

VARIABILIDAD FENOTÍPICA Y EFECTO DE LA FERTILIZACIÓN EN LA ASOCIACIÓN MICORRÍZICA DE LÍNEAS DE MAÍZ EN LA ZONA NÚCLEO

Casabuena F²; Banducci E²; Fariña, L²; Copia P¹; Farroni AE¹²; Lorea RD¹²

¹Estación Experimental Agropecuaria Pergamino, INTA, Buenos Aires, Argentina

²Universidad Nacional del Noroeste de la Provincia de Buenos Aires, Pergamino, Buenos Aires.

ficasabuena@comunidad.unnoba.edu.ar; banduccieli98@gmail.com;

leandrofarina@unnoba.edu.ar; copia.pablo@inta.gob.ar; farroni.abel@inta.gob.ar;

lorea.roberto@inta.gob.ar

PHENOTYPIC VARIABILITY AND FERTILIZATION EFFECTS ON MYCORRHIZAL ASSOCIATION IN MAIZE LINES OF THE CORE REGION

Maize production depends heavily on chemical fertilizers, generating environmental and economic challenges. This study evaluated the symbiotic capacity of 20 maize inbred lines from INTA Pergamino in Pergamino and Junín under unfertilized and chemically fertilized conditions, quantifying hyphal, arbuscular, and vesicular colonization. Junín's sandier soils favored greater AMF colonization, while chemical fertilization significantly reduced mycorrhizal association. Significant genotypic variability was detected for all fungal structures, with moderate broad-sense heritability for hyphae and arbuscules (46.65%–63%). Lines such as LP08001 and LP2518 showed stable colonization across fertilization levels. These results highlight the combined influence of environment, management, and host genetics on AMF association and provide a basis for identifying genotypes with high and stable mycorrhizal affinity for breeding maize adapted to sustainable agricultural systems.

Palabras Clave: maíz, micorrizas, simbiosis, fertilización – Keywords: maize, mycorrhizal, symbiosis, fertilization

Introducción

El incremento sostenido en la productividad del cultivo de maíz en la región centro del país ha sido impulsado por el perfeccionamiento de las prácticas de manejo y el mejoramiento genético. Sin embargo, la brecha detectada entre los rendimientos actuales y los alcanzables —atribuible en gran medida a deficiencias en macronutrientes como nitrógeno y fósforo— ha fomentado un esquema de producción altamente dependiente de fertilizantes químicos (Reussi Calvo et al., 2025).

A pesar de los beneficios productivos, el uso intensivo de fertilizantes químicos enfrenta desafíos económicos y ambientales (Centeno, 2021). Ante este panorama, ha cobrado fuerza la investigación de herramientas biológicas que promuevan una agricultura más sustentable.

En este contexto, la simbiosis con hongos micorrícicos arbusculares (HMA) emerge como una alternativa promisorio ya que puede mejorar la eficiencia en la captura de nutrientes minerales como fósforo, nitrógeno y potasio (Allen y Shachar, 2009). El proceso de colonización se desarrolla a través de estructuras intrarradicales: las hifas, que inician la penetración cortical; los arbusculos, que constituyen el sitio

principal de intercambio de nutrientes y fotoasimilados; y las vesículas, que funcionan como reservorios de lípidos y carbohidratos (Valdés et al., 2020).

La capacidad del maíz para establecer esta asociación se encuentra condicionada por factores ambientales, el manejo nutricional y el genotipo del cultivo. Dado esta característica posee un componente genético aditivo heredable, es factible integrarla en programas de mejoramiento para la obtención de híbridos con alta afinidad micorrízica (Paganini, 2023). El objetivo de este trabajo fue evaluar la variabilidad en la asociación simbiótica con HMA de 20 líneas del programa de mejoramiento de INTA Pergamino en distintos ambientes del norte de Buenos Aires bajo dos niveles de fertilización química.

Materiales y métodos

Se evaluaron 20 líneas endocriadas de maíz pertenecientes al programa de mejoramiento de la EEA Pergamino de INTA. Estos genotipos presentan orígenes diversos y ciclos de madurez que varían entre intermedios y completos, abarcando materiales desarrollados a lo largo de los últimos 60 años del programa (Tabla 1).

Tabla 1: Líneas del programa de mejoramiento de la EEA INTA de Pergamino evaluadas en el trabajo, clasificadas por su pedigree y año de liberación al mercado.

ID	PEDIGREE	AÑO	ID	PEDIGREE	AÑO
LP921	(LP918 x 1934)F2	2020	LP2542	Comp. BS13	2000
LP2518	(LP2542xLP918)F2-DH	2020	LP4703	Comp. Prolífico	2006
LP567	(LP561xLP564)F2	2019	LP116	Comp. Argentino Caribe	1993
LP12001	Sint. líneas tolerante DS	2024	LP509	Comp. BSSS x Cuarentín	1997
LP08001	Comp. dentado 3.3.B	2019	LP199	Comp. II	1993
LP923	F2 de híbridos com.	2011	LP304	Sint. de híbridos Pionner	1996
LP1212	F2 de híbridos com.	2017	P465	Derivada de pob. nativa flint	1962
LP564	(LP562xLP581)F2	2010	ZN6	Derivada de pob. flint	1962
LP122-2	Comp. Argentino Caribe	2001	P21	Derivada de pob.	1965
LP661	(LP662xLP611)F ₂	2008	P1338	Derivada de pob. flint	1965

Sint.: sintética; Comp.: compuesto; pob.: población.

El ensayo se llevó a cabo durante la campaña 2024/25 en dos localidades. Pergamino: Estación Experimental Agropecuaria INTA, sobre un suelo Argiudol típico con rotación soja/trigo-soja/maíz. Junín: Campo Experimental “Las Magnolias” (Agustín Roca), sobre un suelo Hapludol típico con antecesor soja.

Se empleó un diseño en parcelas subdivididas con tres repeticiones. La parcela principal correspondió a la localidad, la subparcela a los niveles de fertilización y la sub-subparcela al genotipo. Los tratamientos fueron los siguientes: sin fertilización (SF) y con fertilización (CF), este último mediante la aplicación de 200 kg/ha de urea y 150 kg/ha de fosfato monoamónico a la siembra. La unidad experimental se conformó por dos surcos de 5 metros con una densidad de 7,2 plantas/m². Los ensayos fueron sembrados el 14 de Noviembre de 2024 en Pergamino y el 18 de Diciembre del mismo año en el Campo Experimental “Las Magnolias”.



50 AÑOS
PENSANDO
EL FUTURO

XIII
CONGRESO
NACIONAL
DE MAÍZ

Se colectaron las raíces (hasta una profundidad de 25-30 cm) de dos plantas representativas por parcela en los estadios V6-V8 (Ritchie et al., 1986). Para la visualización de las estructuras fúngicas, se aplicó la técnica de tinción de Phillips y Hayman (1970) modificada. La cuantificación se realizó mediante el método de McGonigle et al. (1990), determinando el porcentaje de colonización de tres estructuras: hifas (H), arbuscúlos (A) y vesículas (V) (Figura 1).

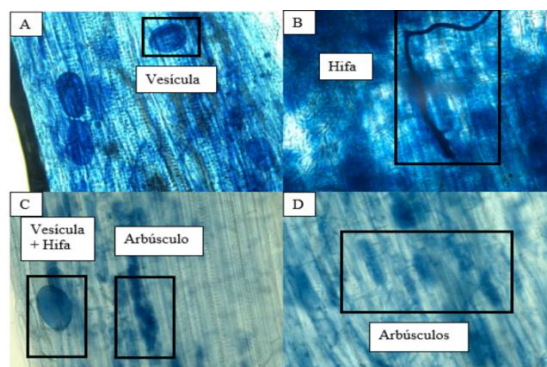


Figura 1: Micrografías de raíces de maíz en la que se observan vesículas (a), hifas (b), vesículas, hifas y arbuscúlos (c) y arbuscúlos (d)

Los datos se procesaron utilizando un Modelo Lineal Mixto (MLM) y el test de comparación de medias D GC ($\alpha=0,05$) usando el software Infostat (Di Rienzo et al., 2010). Asimismo, se estimó la heredabilidad en sentido amplio (H^2) para cada estructura micorrícica.

Resultados

El análisis de los componentes de varianza reveló que la interacción triple genotipo, tratamiento y localidad fue significativa para las variables de estudio H (p valor= 0,0009), A (p valor= 0,0062) y V (p valor<0,0001), lo que motivó el análisis segregado por localidad.

Porcentaje de hifas: en Junín, se encontraron efectos significativos para los niveles de fertilización (p valor= 0,0126) y altamente significativos para los genotipos (p valor= 0,0093), mientras que su interacción no fue significativa (p valor= 0,2419). Las parcelas SF mostraron, en promedio, un 50% más de colonización que CF. Los genotipos destacados por su mayor asociación fueron LP2518 y LP08001, mientras que P1338 y ZN6 presentaron los valores más bajos (figura 2a).

En Pergamino, todos los efectos fueron altamente significativos (p valor del genotipo<0,0001; p valor del tratamiento= 0,0013; p valor de la interacción= 0,0009). La ausencia de fertilizante químico incrementó la colonización en un 150% en comparación con el tratamiento fertilizado. Bajo condiciones de fertilización, la línea LP199 fue la más destacada, mientras que sin fertilización P1338 presentó la mayor micorrización (figura 2b).

Porcentaje de arbuscúlos: en Junín, se observaron efectos altamente significativos únicamente para el factor genotipo (p valor= 0,0016), sin detectarse diferencias significativas entre medias con el test de comparación utilizado. Las parcelas SF presentaron valores superiores a las CF en solo un 25% y no resultó



50 AÑOS
PENSANDO
EL FUTURO

XIII
CONGRESO
NACIONAL
DE MAÍZ

estadísticamente significativo (p valor= 0,0525). Las líneas P465 y LP304 exhibieron la mayor formación de arbúsculos (Figura 3a).

En Pergamino, los efectos del tratamiento fueron significativos (p valor= 0,107) y los efectos de genotipo y la interacción fueron altamente significativos (p valores<0,0001). Las parcelas sin fertilización presentaron un 160% más de arbúsculos que las fertilizadas. La línea LP567 se destacó en el tratamiento CF, mientras que P1338 lideró en el tratamiento SF (Figura 3b).

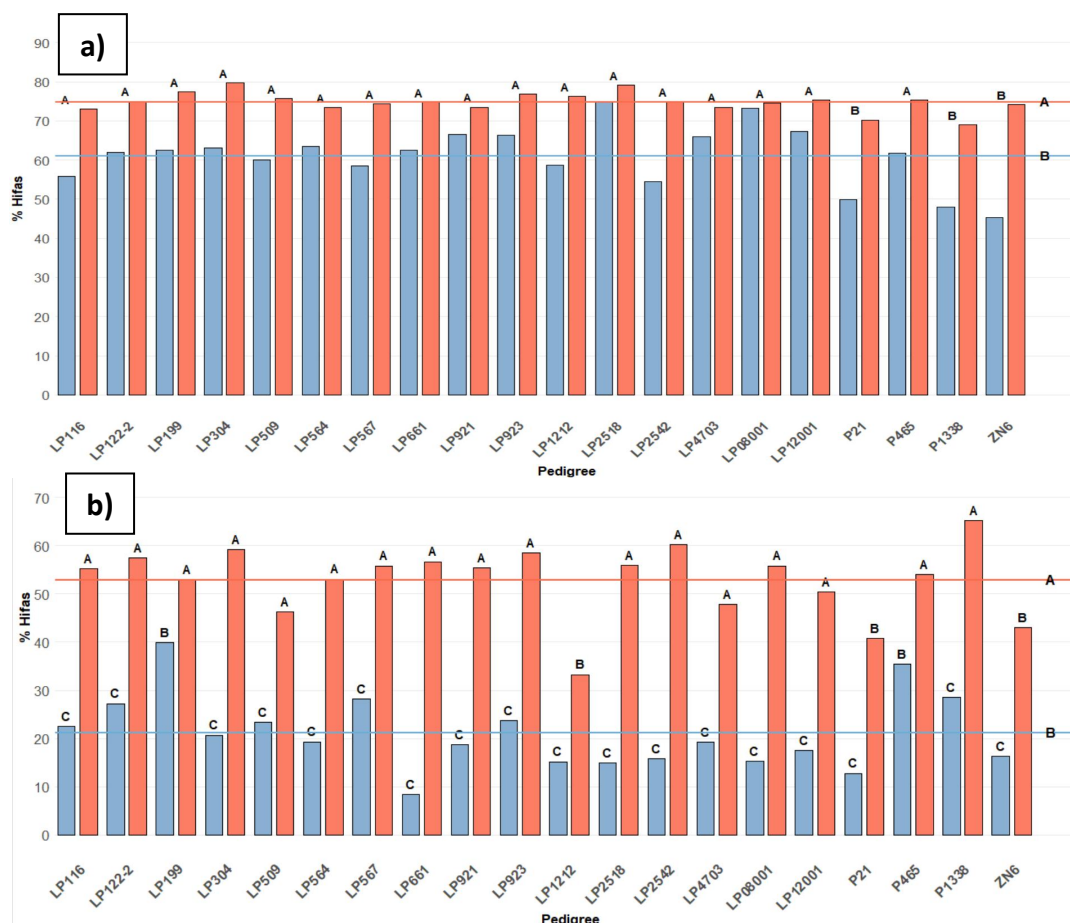


Figura 2: Porcentaje de hifas por genotipo bajo dos niveles de fertilización en la localidad de Junín (a) y Pergamino (b). Línea azul corresponde al promedio de CF y roja a SF. Letras distintas indican diferencias significativas ($p < 0,05$).

Porcentaje de vesículas: en Junín, los efectos del tratamiento fueron significativos (p valor= 0,0155) y los efectos de genotipo y la interacción fueron altamente significativos (p valores<0,0001). El tratamiento SF superó al CF en un 96%. La línea LP661 presentó la mayor asociación en SF, mientras que LP08001 fue la superior en CF (Figura 4a).

Por su parte, en Pergamino los efectos fueron altamente significativos para las tres fuentes de variación (p valor tratamiento= 0,0055; p valores genotipo e interacción<0,0001). Además, la diferencia entre tratamientos fue más drástica, con un incremento del 300% en las parcelas SF. La línea LP2518 mostró los valores más altos sin fertilización, mientras que LP509 destacó en condiciones de fertilización (Figura 4b).



50 AÑOS
PENSANDO
EL FUTURO

XIII
CONGRESO
NACIONAL
DE MAÍZ

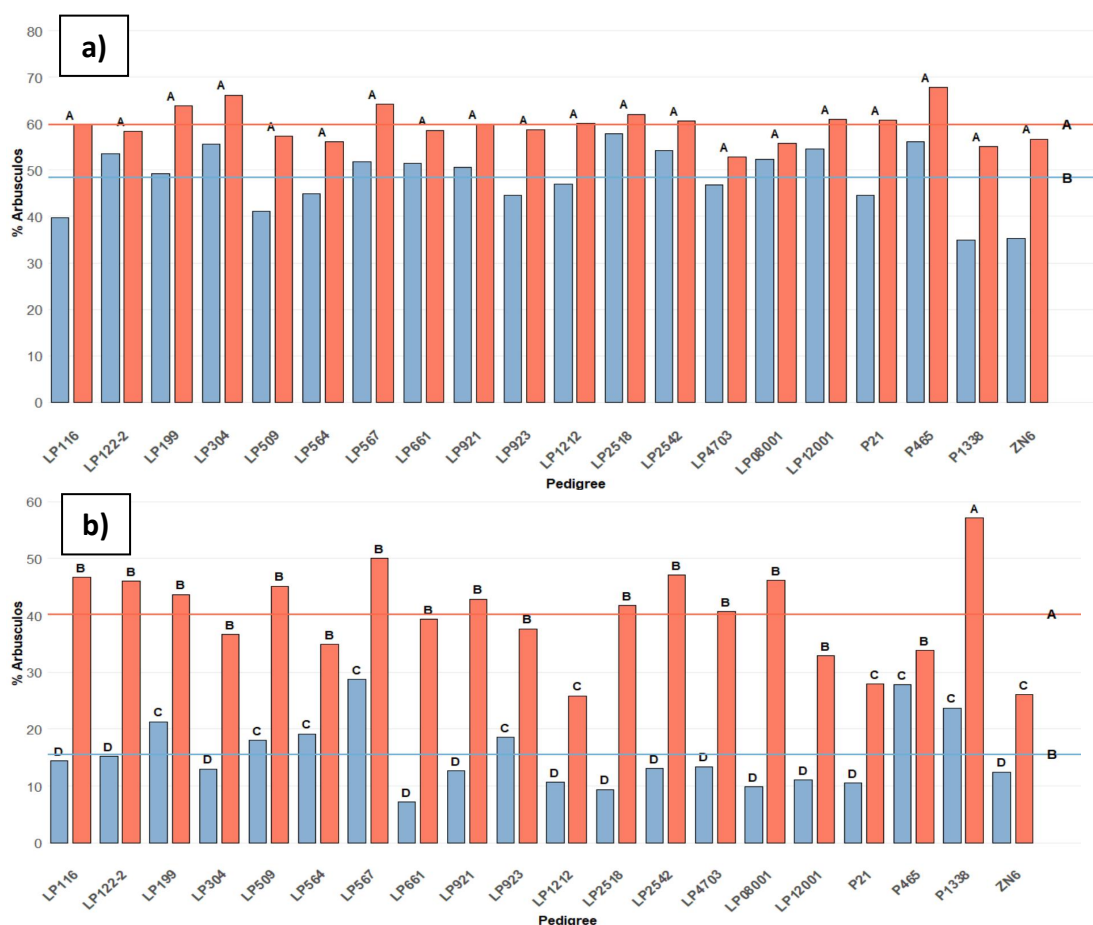


Figura 3: Porcentaje de arbusculos por genotipo con y sin fertilización en la localidad de Junín (a) y Pergamino (b). Línea azul corresponde al promedio de CF y roja a SF. Letras distintas indican diferencias significativas ($p < 0,05$).

Al analizar todas las variables en conjunto se detectó una correlación positiva y significativa entre las tres estructuras, siendo mayor la relación entre H y A (R^2 0,96) que entre estas y las V (con H: R^2 0,38 y con A: R^2 0,28).

En cuanto a la estabilidad del comportamiento frente a HMA, LP08001 y LP2518 (en Junín) y LP199 (en Pergamino) mantuvieron niveles de colonización constantes frente a la fertilización, mientras que líneas como ZN6 y LP661 resultaron poco estables.

Finalmente, la heredabilidad en sentido amplio (H^2) para H y A presentó valores moderados (46,65% - 63%) en ambas localidades. En contraste, V mostró una heredabilidad baja, especialmente en Junín (4,53%), sugiriendo una fuerte influencia ambiental sobre esta estructura de reserva.



50 AÑOS
PENSANDO
EL FUTURO

XIII
CONGRESO
NACIONAL
DE MAÍZ

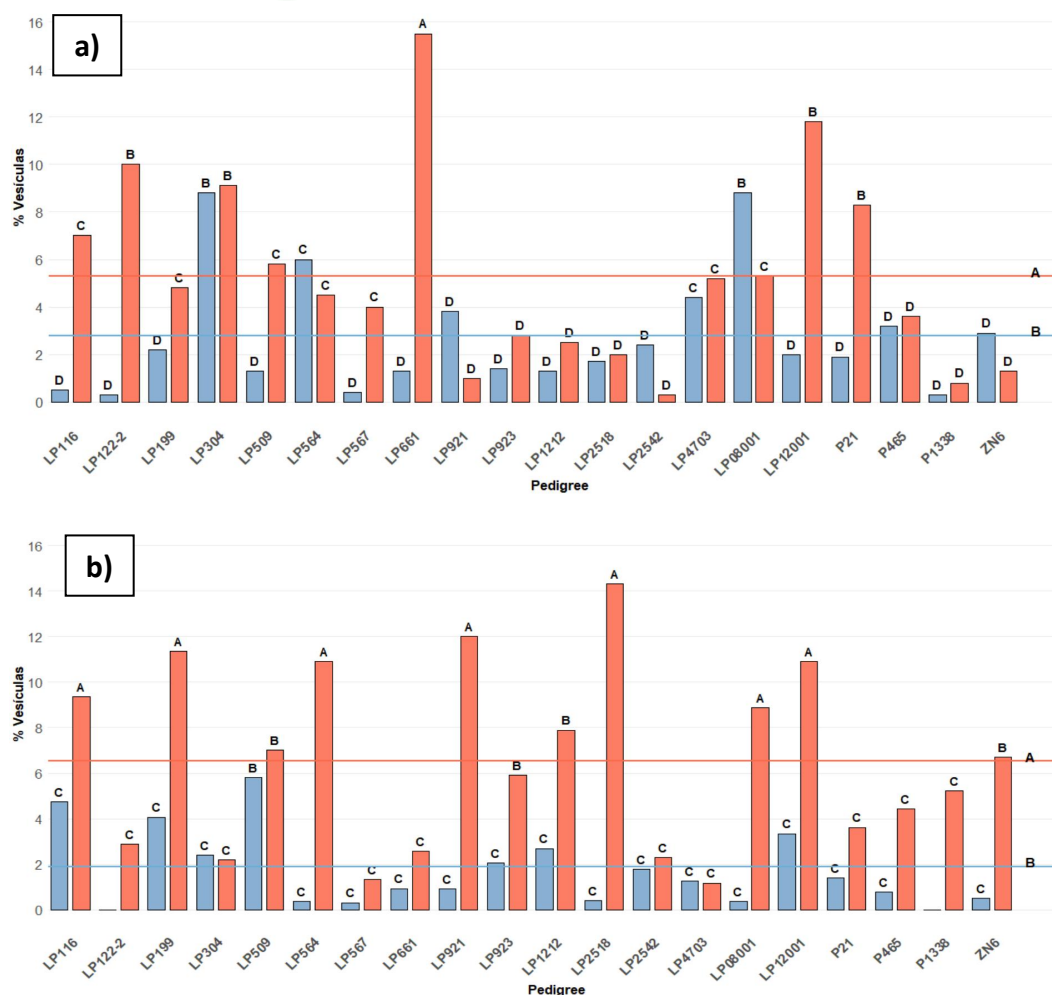


Figura 4: Porcentaje de vesículas por genotipo con y sin fertilización en la localidad de Junín(a) y Pergamino (b). Línea azul corresponde al promedio de CF y roja a SF. Letras distintas indican diferencias significativas ($p < 0,05$).

Discusión

Los valores promedio de porcentaje de hifas y arbuscúlos fueron mayores en la localidad de Junín que en Pergamino. Además, en Junín fue menos marcada la diferencia entre los tratamientos con y sin fertilización química, no encontrándose diferencias significativas para el porcentaje de colonización por arbuscúlos. Los valores superiores en Junín podrían explicarse por lo comunicado por Talaei et al. (2022), quien encontró una correlación positiva entre el porcentaje de arena del suelo y el grado de colonización micorrícica. Los suelos Hapludoles de Junín, al ser más arenosos, poseen mayor aireación y porosidad, condiciones que favorecen el desarrollo fúngico según Saif (1981). Por el contrario, la mayor impedancia mecánica y disponibilidad de nutrientes de los Argiudoles arcillosos de Pergamino podrían inhibir la simbiosis, ya sea por estrés mecánico en las raíces o por una menor dependencia de la planta hacia el hongo para la captura de recursos. Carrenho et al. (2007) sostiene que el alto contenido de arcilla ejerce un efecto inhibitorio sobre el desarrollo micorrícico.

La tendencia a encontrar mayores porcentajes de estructuras micorrícicas en ausencia de fertilización química es consistente con los resultados de Paganini (2023),

Gaset (2024) y Gun (2025). Este fenómeno se explica porque, ante una alta disponibilidad inmediata de nutrientes (especialmente fósforo), las plantas evitan el costo energético de suministrar fotoasimilados al hongo. Mientras que bajo deficiencia nutricional, las raíces incrementan la secreción de exudados y señales pre-simbióticas. Tawaraya et al. (1998) determinó que bajas concentraciones de fósforo aumentan la fracción hidrofóbica de los exudados radicales, potenciando la asociación. Entre estos señalizadores se destacan las estrigolactonas, cuya síntesis aumenta en condiciones de estrés nutricional para actuar como atractores de los HMA, facilitando la colonización posterior según Zhou et al. (2025).

Encontramos una variabilidad significativa entre las líneas evaluadas para todas las estructuras fúngicas, lo que confirma que la capacidad de asociación está influenciada por la genética del hospedante, en línea con lo hallado por Berger y Gutjahr(2021). No se observó una relación clara entre la antigüedad de las líneas y su capacidad de micorrización; genotipos antiguos y modernos mostraron comportamientos contrastantes. Esto respalda lo planteado por Chu et al. (2013), quienes concluyeron que los procesos de selección modernos no necesariamente afectan de forma negativa la capacidad simbiótica del maíz, probablemente porque el mejoramiento se enfocó en caracteres con baja correlación con la micorrización.

La heredabilidad moderada para hifas y arbuscúlos (46,65% - 63%) refuerza la posibilidad de seleccionar genotipos con alta afinidad micorrícica en programas de mejoramiento. En cambio, la baja heredabilidad de las vesículas, especialmente en Junín (4,53%), indica que su formación como estructuras de reserva depende mayoritariamente de factores ambientales que afectan la biosíntesis y el suministro de carbohidratos hacia el hongo, tal como sugieren Valdés et al. (2020).

Finalmente, la identificación de líneas con colonización consistente frente a la fertilización química es un aporte clave para el desarrollo de híbridos adaptados a sistemas de producción más sustentables.

Conclusiones

El grado de asociación entre el maíz y los HMA es el resultado de una interacción compleja entre el ambiente, el manejo nutricional y el genotipo del hospedante.

Las características físicas y químicas de los suelos Hapludoles típicos como el de Junín favorecen una mayor colonización por hifas y arbuscúlos en comparación con los Argiudoles de Pergamino.

En relación al manejo agronómico, el uso de fertilizantes químicos reduce significativamente la simbiosis, lo que demuestra la capacidad de la planta para regular el grado de asociación según sus necesidades nutricionales.

Finalmente, la identificación de una amplia variabilidad genética en las líneas de INTA Pergamino y de genotipos con alta estabilidad frente a la fertilización abre perspectivas promisorias para el mejoramiento genético, permitiendo la selección y el desarrollo de híbridos más eficientes en el aprovechamiento de la simbiosis con los hongos del suelo.

Apoyo Financiero



50 AÑOS
PENSANDO
EL FUTURO

XIII
CONGRESO
NACIONAL
DE MAÍZ

La presente investigación se enmarca en el proyecto SIB 5896/2024 de la UNNOBA y contó además con apoyo financiero de INTA a través del CVT INTA Semilleros.

Referencias bibliográficas

- Allen JW, Shachar-Hill Y: Sulfur transfer through an arbuscular mycorrhiza. *Plant Physiol* 2009, 149:549-560.
- Berger, F.; Gutjahr, C. 2021. Factors affecting plant responsiveness to arbuscular mycorrhiza. *Plant Physiology*, 20, 26-34.
- Carrenho, R.; Trufem, S.; Bononi, V.; Silva, E. 2007. The effect of different soil properties on arbuscular mycorrhizal colonization of peanuts, sorghum and maize. *Acta Botanica Brasílica*, 21, 723-730.
- Centeno, R. (2021). Uso de fertilizantes y daños ambientales. TSI LifeScience by TECNOSOLUCIONES.
- Chu, Q.; Wang, X.; Yang, Y.; Chen, F.; Zhang, J.; Feng, G. 2013. Mycorrhizal responsiveness of maize (*Zea mays* L.) genotypes as related to releasing date and available P content in soil. *Mycorrhiza*, 23, 497-505.
- Di Rienzo, J.A.; Balzarini, M.; Gonzalez, L.; Casanoves, F.; Tablada, M.; Walter Robledo, C. 2010. InfoStat: software para análisis estadístico. Catie. Universidad Nacional de Córdoba, Argentina.
- Gaset, B. (2024). Efecto de la fertilización de largo plazo con fósforo y nitrógeno en las comunidades de hongos formadores de micorrizas arbusculares asociadas al cultivo de maíz. [Tesis de Maestría, Universidad de Buenos Aires. Facultad de Agronomía. Escuela para Graduados].
- Gun, G.A. 2025. Cuantificación de hongos micorrícicos arbusculares en raíces de maíz con diferentes cultivos de cobertura como antecesores. Universidad Nacional del Noroeste de la Provincia de Buenos Aires, Pergamino.
- McGonigle, T.P.; Miller, M.H.; Evans, D.G.; Fairchild, G.L.; Swan, J.A. 1990. A new method which gives an objective measure of colonization of roots by vesicular-arbuscular mycorrhizal fungi. *New Phytologist*, 115, 495-501.
- Paganini, R.L. 2023. Componentes genéticos involucrados en la asociación de las raíces de maíz con hongos micorrícicos arbusculares en ambientes con diferentes contenidos de nitrógeno. Universidad Nacional del Noroeste de la Provincia de Buenos Aires, Pergamino.
- Phillips, J.M.; Hayman, D.S. 1970. Improved procedures 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.
- Reussi Calvo, N.I.; Diovisalvi, N.; Inchauspe, M.N.; García, G.O. (2025). Las claves de la fertilización en maíz. Fertilizar- Asociación Civil.
- Ritchie, S.W.; Hanway, J.J.; Benson, G.O. 1986. How a corn plant develops. Special Report No. 48. Iowa State University of Science and Technology.
- Saif, Saifur Rahman. (1981). The influence of soil aeration on the efficiency of vesicular-arbuscular mycorrhizae. 1. Effect of soil oxygen on the growth and mineral uptake of *Eupatorium odoratum* L. inoculated with *Glomus macrocarpus*. *New Phytologist - NEW PHYTOL.* 88. 649-659.
- Talaei, F.; Sadravi, M.; Adhami, E. 2022. Correlation between arbuscular mycorrhiza in wheat and physicochemical characteristics of soil. *Plant pathology science*, 11, 32-41.
- Tawaraya, K.; Hashimoto, K.; Wagatsuma, T. 1998. Effect of root exudate fractions from P-deficient and P-sufficient onion plants on root colonisation by the arbuscular mycorrhizal fungus *Gigaspora margarita*. *Mycorrhiza*, 8, 67-70.
- Valdés, F.E.; Abarca, C.; Colombo, R.P.; Silvani, V.A. 2020. Micorrizas arbusculares: Biología y aplicación en el sector agro-forestal. Editorial de la UNLP, La Plata.
- Zhou, Q.; Niu, C.; Feng, L. 2025. Chemistry and Chemical Biology Tools Contributing to the Discovery and Functional Characterization of Strigolactones. *Frontiers in Plant Science*, 16, 1618437.

