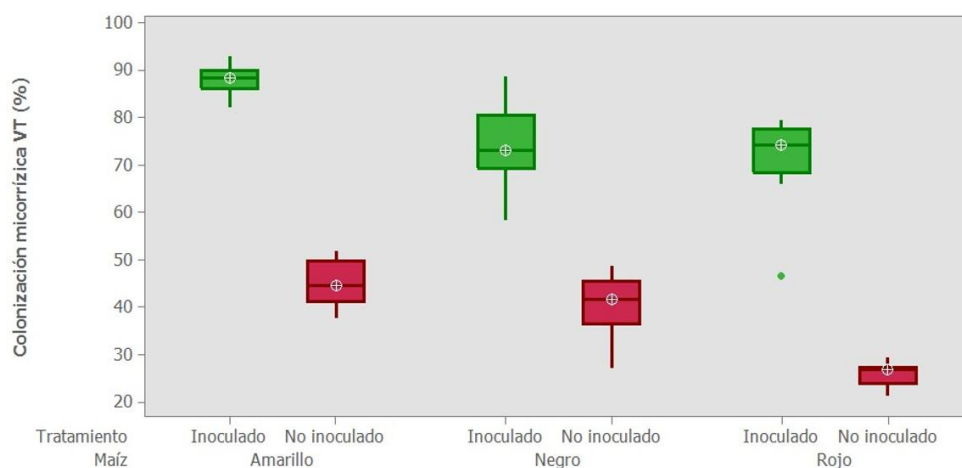


Figura 1. Evaluación de colonización micorrízica en etapa VT ($p < 0.05$).

Únicamente las variedades Amarillo y Negro mostraron una correlación positiva entre la etapa vegetativa y el porcentaje de colonización micorrízica (coeficiente de 0.93) en tratamientos inoculados y sin inocular. La variedad Amarillo inoculada presentó la mayor diferencia porcentual de colonización micorrízica entre etapas con 33.9%. La variedad Rojo no inoculada mostró una disminución en el grado de colonización al alcanzar la etapa VT registrando una diferencia porcentual negativa (-0.19%).

La micorrización generó respuestas diferenciales en la concentración de flavonoides (expresado como catequina) y antocianinas monoméricas (expresado como cianidina 3-glucósido, C3G) en las

tres variedades de maíz. Aunque ambos compuestos fenólicos comparten una parte de la ruta de biosíntesis, no se encontró una correlación significativa entre ellos (coeficiente de correlación de 0.569). Las tres variedades de maíz presentaron una mayor concentración de C3G en los tratamientos inoculados en comparación con los no inoculados (Figura 2).

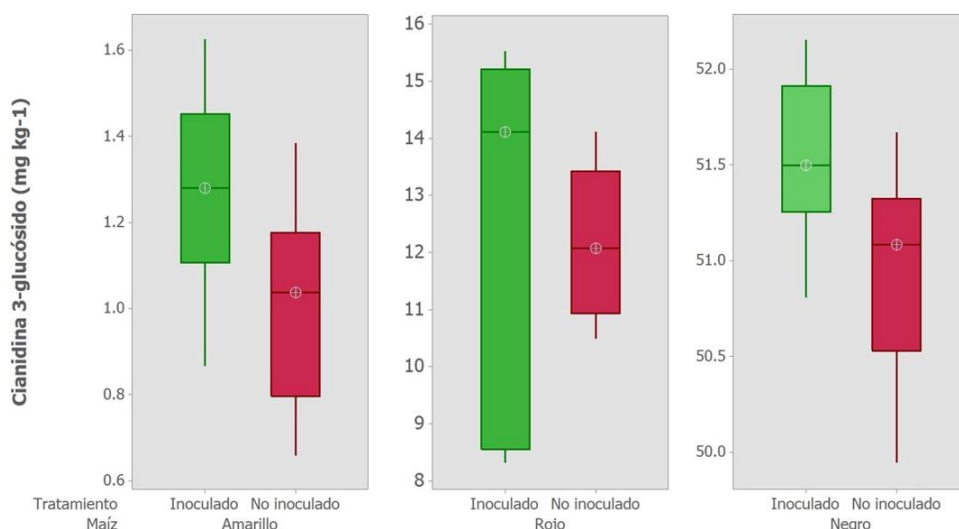


Figura 2. Evaluación de cianidina 3-glucósido en granos de maíz ($p < 0.05$).

En la variedad Amarillo, el tratamiento inoculado mostró un aumento estadísticamente significativo del 24% en el contenido de C3G, con una concentración promedio de 125 mg kg⁻¹ comparado con los 105.0 mg kg⁻¹ del tratamiento control. Por su parte, la variedad Negro inoculado presentó la mayor concentración de antocianinas entre las variedades estudiadas (512.6 mg kg⁻¹) y un incremento del 9.65% en el contenido de catequina en comparación con el maíz negro no inoculado. En la variedad Rojo, no se observaron diferencias estadísticas en el contenido de C3G entre los tratamientos inoculados y no inoculados, pero sí registró diferencias estadísticas en el contenido de catequina (Figura 3).

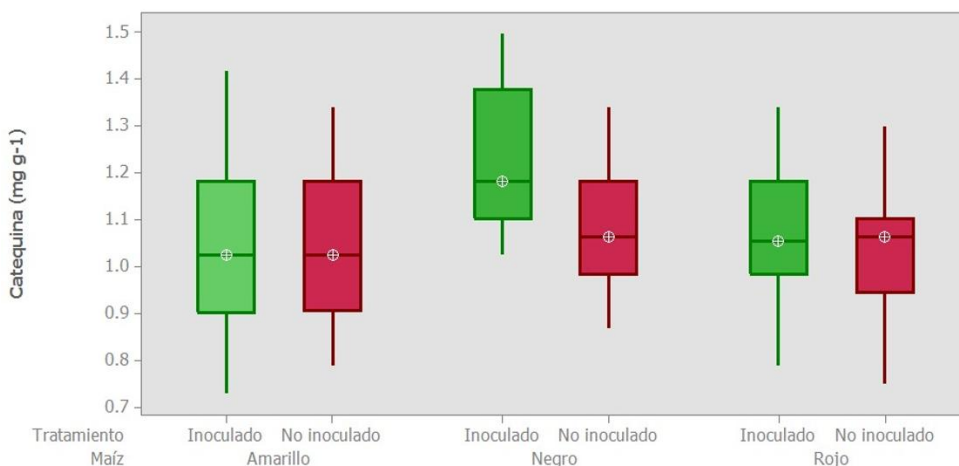


Figura 3. Evaluación de flavonoides (eq. de catequina) en granos de maíz ($p < 0.05$).

DISCUSIÓN

Se observó una variación en la respuesta de los maíces nativos a la micorrización en raíz y al contenido de polifenoles en granos. La inoculación con HMA fue altamente eficiente para establecer la simbiosis en comparación con los hongos micorrízicos arbusculares nativos presentes en el sitio. Los porcentajes de colonización registrados en las plantas inoculadas superaron los reportados recientemente para algunos maíces nativos inoculados con HMA (Ramírez-Silva *et al.* 2022, Quiñones-Aguilar *et al.* 2023). No obstante, los elevados valores de colonización micorrízica, la respuesta no fue homogénea, encontrándose diferencias significativas entre tratamientos inoculados. Se sabe que existe una gran diversidad funcional de especies de HMA que condiciona el establecimiento de la simbiosis con la planta hospedera (Guigard *et al.* 2023), las diferencias aquí encontradas, pueden estar relacionadas con la variación genética y especificidad ecológica de ambos simbioses. Es posible que la variación en el porcentaje de micorrización se deba a la alta diversidad de especies del inóculo (consorcio de 12 especies locales) (Trejo *et al.* 2021), lo que habría generado que las distintas variedades de maíz no se asociaran con el mismo ensamble de especies de HMA. Se sabe que las especies de HMA difieren ampliamente en sus estrategias para colonizar las raíces de las plantas y que los genotipos de maíz pueden asociarse con distintas especies de micosimbiontes (Sangabriel-Conde *et al.* 2015, Londoño *et al.* 2020), por lo tanto, es factible que la variedad que registró mayor colonización (Amarillo) esté asociada con HMA más eficientes para colonizar tempranamente y crecer rápido dentro de las raíces, y aquellas con menor colonización (Negro y Rojo) estén asociadas con micosimbiontes de colonización más lenta y mayor demanda de recursos a la planta hospedera (Camenzind *et al.* 2024). Por ejemplo, algunas especies del género *Acaulospora* presentes en el consorcio utilizado han sido reportadas como altamente eficientes (*A. scrobiculata*) o poco eficientes (*A. morrowiae*, *A. spinosa*) para favorecer el desarrollo de la planta hospedera. Futuras investigaciones podrían enfocarse en evaluar la eficacia de especies individuales o en identificar combinaciones específicas de HMA óptimas para cada variedad de maíz.

También se observó una variabilidad en la concentración de catequina y antocianinas monoméricas entre las tres variedades de maíz, pero con una tendencia a una mayor concentración en las variedades inoculadas con HMA, mostrando por primera vez que la simbiosis micorrízica tiene un efecto en la producción de metabolitos secundarios en maíces nativos. Algunos estudios han mostrado que las diferencias genéticas entre variedades de maíz nativo pueden generar concentraciones distintas de dichos metabolitos, por ejemplo, genotipos de maíz de grano púrpura han registrado mayores concentraciones de fenoles totales, flavonoides y proantocianidinas, maíces amarillos presentan mayor contenido de carotenoides y maíces rojos se destacan por un mayor contenido de tocoles totales (Suriano *et al.* 2021, Feregrino-Pérez *et al.* 2024). En este estudio los maíces de color negro y amarillo registraron las mayores concentraciones de antocianinas monoméricas cuando se inocularon con HMA. Es probable que este resultado esté relacionado con los altos porcentajes de colonización y una mayor producción de estrigolactonas. Se sabe que las estrigolactonas están directamente relacionadas con la colonización micorrízica (Kodama *et al.* 2022) y que existen genes que regulan su biosíntesis en maíz (Chachar *et al.* 2024), los cuales podrían estar relacionados con la síntesis de antocianinas (Charnikhova *et al.* 2017). Por lo tanto, es posible que a mayores concentraciones de estrigolactonas la planta genere un mayor contenido de

antocianinas, esto se ha documentado en otras especies vegetales (An *et al.* 2024). Si bien existen numerosos estudios que reportan el efecto de los HMA en la producción de compuestos fenólicos en plantas de interés agrícola (Torres *et al.* 2019, Nacoon *et al.* 2023, Ge *et al.* 2025), poco se ha reportado sobre los cambios en la concentración de dichos compuestos en variedades maíz (Silva *et al.* 2019) y hasta el momento no existen reportes del efecto de la micorrización en el contenido de compuestos fenólicos en los granos de maíces nativos.

Se considera que el maíz es una planta con elevada respuesta a la micorrización, particularmente en suelos agrícolas, y diversos trabajos muestran diferencias en dicha respuesta entre genotipos de maíz (desarrollo, rendimiento, asimilación de nutrientes, tolerancia a estrés, producción de metabolitos secundarios (Ma *et al.* 2020, Pérez-Luna y Álvarez 2021, Islam *et al.* 2023, Pierre *et al.* 2023). En este trabajo también se encontraron diferencias en la acumulación de productos fenólicos, y es posible que dichas diferencias se relacionen también con factores genéticos o fisiológicos, entre ellos la regulación de la vía biosintética de estos pigmentos modificada por la simbiosis micorrízica. Algunos estudios han mostrado que la expresión de genes clave en la biosíntesis de antocianinas puede variar entre razas de maíz, favoreciendo una mayor producción en aquellas de pigmentación oscura (Jiang *et al.* 2023) y, experimentos con líneas mutantes, han encontrado que ciertos alelos en maíces negros promueven una mayor activación de genes involucrados en esta ruta metabólica en comparación con maíces de menor pigmentación. También, algunas investigaciones han reportado un aumento en la acumulación de estos compuestos en frutos de plantas micorrizadas, atribuyéndolo a una regulación del metabolismo secundario. Por ejemplo, Torres *et al.* (2019) encontraron que en plantas de *Vitis vinifera*, la micorrización influye en la producción de antocianinas mediante la regulación del ácido abscísico. De manera similar en *Cyamopsis tetragonoloba* se ha observado que la inoculación con HMA promueve la síntesis de antocianinas y poliaminas, sugiriendo una conexión metabólica entre estas rutas biosintéticas.

En esta investigación, no solo se incrementó la concentración de antocianinas monoméricas, también la cantidad de catequina fue mayor en los granos de maíz inoculado con HMA, lo que indica un efecto positivo de la simbiosis micorrízica en la producción de ambos compuestos. El incremento en la concentración de compuestos fenólicos en granos de maíces nativos en simbiosis con HMA podría potenciar los beneficios que dichos granos confieren a la salud humana y a la salud animal cuando se usan como forraje (Eng-Khoo *et al.* 2017). Se sabe que los compuestos fenólicos poseen importantes propiedades como la actividad antioxidante, antiviral, antitumoral y antiinflamatoria, con implicaciones benéficas en la salud cardiovascular, en la función neurológica o incluso en la prevención del cáncer (Gao *et al.* 2025). En este contexto, la inoculación micorrízica podría ser una alternativa para el cultivo de variedades de maíz nativo con una mayor concentración de compuestos fenólicos en los granos.

CONCLUSIONES

Los resultados muestran que la inoculación con HMA induce una respuesta diferencial en términos de colonización radicular y acumulación de compuestos fenólicos, en función de la variedad de maíz nativo. Este estudio sugiere que la inoculación micorrízica arbuscular puede ser una

herramienta útil para mejorar la calidad nutracéutica del maíz nativo, particularmente en variedades pigmentadas, y destaca la necesidad de integrar enfoques genéticos, metabólicos y ecológicos en las investigaciones de campo para optimizar los beneficios de esta simbiosis en sistemas agrícolas diversos.

AGRADECIMIENTOS

Se agradecen las facilidades otorgadas por el Laboratorio de Organismos Benéficos y el Laboratorio de Química de la Facultad de Ciencias Agrícolas para el procesamiento de muestras.

CONFLICTO DE INTERÉS

Los autores declaran que no tienen intereses en competencia.

LITERATURA CITADA

- Abdel-Aal ES, Hucl P (1999) A rapid method for quantifying total anthocyanins in blue aleurone and purple pericarp wheats. *Cereal Chemistry* 76(3): 350-354. <https://doi.org/10.1094/CCHEM.1999.76.3.350>
- Alappat B, Alappat J (2020) Anthocyanin pigments: Beyond aesthetics. *Molecules* 25(23): 5500. <https://doi.org/10.3390/molecules25235500>
- An JP, Zhao L, Cao YP, Ai D, Li MY, You CX, Han Y (2024) The SMXL8-AGL9 module mediates crosstalk between strigolactone and gibberellin to regulate strigolactone-induced anthocyanin biosynthesis in apple. *Plant Cell* 36(10): 4404-4425. <https://doi.org/10.1093/plcell/koae191>
- Bagyaraj J, Stürmer S (2012) Hongos micorrizógenos arbusculares (HMA). En: Moreira F, Huising E, Bignell D (eds) *Manual de biología de suelos tropicales*. Instituto Nacional de Ecología. México. pp. 217-241.
- Barrera-Guzmán L, Legaria J, Ortega-Paczka R (2020) Diversidad genética en poblaciones de razas mexicanas de maíz. *Revista Fitotecnica Mexicana* 43(1): 121. <https://doi.org/10.35196/rfm.2020.1.121>
- Caballero-García MA, Córdova-Téllez L, López-Herrera ADJ (2019) Validación empírica de la teoría multicéntrica del origen y diversidad del maíz en México. *Revista Fitotecnica Mexicana* 42(4): 357-366
- Camenzind T, Aguilar-Trigueros CA, Heuck MK, Maerowitz-McMahan S, Rillig MC, Cornwell WK, Powell JR (2024) Progressing beyond colonization strategies to understand arbuscular mycorrhizal fungal life history. *New Phytologist* 244(3): 752-759. <https://doi.org/10.1111/nph.20090>
- Castillo-Nonato J (2016) Conservación de la diversidad del maíz en dos comunidades de San Felipe del Progreso, Estado de México. *Agricultura, Sociedad y Desarrollo* 13(2): 217-235.
- CIMMYT (2012) *Manual de determinación de rendimiento*. Centro Internacional de Mejoramiento de Maíz y Trigo. Texcoco, México. 36p.
- Chachar Z, Lai R, Ahmed N, Lingling M, Chachar S, Paker NP, Qi Y (2024) Cloned genes and genetic regulation of anthocyanin biosynthesis in maize, a comparative review. *Frontiers in Plant Science* 15: 1310634. doi: 10.3389/fpls.2024.1310634
- Charnikhova TV, Gaus K, Lumbroso A, Sanders M, Vincken JP, De Mesmaeker A, Ruyter-Spira CP, Screpanti C, Bouwmeester HJ (2017) Zealactones. Novel natural strigolactones from maize. *Phytochemistry* 137: 123-131. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.phytochem.2017.02.010>

- Eng-Khoo HE, Azlan A, Tang ST, Lim SM (2017) Anthocyanidins and anthocyanins: colored pigments as food, pharmaceutical ingredients, and potential health benefits. Review. Food & Nutrition Research 61(1361779): 1-21. <https://doi.org/10.1080/16546628.2017.1361779>
- Feregrino-Pérez AA, Mercado-Luna A, Murillo-Cárdenas CA, González-Santos R, Chávez-Servín JL, Vargas-Madriz AF, Luna-Sánchez E (2024) Polyphenolic compounds and antioxidant capacity in native maize of the Sierra Gorda of Querétaro. Agronomy 14(1): 142. <https://doi.org/10.3390/agronomy14010142>
- Gao F, Yang P, Wang W, Wang K, Zhao L, Wang Y, Liao X (2025) Unveiling the multifaceted roles of anthocyanins: a review of their bioavailability, impacts on gut and system health, and industrial implications. Current Research in Food Science 11: 101137. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.crfs.2025.101137>
- Ge S, Zhang Z, Hu Q, Wang Q, Gong X, Huang F, Zhang L, Han W, Luo F, Li X (2025) Metabolomics analysis reveals crucial effects of arbuscular mycorrhizal fungi on the metabolism of quality compounds in shoots and roots of *Camellia sinensis* L. Plant Physiology and Biochemistry 219: 109426. <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2024.109426>
- Giovannetti M, Mosse B (1980) An evaluation of techniques for measuring vesicular arbuscular mycorrhizal infection in roots. New Phytologist 84: 489-500.
- Guigard L, Jobert L, Busset N, Moulin L, Czernic P (2023) Symbiotic compatibility between rice cultivars and arbuscular mycorrhizal fungi genotypes affects rice growth and mycorrhiza-induced resistance. Frontiers in Plant Science 14: 1278990. <https://doi.org/10.3389/fpls.2023.1278990>
- Guo G, Wang Y, Zhang B, Yu H, Li L, Cao G, Yang K (2024) Comparative transcriptomic and metabolomic analysis reveals mechanisms of selenium-regulated anthocyanin synthesis in waxy maize (*Zea mays* L.). Frontiers in Plant Science 15: 1466756. <https://doi.org/10.3389/fpls.2024.1466756>
- Gupta D (2013) Comparative analysis of spices for their phenolic content, flavonoid content and antioxidant capacity. American International Journal of Research in Formal, Applied and Natural Sciences 4(1): 38-42.
- Islam AT, Ullah H, Himanshu SK, Tisarum R, Cha-um S, Datta A (2023) Efectos interactivos de silicio y hongos micorrícicos arbusculares en el crecimiento, rasgos fisio-bioquímicos y rendimiento de mazorcas de maíz bebé bajo estrés salino. Silicon 15(10): 4457-4471.
- Jiang Y, Yang L, Xie, H, Qin L, Wang L, Xie X, Zhou H, Tan X, Zhou J, Cheng W (2023) Metabolomics and transcriptomics strategies to reveal the mechanism of diversity of maize kernel color and quality. BMC Genomics 24: 194. <https://doi.org/10.1186/s12864-023-09272-x>
- Kato TA, Mapes C, Mera LM, Serratos JA, Bye RA (2009) Origen y diversificación del maíz: una revisión analítica. Universidad Nacional Autónoma de México, Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad. México. 116p.
- Khoo HE, Azlan A, Tang ST, Lim SM (2017) Anthocyanidins and anthocyanins: Colored pigments as food, pharmaceutical ingredients, and the potential health benefits. Food and Nutrition Research 61(1): 1361779. <https://doi.org/10.1080/16546628.2017.1361779>
- Kodama K, Rich MK, Yoda A, Shimazaki S, Xie X, Akiyama K, Mizuno Y, Komatsu A, Luo Y, Suzuki H, Kameoda H, Libourel C, Keller J, Sakakibara K, Nishiyama T, Nakagawa T, Mashiguchi K, Uchida K, Yoneyama K, Tanaka Y, Yamaguchi S, Shimamura M, Dalaux PM, Nomura T, Kyojuka J (2022) An ancestral function of strigolactones as symbiotic rhizosphere signals. Nature Communications 13(1): 3974. <https://doi.org/10.1038/s41467-022-31708-3>
- Lao F, Sigurdson GT, Giusti MM (2017) Health benefits of purple corn (*Zea mays* L.) phenolic compounds. Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety 16(2): 234-246. <https://doi.org/10.1111/1541-4337.12249>

- Li T, Zhang W, Yang H, Dong Q, Ren J, Fan H, Zhang X, Zhou Y (2019) Comparative transcriptome analysis reveals differentially expressed genes related to the tissue-specific accumulation of anthocyanins in pericarp and aleurone layer for maize. *Scientific Reports* 9: 2485. <https://doi.org/10.1038/s41598-018-37697-y>
- Londoño DM, Meyer E, da Silva KJ, González Hernández A, de-Armas RD, Pinto-de-Macedo Soares LC, Stürmer SL, Nodari RO, Fonsêca-Sousa-Soares CR, Lovato PE (2020) Root colonization and arbuscular mycorrhizal fungal community composition in a genetically modified maize, its non-modified isolate, and a landrace. *Mycorrhiza* 30(5): 611-621. <https://doi.org/10.1007/s00572-020-00969-5>
- Ma J, Wang W, Yang J, Qin S, Yang Y, Sun C, Pei G, Zeeshan M, Liao H, Liu X, Chen F (2020) Flavonoids improve maize resistance to *Fusarium verticillioides* by inhibiting fumonisin biosynthesis. *Environmental Microbiology* 22(12): 5202-5218. <https://doi.org/10.1111/1462-2920.15290>
- Mannino G, Gentile C, Ertani A, Serio G, Berteà CM (2021) Anthocyanins: Biosynthesis, distribution, ecological role, and use of biostimulants to increase their content in plant foods—A review. *Agriculture* 11(3): 212. <https://doi.org/10.3390/agriculture11030212>
- Nacoon S, Seemakram W, Ekprasert J, Theerakulpisut P, Sanitchon J, Kuyper TW, Boonlue S (2023) Arbuscular mycorrhizal fungi enhance growth and increase concentrations of anthocyanin, phenolic compounds, and antioxidant activity of black rice (*Oryza sativa* L.). *Soil Systems* 7(2): 44. <https://doi.org/10.3390/soilsystems7020044>
- Naing AH, Kim CK (2021) Abiotic stress-induced anthocyanins in plants: Their role in tolerance to abiotic stresses. *Physiologia Plantarum* 172(3): 1711-1723. <https://doi.org/10.1111/ppl.13373>
- Nurtiana W (2019) Anthocyanin as natural colorant: A review. *Food Science Journal* 1(1): 1. <https://doi.org/10.33512/fsj.v1i1.6180>
- Peniche-Pavía HA, Guzmán TJ, Magaña-Cerino JM, Gurrola-Díaz CM, Tiessen A (2022) Maize flavonoid biosynthesis, regulation, and human health relevance: A review. *Molecules* 27(16): 5166. <https://doi.org/10.3390/molecules27165166>
- Pérez-Luna YC, Álvarez SJD (2021) Efecto de la aplicación de biofertilizantes sobre el rendimiento de maíz en parcelas con y sin cobertura vegetal. *Idesia* 39(4): 29-38. <https://doi.org/10.4067/S0718-34292021000400029>
- Philips JM, Hayman DS (1970) Improved procedure for declaring and staining parasitic and VAM fungi for rapid assessment of infection. *Transactions British Mycol. Society* 55: 158-161. [http://dx.doi.org/10.1016/S0007-1536\(70\)80110-3](http://dx.doi.org/10.1016/S0007-1536(70)80110-3)
- Pierre F, Castro FJA, Rodríguez IY, Colbert RW, Rosas JC (2023) Respuesta de variedades criollas y mejoradas de maíz a la fertilización e inoculación con hongos micorrizas-arbusculares en un suelo de baja fertilidad. *Ceiba* 56(2): 70-89.
- Quiñones-Aguilar EE, Hernández-Hernández C, Rincón-Enríquez G, López-Pérez L, Lobit P, Enríquez-Vara JN (2023) Arbuscular mycorrhizal fungi influence on growth of creole maize and larval development of *Spodoptera frugiperda* (Lepidoptera: Noctuidae). *The Southwestern Entomologist* 26(2). <https://doi.org/10.56369/tsaes.4279>
- Rabanal-Atalaya M, Medina-Hoyos A (2021) Análisis de antocianinas en el maíz morado (*Zea mays* L.) del Perú y sus propiedades antioxidantes. *Terra Latinoamericana* 39: 1-12. e808. <https://doi.org/10.28940/terra.v39i0.808>
- Ramírez-Silva J, Ramírez-Jaramillo G, Lozano-Contreras M (2022) Bio-fertilization effect on the foliar content of nitrogen (N), phosphorus (P) and potassium (K) of two QPM maize varieties in two Luvisols of Yucatan, Mexico. *OALib* 9: 1-11. <https://doi.org/10.4236/oalib.1109069>

- Sachdev S, Ansari SA, Ansari MI, Fujita M, Hasanuzzaman M (2021) Abiotic stress and reactive oxygen species: Generation, signaling, and defense mechanisms. *Antioxidants* 10(2): 277. <https://doi.org/10.3390/antiox10020277>
- Salinas-Moreno Y, Santillán-Fernández A, de la Torre IA, Ramírez-Díaz JL, Ledesma-Miramontes A, Martínez-Ortiz MA (2024) Physical traits and phenolic compound diversity in maize accessions with blue-purple grain (*Zea mays* L.) of mexican races. *Agriculture* 14(4): 564. <https://doi.org/10.3390/agriculture14040564>
- Sangabriel-Conde W, Maldonado-Mendoza IE, Mancera-López ME, Cordero-Ramírez JD, Trejo-Aguilar D, Negrete-Yankelevich S (2015) Glomeromycota associated with Mexican native maize landraces in Los Tuxtlas, Mexico. *Applied Soil Ecology* 87: 63-71. <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2014.10.017>
- Sasaki R, Nishimura N, Hoshino H, Isa Y, Kadowaki M, Ichi T, Tanaka A, Nishiumi S, Fukuda I, Ashida H, Horio F, Tsuda T (2007) Cyanidin 3-glucoside ameliorates hyperglycemia and insulin sensitivity due to downregulation of retinol binding protein 4 expression in diabetic mice. *Biochemical Pharmacology* 74(11): 1619-1627. <https://doi.org/10.1016/j.bcp.2007.08.008>
- Silva FA, Maia LC, Silva, FSB (2019) Arbuscular mycorrhizal fungi as biotechnology alternative to increase concentrate of secondary metabolites in *Zea mays* L. *Brazilian Journal of Botany* 42(1): 189-193. <https://doi.org/10.1007/s40415-018-0508-2>
- Šimura JN, Beebo A, Herdean A, Aboalizadeh J, Šíroká J, Moritz T, Novák O, Ljung K, Schoefs B, Spetea C (2017) Enhanced secondary- and hormone metabolism in leaves of arbuscular mycorrhizal *Medicago truncatula*. *Plant Physiology* 175(1): 392-411. <https://doi.org/10.1104/pp.16.01509>
- Stürmer SL, Kemmelmeier K (2021) The glomeromycota in the neotropics. *Frontiers in Microbiology* 11: 553679. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2020.553679>
- Suriano S, Balconi C, Valoti P, Redaelli R (2021) Comparison of total polyphenols, profile anthocyanins, color analysis, carotenoids and tocopherols in pigmented maize. *LWT – Food Science and Technology* 144: 111257. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2021.111257>
- Torres N, Hilbert G, Antolín MC, Goicoechea N (2019) Amino acids and flavonoids profiling in Tempranillo berries can be modulated by the arbuscular mycorrhizal fungi. *Plants* 8(10): 400. <https://doi.org/10.3390/plants8100400>
- Trejo D, Hernández-Acosta E, Baeza-Guzmán Y, Pérez-Toledo G, Morgado-Viveros E, Bañuelos J (2021) Efectividad de los hongos micorrízicos arbusculares introducidos y nativos en seis leguminosas coberteras. *Scientia Fungorum* 51: e1320. <https://doi.org/10.33885/sf.2021.51.1320>
- Xue H, Zhao J, Wang Y, Shi Z, Xie K, Liao X, Tan J (2024) Factors affecting the stability of anthocyanins and strategies for improving their stability: A review. *Food Chemistry: X* 24: 101883. <https://doi.org/10.1016/j.fochx.2024.101883>