INTERACCIÓN ENTRE HONGOS MICORRÍCICOS ARBUSCULARES Y FERTILIZACIÓN NITROGENADA SOBRE LAS EMISIONES DE N_2O Y EL DESEMPEÑO DEL CULTIVO DE MAÍZ.

Roncayoli, T.[1]; Poza, J.[1]; Echarte, L. [2,3]; Muñoz, S. [2]; Lewczuk, N. [2,3*]

[1]Colegio San José, Balcarce; [2]IPADS (CONICET-EEA INTA Balcarce); [3]Facultad de Ciencias Agrarias, UNMdP
*lewczuk.nuria@inta.gob.ar

INTERACTION BETWEEN ARBUSCULAR MYCORRHIZAL FUNGI AND NITROGEN FERTILIZATION ON N_2O EMISSIONS AND MAIZE CROP PERFORMANCE.

Abstract
Nitrogen fertilisation increases maize productivity, but it also contributes to emissions of nitrous oxide (N_2O), one of the main greenhouse gases produced by agriculture. Arbuscular mycorrhizal fungi (AMF) have been proposed as a strategy to mitigate these emissions; however, there is little evidence from field trials. The aim of this study was to evaluate the effect of AMF inoculation and nitrogen fertilisation, and their interaction, on N_2O emissions, root biomass and maize yield. A split-plot trial was conducted with two fertilisation levels (−N and +N), two inoculation levels (−AMF and +AMF) and three replicates. N_2O emissions were determined using static chambers throughout the crop cycle, and the average emission rate, cumulative emissions and emission intensity were calculated. AMF inoculation reduced N_2O emission intensity by approximately 34%, without significantly affecting maize yield. In contrast, cumulative N_2O emissions were not significantly affected by AMF, although they showed a decreasing trend, while the response of the average emission rate depended on nitrogen fertilization. These results indicate that AMF inoculation can improve the environmental efficiency of maize production by reducing the amount of N_2O emitted per unit of grain produced, even when changes in cumulative emissions or crop yield are not individually significant.

Palabras clave: Hongos micorrícicos arbusculares; óxido nitroso; intensidad de emisión; fertilización nitrogenada; maíz.

Keywords: Arbuscular mycorrhizal fungi; nitrous oxide emissions; emission intensity; nitrogen fertilization; maize.

Introducción

El nitrógeno (N) constituye uno de los principales factores que limitan la productividad del cultivo de maíz. Sin embargo, cuando su disponibilidad excede la capacidad de absorción del cultivo, aumenta la fracción de N susceptible a pérdidas hacia el ambiente mediante lixiviación, volatilización y desnitrificación, reduciendo la eficiencia de uso del fertilizante. Entre estas pérdidas, las emisiones de óxido nitroso (N_2O) representan una de las principales preocupaciones ambientales debido a que este gas posee un potencial de calentamiento global de aproximadamente 273 veces superior

al del CO_2 y constituye una de las principales fuentes de gases de efecto invernadero provenientes de la agricultura (IPCC, 2021).

Los hongos micorrícicos arbusculares (HMA) establecen asociaciones simbióticas con la mayoría de las especies cultivadas favoreciendo la adquisición de agua y nutrientes. Además, pueden modificar la dinámica de N en el sistema suelo-planta y la actividad de las comunidades microbianas involucradas en los procesos de nitrificación y desnitrificación (Bender et al., 2014; Storer et al. 2018; Li et al. 2023), por lo que han sido propuestos como una estrategia potencial para mitigar las emisiones de N_2O.

Estudios bajo condiciones controladas han mostrado reducciones de estas emisiones asociadas con una mayor captación de N por el cultivo y menor disponibilidad de sustrato para los microorganismos productores de N_2O (Bender et al. 2014; Li et al. 2023). Sin embargo, la respuesta depende del contexto nutricional y ambiental, y la evidencia en condiciones de campo continúa siendo limitada.

En este contexto, resulta necesario evaluar simultáneamente la respuesta de las emisiones de N_2O y el desempeño del cultivo frente a la inoculación con HMA bajo diferentes niveles de fertilización. El objetivo de este trabajo fue evaluar el efecto de la inoculación con HMA y de la fertilización nitrogenada, así como su interacción, sobre la dinámica e intensidad de las emisiones de N_2O, junto con la biomasa radical y el rendimiento de un cultivo de maíz desarrollado en condiciones de campo.

Materiales y métodos

Sitio experimental

El experimento se realizó durante la campaña agrícola 2025/2026 en la Unidad Integrada Balcarce (37º45' S; 58º18' O, Buenos Aires, Argentina), sobre un cultivo de maíz (DK7272) conducido en secano. La siembra se realizó manualmente el 20 de noviembre de 2025, a una densidad de 68700 plantas ha^{-1}.

Previo al establecimiento del ensayo se caracterizó el horizonte superficial del suelo (0-10 cm), determinándose pH, materia orgánica, fósforo extractable (P-Bray), nitrógeno anaeróbico (Nan), nitrato y sulfato. El suelo presentó un pH ligeramente ácido (5,81 – 6,25), un contenido de materia orgánica entre 5,15 y 5,38%, fósforo extractable entre 72 y 81 mg kg^{-1}, Nan entre 56 y 90 mg kg^{-1}, nitrato entre 45 y 105 mg kg^{-1} y sulfatos entre 4,5 y 6,9 mg kg^{-1}.

Durante la campaña se registraron condiciones más cálidas y secas que las normales (1991-2020), con 42,4% menos precipitación y 8,1 % mayor ETP acumulada (Tabla 1).

Tabla 1. Condiciones meteorológicas durante la campaña 2025/2026 respecto de las normales climáticas (1991–2020).

Variable	Unidad	Mediana 1991–2020	Campaña 2025/2026	Diferencia	Anomalía
Precipitación acumulada	mm	451,8	260,1	-191,6	-42,4 %
Temperatura media	°C	19,3	20,1	0,8	+0,8 °C
ETP acumulada	mm	602,0	650,8	48,8	+8,1 %

Diseño experimental

Se utilizó un diseño en parcelas divididas con tres bloques completos al azar. La fertilización nitrogenada (N) constituyó la parcela principal y la inoculación con hongos micorrícicos arbusculares (HMA) la subparcela. Los tratamientos fueron: -N/-HMA; -N/+HMA; +N/-HMA y +N/+HMA, totalizándose doce unidades experimentales (4 tratamientos x 3 bloques). La inoculación se realizó el 3 de diciembre de 2025 en V2, mediante la aplicación de 3 mL planta^{-1} de una suspensión con aproximadamente 30 esporas viables, preparada por el INBIOTEC (CONICET), con micropipeta directamente sobre la zona radical de las plantas correspondiente al tratamiento +HMA. La fertilización nitrogenada consistió en la aplicación de 200 kg N ha^{-1}, en el estadio de 6 hojas desarrolladas (V6; Ritchie y Hanway, 1982), el 19 de diciembre de 2025.

Mediciones de emisiones de N_2O

Las emisiones de N_2O se determinaron mediante cámaras estáticas ventiladas (Clough et al., 2020), en once fechas durante el ciclo, intensificando la frecuencia después de la fertilización. Las muestras se recolectaron a los 0, 15, 30 y 45 minutos posteriores al cierre de las cámaras y se analizaron por cromatografía gaseosa con detector de captura electrónica. Las tasas de emisión se calcularon por regresión lineal o por la ecuación planteada por Hutchinson y Mosier (1981) y se estimó la emisión acumulada por integración trapezoidal. Simultáneamente, se determinaron el porcentaje de poros llenos de agua (%PPLA), contenido de nitrato (NO_3^-) y amonio (NH_4^+) y la temperatura del suelo (ºC) a 0-10 cm (Figura 2). A partir de los flujos instantáneos se calcularon la tasa media de emisión, la emisión acumulada y la intensidad de emisión, expresada como g N_2O-N t $^{-1}$ de grano.

Variables productivas

Al finalizar el cultivo se cuantificaron biomasa radical (g m^{-2}), número y peso de granos y el rendimiento (t ha^{-1}). Las raíces fueron muestreadas hasta 40 cm de profundidad mediante cuatro submuestras por planta siguiendo la metodología de Frasier et al. (2016).

Análisis estadístico

La dinámica temporal de las emisiones de N_2O se analizó mediante modelos lineales mixtos. Las variables integradas (tasa media de emisión, emisión acumulada, intensidad de emisión, biomasa radical y variables productivas) se evaluaron mediante modelos lineales mixtos, considerando la fertilización nitrogenada, la inoculación con HMA y su interacción como efectos fijos, y el bloque como efecto aleatorio. Las comparaciones de medias se realizaron mediante emmeans. Todos los análisis se realizaron utilizando R versión 4.2.0 (R Core Team, 2022). Se consideró un nivel de significancia de $\alpha = 0,05$ y tendencias estadísticas cuando $0,05 \leq p < 0,10$.

Resultados

Dinámica de las emisiones de N_2O

Los mayores flujos de N_2O se registraron durante las primeras fechas del período de evaluación, con un marcado pulso inmediatamente posterior a la aplicación de urea en las parcelas +N (Figura 1). En -N las emisiones se concentraron principalmente durante los primeros siete días del período de evaluación, mientras que en +N el mayor pulso ocurrió inmediatamente después de la aplicación de urea. A partir de los 28 DPF, las emisiones permanecieron bajas y sin pulsos de magnitud comparable a los observados al inicio del período. Durante el período de evaluación, la temperatura del

suelo disminuyó progresivamente, mientras que el %PPLA presentó valores mínimos entre aproximadamente 20 y 40 DPF (Figura 2A, B). Las concentraciones de NO_3^- y NH_4^+ mostraron variaciones a lo largo del período de evaluación, con diferencias temporales entre los tratamientos de fertilización (Figura 2C, D).

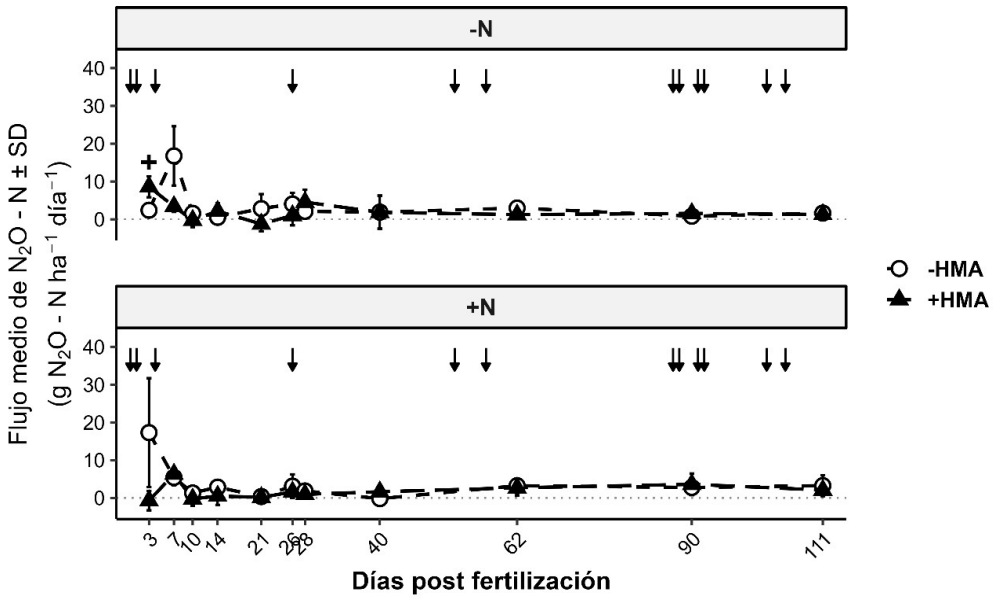

Figura 1. Evolución temporal de los flujos de N_2O-N en parcelas con hongos micorrícicos arbusculares (+HMA) y no inoculadas (−HMA), bajo ausencia (−N) y presencia (+N) de fertilización nitrogenada. Los puntos representan la media ± desvío estándar (n = 3). Las flechas indican eventos de precipitación (> 5mm).

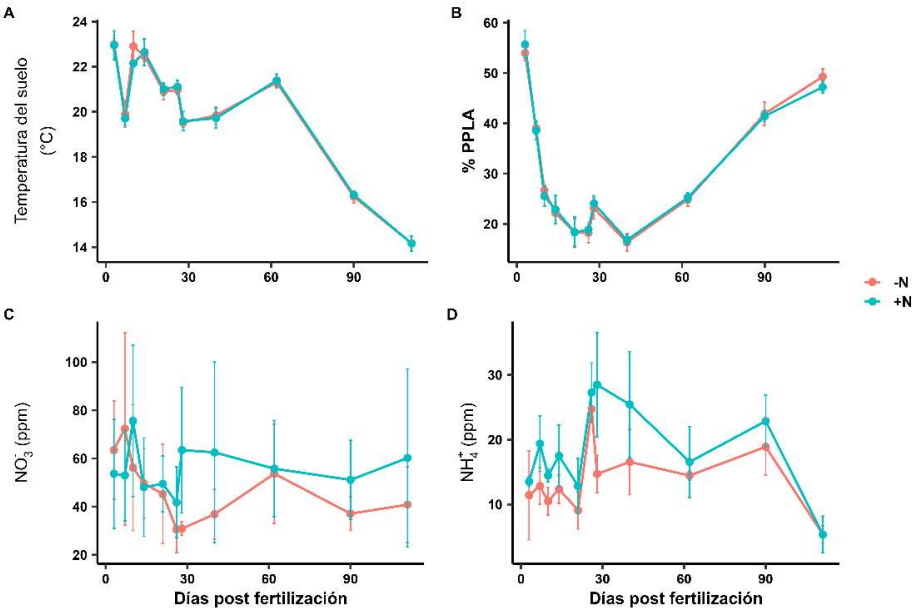

Figura 2. Evolución de las condiciones edáficas durante el período de evaluación del cultivo de maíz en función de los días post fertilización (DPF): (A) temperatura del suelo (°C), (B) porcentaje de poros llenos de agua (%PPLA), (C) concentración de nitrato (NO_3^-; ppm) y (D) concentración de amonio (NH_4^+; ppm). Los tratamientos corresponden a parcelas sin fertilización nitrogenada (−N) y con fertilización nitrogenada (+N). Los puntos representan valores medios y las barras de error el desvío estándar.

Los indicadores integrados mostraron respuestas diferentes según la variable analizada (Figura 3; Tabla 2). La tasa media presentó una interacción N x HMA (p = 0,006): bajo +N, la inoculación redujo la tasa media de emisión (p = 0,038), mientras que bajo -N no se detectaron diferencias (p = 0,20, Figura 3A). Las emisiones acumuladas no fueron afectadas por N (p = 0,943) ni por la interacción (p = 0,802), aunque tendieron a disminuir con HMA (p = 0,097, Figura 3B). La inoculación con HMA redujo la intensidad de emisión en ambos niveles de fertilización (p = 0,015). En promedio, la inoculación redujo la cantidad de N_2O-N emitida por tonelada de grano producida en aproximadamente 34% (Figura 3C).

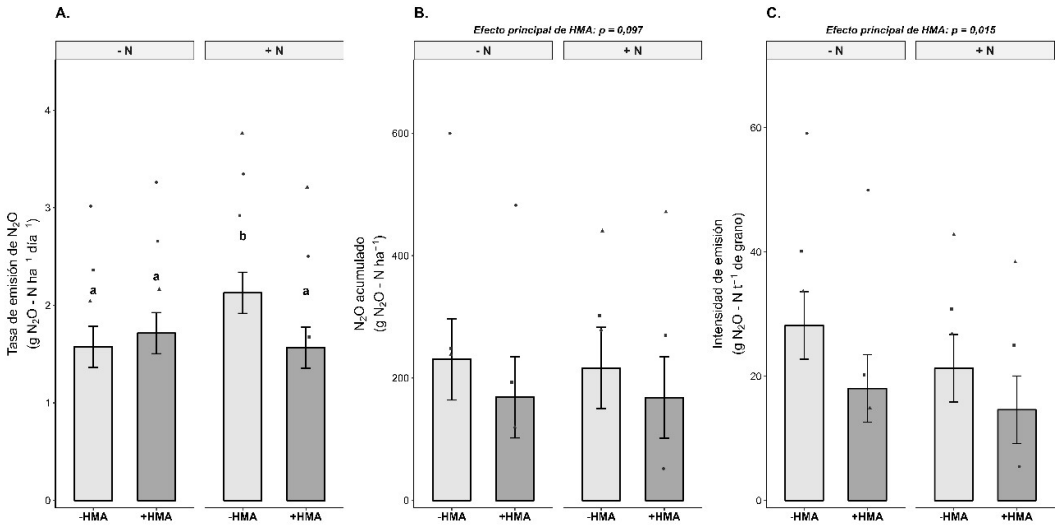

Figura 3. Efecto de HMA y de la fertilización sobre la (A) tasa media de emisión de N_2O (g N_2O–N ha^{-1} $día^{-1}$), (B) las emisiones acumuladas de N_2O (g N_2O–N ha^{-1}) y (C) la intensidad de emisión en maíz (g N_2O–N t^{-1} de grano). Las barras representan medias estimadas ± EE. Las letras diferentes indican diferencias significativas en el panel A; en los paneles B y C se indican los valores de p correspondientes al efecto principal de HMA.

Tabla 2. Efecto de la fertilización (N) y la inoculación con hongos micorrícicos arbusculares (HMA) sobre las emisiones de N_2O-N, la intensidad de emisión y las variables productivas de maíz. Los valores corresponden a la media ± EE (n=3).

N	HMA	Tasa media de N_2O (g N_2O-N ha^{-1} d^{-1})	N_2O acumulado (g N_2O-N ha^{-1})	Intensidad de emisión (g N_2O-N t^{-1} de grano)	Biomasa radical (g m^{-2})	Rendimiento (t ha^{-1})
- N	- HMA	1,57 ± 0,18^{a}	230,5 ± 75,6	28,2 ± 4,8^{B}	140,7 ± 17,2^{b}	7,81 ± 1,20^{A}
- N	+ HMA	1,71 ± 0,20^{a}	168,6 ± 70,5	18,0 ± 6,9^{A}	84,9 ± 14,1^{a}	9,09 ± 0,52^{A}
+ N	- HMA	2,13 ± 0,15^{b}	216,3 ± 32,2	21,3 ± 3,1^{B}	106,8 ± 3,2^{b}	10,15 ± 0,18^{B}
+ N	+ HMA	1,57 ± 0,28^{a}	168,1 ± 77,1	14,6 ± 6,1^{A}	114,4 ± 6,1^{b}	10,86 ± 0,80^{B}
p N		0,564	0,943	0,558	0,856	0,037
p HMA		0,033	0,097	0,015	0,084	0,243
p N x HMA		0,006	0,802	0,445	0,034	0,724

Letras minúsculas diferentes indican diferencias significativas entre niveles de HMA dentro de cada nivel de fertilización cuando la interacción (N x HMA) fue significativa ($p < 0,05$). Letras mayúsculas diferentes indican diferencias significativas entre los efectos principales HMA en intensidad de emisión y N en rendimiento ($p < 0,05$).

La biomasa radical presentó una interacción N x HMA ($p = 0,034$; Figura 4A): bajo -N, la inoculación redujo la biomasa radical ($p = 0,015$), mientras que bajo +N no hubo diferencias ($p = 0,658$). La fertilización incrementó el rendimiento del cultivo ($p = 0,037$; Figura 4B) y tendió a aumentar el peso individual del grano ($p = 0,056$) sin modificar el número de granos ($p > 0,10$). HMA no afectó estas variables productivas.

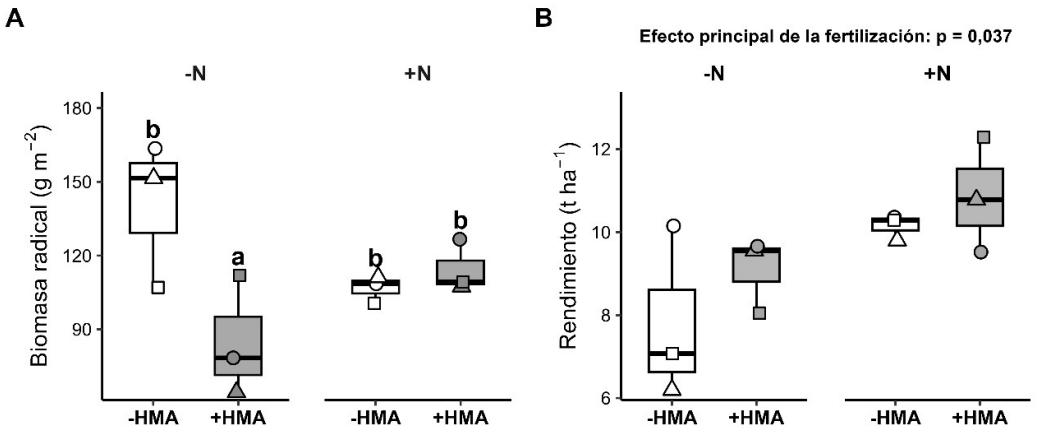

Figura 4. Efecto de la inoculación con HMA y de la fertilización sobre la biomasa radical (A) y el rendimiento (B) del cultivo de maíz. En el panel A, letras diferentes indican diferencias significativas entre tratamientos de HMA dentro de cada nivel de fertilización ($p < 0,05$). En el panel B se indica el efecto principal de la fertilización ($p = 0,037$).

Discusión

Las emisiones de N_2O se concentraron durante los primeros días posteriores a la fertilización nitrogenada y disminuyeron hacia el final del ciclo (Figura 1). Durante el período de evaluación se observaron cambios marcados en la humedad y la temperatura del suelo, así como una elevada variabilidad temporal en las concentraciones de NO_3^- y NH_4^+ (Figura 2). Este comportamiento refleja la naturaleza dinámica de los factores edáficos que regulan la producción de N_2O y es consistente con lo descrito para maíz en la región pampeana, donde los principales pulsos de emisión ocurren asociados a la fertilización y a eventos de precipitación (Tovar Hernández et al., 2025; Cafaro La Menza et al., 2025). Las emisiones acumuladas (0,17-0,23 kg N_2O-N ha^{-1}) se ubicaron en el extremo inferior de los valores informados para Balcarce.

La inoculación con HMA no modificó las emisiones acumuladas, aunque mostró una tendencia a reducirlas y su efecto sobre la tasa media de emisión dependió de la fertilización. Bajo +N, los HMA redujeron la tasa de emisión mientras que bajo -N no se detectaron diferencias. Estos resultados indican que la respuesta de las emisiones a la inoculación puede depender del nivel de fertilización nitrogenada y del indicador de emisión considerado. Los HMA pueden modificar las emisiones de N_2O mediante cambios en la captación de N por el cultivo y en la disponibilidad de sustrato para los microorganismos responsables de los procesos de nitrificación y desnitrificación (Bender et al., 2014; Li et al., 2023), aunque la magnitud de la respuesta en condiciones de campo puede estar modulada por múltiples factores ambientales (Shen y Zhu, 2021).

Uno de los principales resultados de este estudio fue la reducción de la intensidad de emisión en respuesta a la inoculación con HMA. La intensidad disminuyó aproximadamente un 34% en promedio, independientemente del nivel de fertilización. Esta respuesta surgió de cambios concurrentes, aunque individualmente no significativos, hacia menores emisiones acumuladas de N_2O y mayores rendimientos en las parcelas inoculadas. Al integrar ambos componentes, la intensidad de emisión permitió detectar una mejora significativa en la cantidad de N_2O -N emitida por unidad de grano producido que no fue evidente al analizar separadamente las emisiones acumuladas o el rendimiento.

La respuesta de la biomasa radical dependió de la fertilización: bajo -N, los HMA redujeron la biomasa radical, mientras que bajo +N no se observaron cambios. Esto podría reflejar una menor inversión de carbono en raíces debido a la ampliación del volumen del suelo explorado por las hifas radicales. Por su parte, el aumento del rendimiento con N estuvo acompañado por una tendencia a mayor peso individual del grano, pero no por cambios en su número, sugiriendo una respuesta asociada principalmente al llenado.

Conclusiones

La fertilización nitrogenada incrementó el rendimiento, mientras que la inoculación con HMA no produjo una mejora productiva bajo las condiciones evaluadas. Sin embargo, los HMA redujeron la tasa media de emisión bajo fertilización y disminuyeron la intensidad de emisión, sin modificar significativamente las emisiones acumuladas. En conjunto los resultados muestran que la inoculación con HMA presenta potencial para mejorar la eficiencia ambiental del cultivo de maíz sin comprometer su productividad. No obstante, su efecto sobre las emisiones de N_2O dependió del indicador

considerado y, en el caso de la tasa media de emisión, del nivel de fertilización nitrogenada.

Apoyo financiero: Este trabajo fue financiado por el Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA), Proyecto 1.7.2.L2.PD.I097 "Emisiones de gases de efecto invernadero y captura de carbono en sistemas agropecuarios y forestales".

Referencias bibliográficas

Bender, S. F.; Plantenga, F.; Neftel, A.; Jocher, M.; Oberholzer, H. R.; Köhl, L.; Giles, M.; Daniell, T. J.; van der Heijden, M. G. A. 2014. Symbiotic relationships between soil fungi and plants reduce N_2O emissions from soil. The ISME Journal. 8: 1336-1345.

Cafaro La Menza, F.; Lewczuk, N.; Echarte, L.; Barbieri, P. A.; Carciochi, W. D. 2025. Nitrous oxide emissions and emission factors in hairy vetch–maize sequences: The role of vetch termination timing on nitrogen synchronization. Agriculture, Ecosystems & Environment. 394: 109868.

Clough, T. J.; Rochette, P.; Thomas, S. M.; Pihlatie, M.; Christiansen, J. R.; Thorman, R. E. 2020. Global Research Alliance N_2O chamber methodology guidelines: Design considerations. Journal of Environmental Quality. 49: 1081-1091.

Frasier, I.; Noellemeyer, E.; Fernández, R.; Quiroga, A. 2016. Direct field method for root biomass quantification in agroecosystems. MethodsX. 3: 513-519.

Hutchinson, G. L.; Mosier, A. R. 1981. Improved soil cover method for field measurement of nitrous oxide fluxes. Soil Science Society of America Journal. 45: 311-316.

IPCC. 2021. Cambio Climático 2021: Bases físicas. Contribución del Grupo de Trabajo I al Sexto Informe de Evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático. Cambridge University Press. Cambridge.

Li, X.; He, G.; Li, D.; Bei, S.; Luan, D.; Sun, X.; Yang, G.; Huo, L.; Zhen, L.; Zhao, R. 2023. Arbuscular mycorrhizal fungi reduce N_2O emissions from degraded residue patches. Frontiers in Ecology and Evolution. 11: 1224849.

R Core Team. 2022. R: A Language and Environment for Statistical Computing. R Foundation for Statistical Computing. Vienna.

Ritchie, S. W., & Hanway, J. J. (1982). How a corn plant develops (Special Report No. 48). Iowa State University of Science and Technology, Cooperative Extension Service.

Shen, Y.; Zhu, B. 2021. Arbuscular mycorrhizal fungi reduce soil nitrous oxide emission. Geoderma. 402: 115179.

Storer, K.; Coggan, A.; Ineson, P.; Hodge, A. 2018. Arbuscular mycorrhizal fungi reduce nitrous oxide emissions from N_2O hotspots. New Phytologist. 220: 1285-1295.

Tovar Hernández, S.; Salvagiotti, F.; Lewczuk, N.; Carciochi, W.; Hernández Guijarro, K.; Biassoni, M.; Kehoe, E.; Ávila, O.; García, G.; Toribio, M.; García, F.; Sainz Rozas, H.; Reussi Calvo, N. 2025. Are gaseous nitrogen losses affected by the fertilizer type and rate in maize? Soil & Tillage Research. 251: 106519.