

De la teoría a la práctica: Fertilizantes de Eficiencia Mejorada

► ► Reussi Calvo NI^{1,2*} & Iglesias MP¹

¹Facultad de Ciencias Agrarias (UNMDP), ²CONICET.

✉ nahuelreussicalvo@mdp.edu.ar

>. ENTENDIENDO EL CONTEXTO

El manejo responsable de los nutrientes en los sistemas de producción requiere de la consideración de los 4 Requisitos: fuente, dosis, forma y momento de aplicación correctos. Estos 4 Requisitos se basan en principios científicos y en evidencia experimental técnica y científica que respalda la toma de decisión (IPNI, 2013).

Para ser eficientes a la hora de aplicar un fertilizante, en primer término, es necesario determinar cuáles son los nutrientes que requiere el sistema o el cultivo, es decir, definir la fuente correcta. Por lo tanto, una vez definida la necesidad de aplicación de un determinado nutriente según el diagnóstico de fertilidad, vamos a evaluar la dosis, la forma y el momento de aplicación que mejoren la sincronización de la oferta con la demanda del cultivo y en definitiva hagan más eficiente la intervención (Correndo et al., 2022; Bonelli et al., 2017; Maltese et al., 2024). Debemos tener en cuenta que los 4 Requisitos interactúan fuertemente entre sí, es decir, que la búsqueda de la mayor eficiencia pasa por determinar simultáneamente la fuente, la dosis, la forma y el momento óptimos para cada sistema y/o cultivo en cada lote o ambiente (IPNI, 2013).

Al considerar la fuente correcta para un determinado nutriente, se dispone de productos minerales y orgánicos bajo distintas formas que ofrecen alternativas en cuanto a forma y momento y afectan la eficiencia de uso de los nutrientes aplicados. Según la organización AAFPCO (2009), los fertilizantes de eficiencia mejorada (FEM, **Figura 1 y 2**) constituyen un grupo de productos con *“características que permiten una mayor disponibilidad de nutrientes para las plantas y reducen el potencial de pérdidas de nutrientes al medio ambiente en comparación con un producto de referencia apropiado”*.

Los FEM más citados para nitrógeno se pueden clasificar como:

- ***Liberación lenta o controlada***: un fertilizante que contiene formas de nutrientes que demoran su disponibilidad para la planta significativamente más que un fertilizante de referencia de rápida disponibilidad, a través de distintos mecanismos: coberturas semipermeables (p.e., urea recubierta de polímeros o azufre elemental), oclusión, proteínas u otras formas químicas (p.e., urea-metileno).
- ***Estabilizados***: un fertilizante al cual se le agregó un estabilizador, que es una sustancia que extiende la permanencia en el tiempo del nutriente, por ejemplo, un fertilizante nitrogenado (urea o amonio).

- Inhibidor de la nitrificación: sustancia que inhibe la oxidación biológica de amonio a nitrato. Ejemplos: nitrapyrin, DMPP, DCD.
- Inhibidor de la ureasa: sustancia que inhibe la acción hidrolítica de la enzima ureasa sobre la urea. Ejemplos: NBTP, NBTP+NPPT.

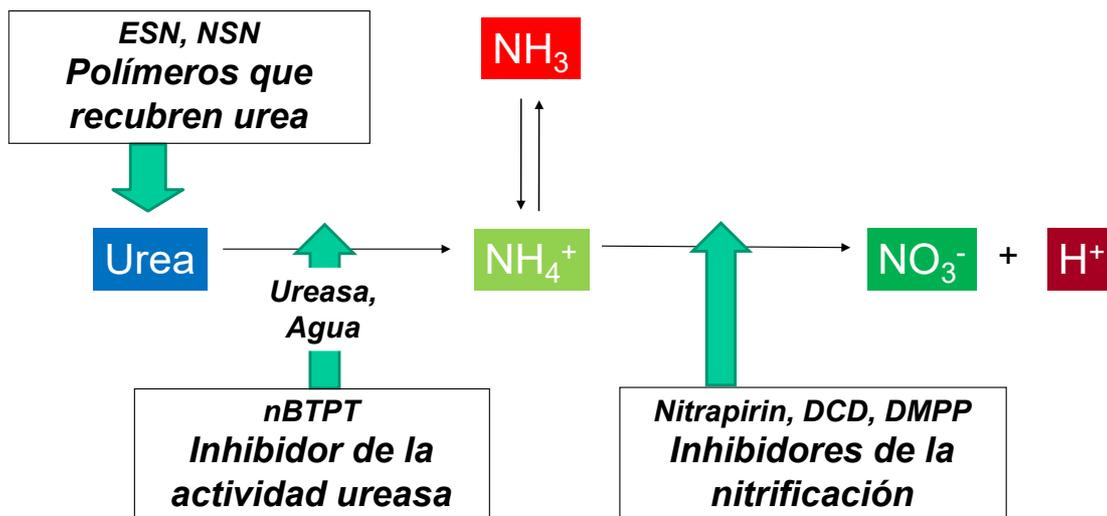


Figura 1. Ejemplos de fertilizantes de liberación lenta o controlada y fertilizantes estabilizados en aplicaciones de urea. Fuente: F. García (Comun. Personal).

Para el caso del fósforo (P), se han propuesto en la literatura diferentes tecnologías con el objetivo de mejorar la eficiencia de uso del P, la rentabilidad y reducir el impacto en el ambiente (Weeks y Hettiarachchi, 2019; Guelfi et al., 2022). Algunas fuentes alternativas incluyen:

- Fertilizantes con inhibidores de la fijación: fertilizantes con aditivos para reducir las reacciones de precipitación y adsorción de P. Pueden clasificarse como modificadores de pH, secuestradores de cationes o bloqueadores.
- Fertilizantes fosfatados sinérgicos: fertilizantes fosfatados convencionales con adición de otros nutrientes, microorganismos, nanopartículas o bioestimulantes.
- Fertilizantes modificados químicamente: fuentes convencionales de P con solubilidad y/o forma química modificadas en el proceso de producción mediante reacciones físicas, químicas o físico-químicas que modifican la interacción del P con otros compuestos químicos.
- Fertilizantes de liberación controlada: fertilizantes convencionales con recubrimiento que sirven como barrera física y controlan el flujo por difusión.
- Mezclas y fertilizantes multifuncionales: mezcla física de fertilizantes fosfatados convencionales en gránulos y aquellos que tienen algún tipo de tecnología, como los indicados anteriormente.

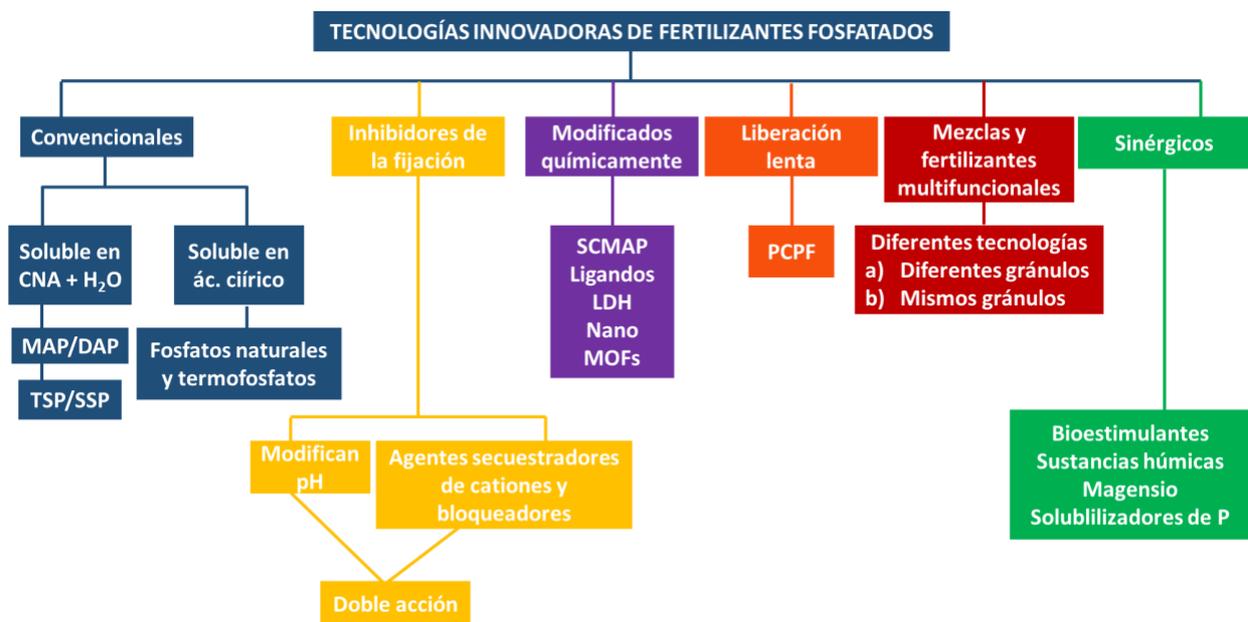


Figura 2. Clasificación de fertilizantes fosfatados en función del tipo de tecnología (Guelfi et al., 2022).
Abreviaciones: CNA + H₂O: citrato de amonio neutro + agua; MAP: fosfato monoamónico; DAP: fosfato diamónico; TSP: superfosfato triple; SSP: superfosfato simple; SCMAP: MAP recubierto con azufre (S⁰); LDH: cobertura doble de hidróxidos; Nano: nanopartículas; MOFs: estructuras metal-orgánicas; PCPF: fosfatos cubiertos con polímeros.

Aunque no se dispone de datos precisos sobre el porcentaje global de uso de FEM en cultivos extensivos, se estima que su adopción es relativamente baja en comparación con los fertilizantes convencionales. Factores como el costo más elevado y la falta de conocimiento sobre sus beneficios contribuyen a esta limitada implementación (Reetz, 2016). En Argentina, no existe una cifra oficial unificada, pero diversas fuentes y estudios indican que la adopción de FEM en Argentina es aun relativamente baja, oscilando en torno al 5–10% del total de fertilizantes nitrogenados aplicados en cultivos extensivos. Esta tasa puede variar según la región y el tipo de cultivo, siendo más alta en áreas donde se han implementado programas de manejo sustentable o en cultivos de alto nivel de fertilización como el maíz y el trigo.

>. FERTILIZANTES DE EFICIENCIA MEJORADA: UNA MIRADA GLOBAL

A nivel global, existen varias revisiones y trabajos en los últimos años referidas al efecto de los FEM para N sobre las emisiones de óxido nitroso (N₂O), las pérdidas por volatilización, lavado, rendimiento de los cultivos y/o calidad de los productos de cosecha (Thapa et al., 2016; Silva et al., 2016; Pan et al., 2016). A modo de ejemplo, la revisión realizada por Thapa et al. (2016) a partir de 43 experimentos muestra que el empleo de fertilizantes de liberación lenta o estabilizadores fueron efectivos para reducir las emisiones de N₂O (hasta 38%) cuando se compararon con fertilizantes tradicionales (**Figura 3**). Además, estos autores, determinaron leves mejoras en el rendimiento de los cultivos (+7%) por el empleo de fertilizantes con doble inhibidor (ureasa y nitrificación). Sin embargo, observaron que la efectividad de los FEM varía según las condiciones del sitio y el manejo (e.g. pH, textura, forma de aplicación del fertilizante, entre otros). Similares resultados fueron reportados por Pan et al. (2016) quienes determinaron reducciones en las pérdidas por volatilización por el empleo de inhibidores de la ureasa y fertilizantes de liberación lenta (54 y 68%, respectivamente), mientras que la aplicación de inhibidores de la nitrificación las incrementó

en un 38%. A su vez, Silva et al. (2016) determinaron cambios en la efectividad de los inhibidores de la actividad ureásica según el pH del suelo. En cuanto a las pérdidas por lavado, son escasos los estudios que evalúan el efecto de los FEM sobre dichas pérdidas. No obstante, el empleo de inhibidores de la nitrificación podría reducir el lavado de nitrato en un 50% respecto a la urea según las revisiones realizadas por Qiao et al. (2015) y Yang et al. (2016).

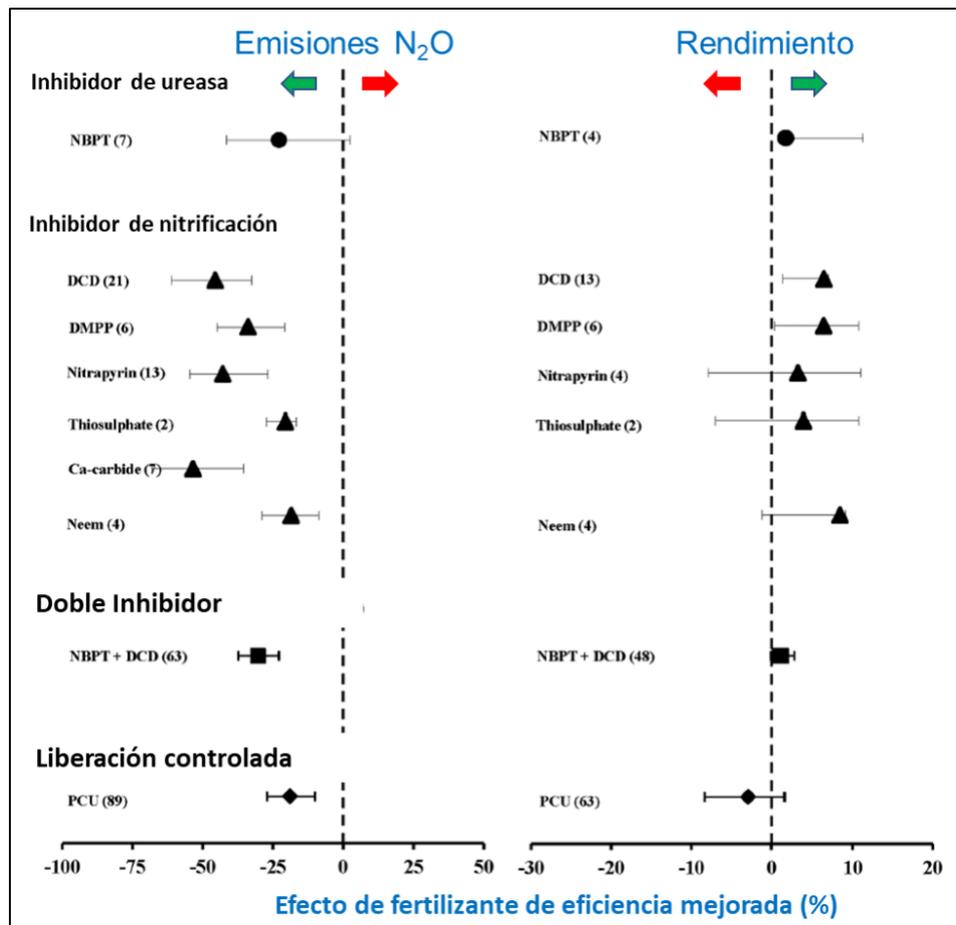


Figura 3. Efecto de diferentes fertilizantes de liberación lenta o controlada y fertilizantes estabilizados en aplicaciones de nitrógeno sobre las emisiones de óxido nitroso y el rendimiento de maíz y trigo. Fuente: Thapa et al. (2016).

Para el caso del P, si bien las revisiones sobre FEM son menos frecuentes que para el caso de N, los principales resultados muestran que al igual que para N las respuestas son sitio específicas. A modo de ejemplo, Hopkins et al. (2018) reportaron, en base a una revisión de 503 experimentos de campo, que la aplicación de un copolímero con el fertilizante de base aumentó en general un 2,1% el rendimiento mientras que el incremento fue de un 4,6% cuando solo se consideraron los sitios con deficiencias de P (n=116), lo que destaca la importancia de evaluar los FEM en ambientes deficientes. Además, Dunn y Stevens (2008) observaron un aumento del 5% en el rendimiento del arroz mediante el recubrimiento de superfosfato triple con un polímero en sitios deficientes de P. Sin embargo, Pierzynski y Hettiarachchi (2018) determinaron que el uso de un aditivo, como el copolímero de ácido maleico-itacónico, no influyó en la movilidad del P en tres suelos ácidos (Oxisol, Ultisol y Andisol). El aditivo no afectó la labilidad en el Oxisol ni en el Andisol, pero si la aumentó en el Ultisol. Para suelos calcáreos, Lombi et al. (2004) reportaron una mayor difusión y disponibilidad de P para fuentes fosfatadas líquidas respecto a los

granulados, debido a una menor precipitación. En síntesis, dentro de un contexto amplio de estrategias orientadas a mejorar la eficiencia de la fertilización fosfatada, los FEM son una de las posibles alternativas a considerar. La eficiencia de estos fertilizantes puede potenciarse si se combinan con estrategias tan básicas como el muestreo y análisis de suelos o bien más avanzadas, como el sistema de siembra directa y la agricultura de precisión.

>. PERSPECTIVAS LOCALES SOBRE FERTILIZANTES DE EFICIENCIA MEJORADA PARA NITRÓGENO

En la actualidad, en Argentina, se ha estimado una brecha de rendimiento, definida como la proporción entre los rendimientos obtenidos con las prácticas agrícolas que se utilizan en cada lote con la tecnología del productor y los rendimientos máximos alcanzables, en alrededor del 40% (Aramburu Merlos et al., 2015). El N es el principal nutriente responsable de dicha brecha en maíz, por lo tanto, algunas estimaciones indicarían que es necesario incrementar en un 50% el aporte actual de N al cultivo con el objetivo de cerrar dichas brechas. En este contexto, el empleo de FEM sería una estrategia para mejorar la eficiencia de uso del N y reducir el potencial impacto ambiental de la fertilización. En Argentina, los inhibidores de ureasa han sido los más estudiados. Una revisión reciente de 21 ensayos en maíz realizada por Toribio et al. (2023) muestra que el uso del inhibidor redujo en 73% las pérdidas por volatilización (Figura 4), y aumentó un 5% y 6% el rendimiento y la eficiencia de uso de nitrógeno, respectivamente.

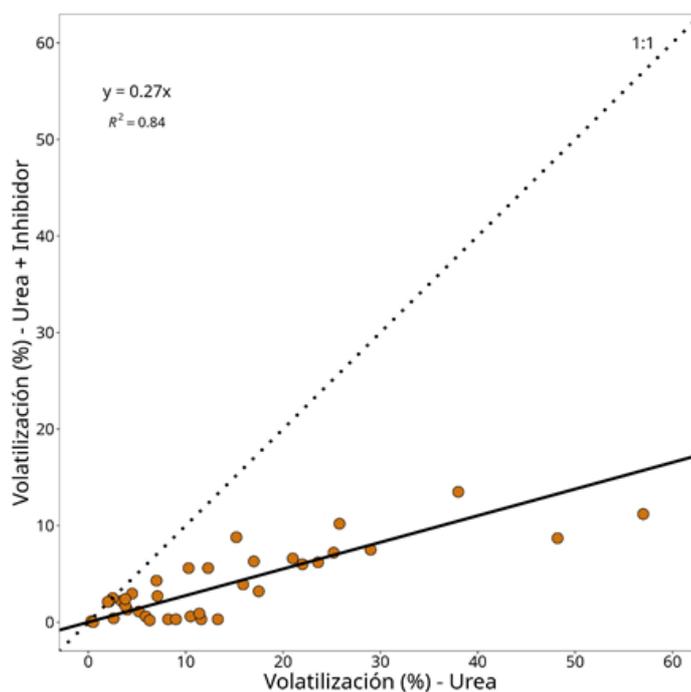


Figura 4. Volatilización de amoníaco (NH_3) a partir de aplicaciones superficiales de urea con inhibidor de hidrólisis de urea versus volatilización de amoníaco (NH_3) a partir de aplicaciones superficiales de urea sin inhibidor en 21 ensayos de maíz en Argentina. Fuente: Toribio et al. (2023). La línea punteada 1:1 indica pérdidas de volatilización similares con y sin inhibidor.

En los últimos años, se ha determinado que los híbridos modernos de maíz, en ambientes sin limitaciones hídricas, pueden absorber hasta el 40% del N acumulado a madurez fisiológica durante la etapa post-floración (Maltese et al., 2024). Por lo tanto, esto permitiría aplicar parte del N al inicio y el resto en etapas avanzadas del cultivo con el objetivo de sincronizar la oferta con la demanda del cultivo. Trabajos recientes se han enfocado en integrar el efecto de tecnologías de insumos (i.e. inhibidores de la nitrificación y actividad ureasa) y de procesos (i.e. fraccionamiento de la dosis de N) sobre las pérdidas gaseosas y el rendimiento del cultivo de maíz. Por lo tanto, se ha calculado el cambio en la magnitud de dichas pérdidas y en la productividad del cultivo al incorporar diferentes prácticas de manejo respecto al manejo que realiza el productor (aplicación completa de N en V₄ bajo la forma de urea en seco).

La aplicación de riego complementario prácticamente no modificó las pérdidas por volatilización, aunque sí incrementó la emisión de N₂O (520%) ($p > 0,05$) y el rendimiento de maíz (44%) (**Figura 5**). En cuanto al efecto de las tecnologías de procesos, el fraccionamiento de la dosis de N redujo en un 33% la volatilización, mientras que incrementó la emisión de N₂O en un 475% ($p > 0,05$) y no modificó el rendimiento del cultivo. Por su parte, solo el empleo del inhibidor de la actividad ureásica redujo las pérdidas por volatilización (-62%) (**Figura 5a**). En cambio, para la emisión de N₂O, se observaron reducciones del 58% para el inhibidor de la nitrificación y aumentos del 324% para el inhibidor de la ureasa ($p > 0,05$) (**Figura 5b**). Por último, se observó como tendencia un incremento del 11% en el rendimiento solo al aplicar el inhibidor de la nitrificación ($p > 0,05$) (**Figura 5c**). Considerando la combinación de prácticas de manejo (riego, fraccionamiento de N e inhibidor de la ureasa), se lograron reducciones del 84% en las pérdidas por volatilización e incrementos del 41% en el rendimiento. Es importante destacar que el cambio en la magnitud de rendimiento debido a la aplicación de riego siempre fue positivo, a diferencia del fraccionamiento y el empleo de fuentes alternativas que presentaron algunos valores negativos respecto al manejo del productor. Estos resultados resaltan el potencial de seleccionar la mejor combinación de estrategias e insumos con el objetivo de reducir las pérdidas gaseosas e incrementar el rendimiento del cultivo.

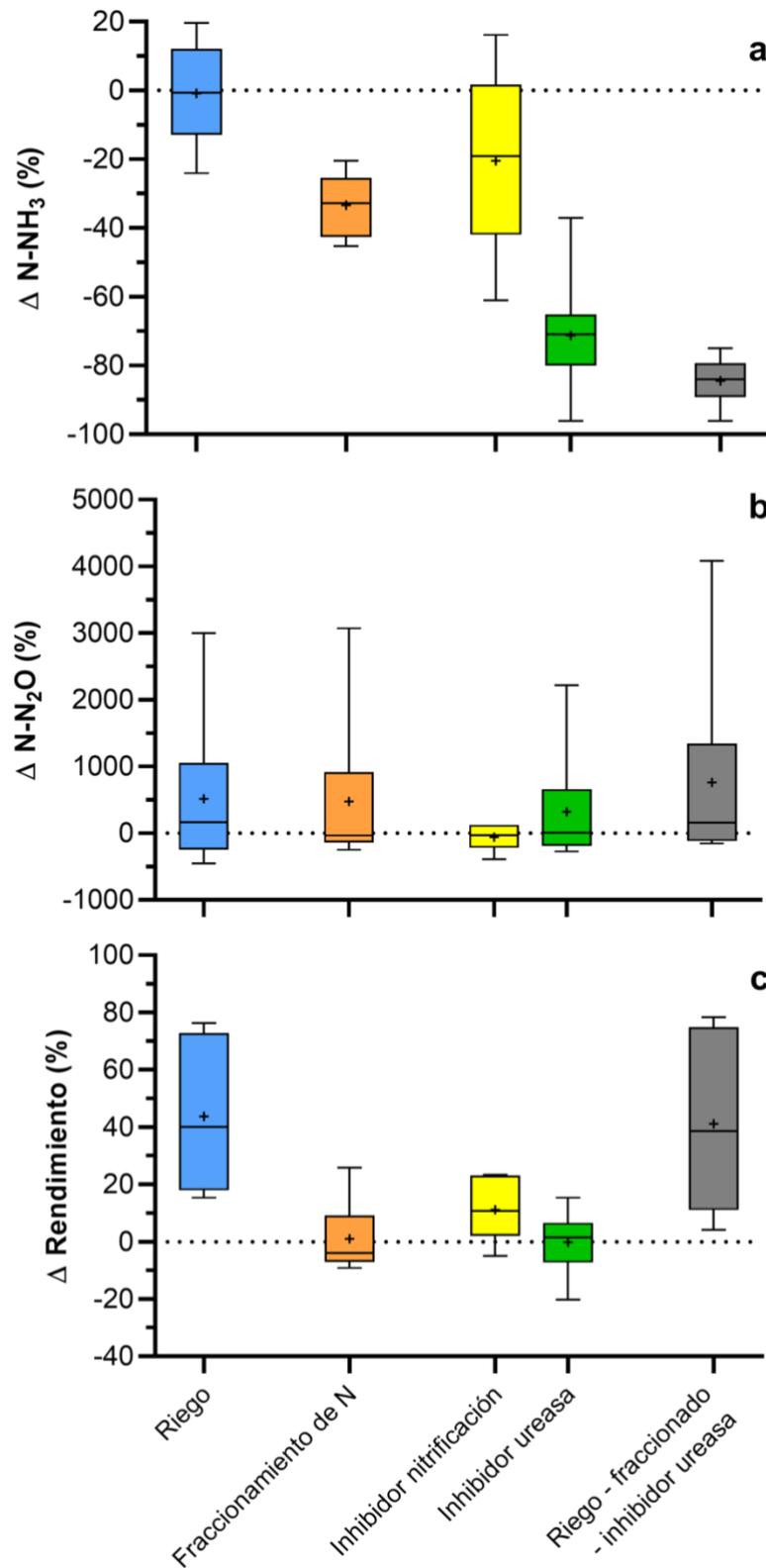


Figura 5. Cambio en las pérdidas por volatilización de NH_3 (a), en la emisión de N_2O (%) (b) y en el rendimiento (c) respecto a una situación de referencia, para cada uno de los factores evaluados (riego, fraccionamiento de la dosis de N y fuente de N). La línea punteada indica el tratamiento de referencia (Urea aplicada en V_4 en condiciones de secano), siendo el valor de $45,8 \text{ kg ha}^{-1}$, $69,4 \text{ g ha}^{-1}$ y $11,8 \text{ t ha}^{-1}$ para volatilización, emisión de N_2O y rendimiento, respectivamente. Fraccionado: 60% de la dosis de N (120 kg N ha^{-1}) en V_4 y 40% (80 kg N ha^{-1}) en R_1 . Fuente: Iglesias et al. (2025).

>. MÁS ALLÁ DEL CULTIVO

Los crecientes efectos negativos del cambio climático a través de las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) requiere de medidas de mitigación inmediatas (IPCC, 2018). Al presente, Argentina ha presentado sus inventarios de GEI basados en factores de emisión (FE) por defecto propuestos por las directrices metodológicas del Panel Intergubernamental de Cambio Climático (IPCC), con la metodología más simple (Tier 1). Algunos trabajos como el de Said et al. (2023) indican que las emisiones de GEI y, por ende, la huella de carbono (C) estarían siendo sobreestimadas según las estimaciones realizadas por el Panel Intergubernamental del Cambio Climático (IPCC).

Experiencias realizadas en las últimas dos campañas en el sudeste bonaerense han determinado que la huella de C calculada a partir de FE locales resultó un ~50% menor respecto a la calculada con los FE propuestos por el IPCC (Iglesias et al., 2025) (**Figura 6**). Esta tendencia se observó tanto para el manejo tradicional (aplicación de N en V₄ en seco) como para el manejo eficiente de N (aplicación de N fraccionada, empleo de inhibidores y riego). No obstante, al combinar tecnologías de procesos y de insumos, como la incorporación de riego complementario, el fraccionamiento de la dosis de N y el empleo del inhibidor de la ureasa, se obtuvo una huella de C un 54% menor a la estimada por el IPCC. Estos resultados demuestran que es posible reducir el impacto ambiental mediante un manejo más eficiente de N y confirman la evidencia de que el IPCC sobreestimaría las emisiones de GEI para Argentina (Said et al., 2023).

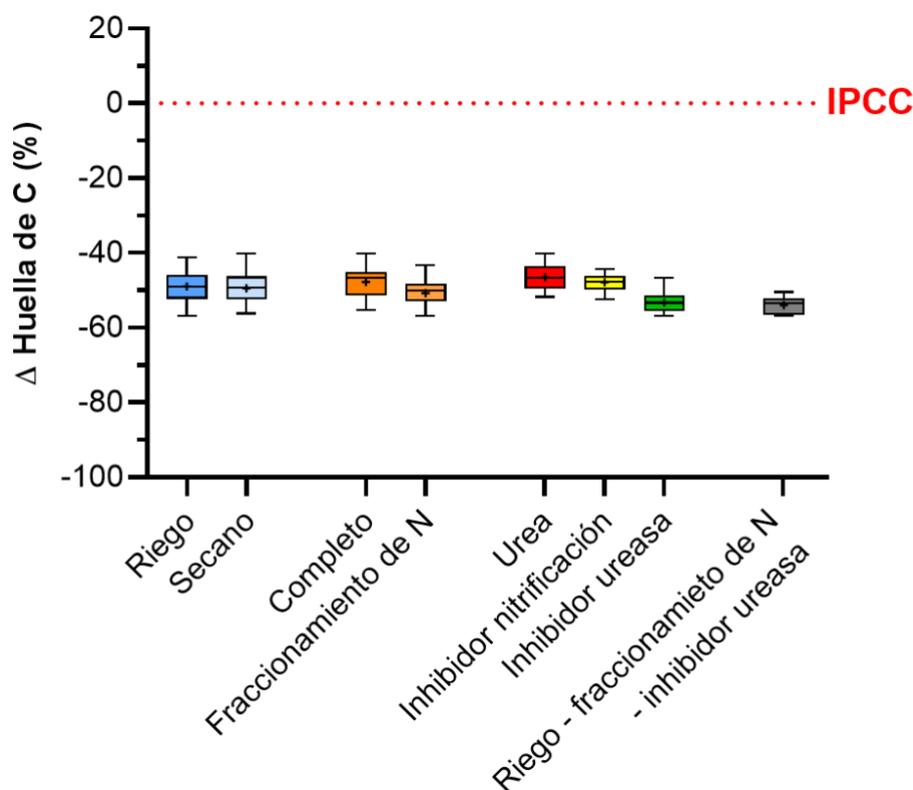


Figura 6. Cambio en la huella de carbono respecto a una situación de referencia, para cada uno de los factores evaluados (riego, fraccionamiento de la dosis de N y fuente de N). La línea punteada indica la huella de carbono calculada con los factores de emisión propuestos por el IPCC (2716 kg CO₂-eq ha⁻¹). Fraccionado: 60% de la dosis de N (120 kg N ha⁻¹) en V₄ y 40% (80 kg N ha⁻¹) en R₁. Completo: 100% de la dosis en V₄. Fuente: Iglesias et al. (2025).

>. SÍNTESIS FINAL

Los fertilizantes de eficiencia mejorada podrían ser una alternativa a los fertilizantes tradicionales con el objetivo de maximizar el rendimiento y minimizar el potencial impacto ambiental negativo de la práctica de fertilización. No obstante, debido a su respuesta “sitio específica” requiere de una correcta evaluación y diagnóstico previo a su aplicación. El mercado actual en Argentina ofrece para nitrógeno distintos fertilizantes de eficiencia mejorada, principalmente inhibidores de ureasa y de nitrificación, así como también algunas alternativas de fertilizantes liberación lenta. Si bien, para el caso de fósforo están menos difundidos existen fertilizantes que presentan en su formulación polímeros, bioestimulantes o inhibidores de la fijación. Estas tecnologías se suman a los biofertilizantes, reciclados y fuentes orgánicas a la hora de decidir fuentes de nutrientes y alternativas de manejo. La integración de tecnologías de insumos y de procesos debería ser considerada para contribuir a alcanzar los objetivos de sustentabilidad ecológica, económica y social de nuestros sistemas de producción.

>. REFERENCIAS

- Aramburu Merlos, F.; Monzon, J. P.; Mercou, J. L.; Taboada, M.; Grassini, P. 2015. Potential for crop production increase in Argentina through closure of existing yield gaps. *Fields Crops Research*. 184: 145-154. DOI: 10.1016/j.fcr.2015.10.001.
- Bonelli, L. E.; Sainz Rozas, H.; Echeverría, H. E.; Barbieri, P. A. 2017. Fuente y momento de aplicación de nitrógeno en maíz bajo siembra directa en Balcarce. *Ciencia del Suelo*. 36(1): 88-98.
- Correndo, A.A.; F.H. Gutiérrez-Boem; F.O. García; C. Alvarez; C. Álvarez; A. Angeli; P. Barbieri; M. Barraco; A. Berardo; M. Boxler; P. Calviño; J.E. Capurro; H. Carta; O. Caviglia; I.A. Ciampitti; M. Díaz-Zorita; S. Díaz-Valdéz; H.E. Echeverría; G. Espósito; M. Ferrari; G.N. Ferraris; S. Gambaudo; V. Gudelj; J.P. Loeleu; R.J.M. Melchiori; J. Molinow; JM. Orcellet; A. Pagani; J.M. Pautasso; N.I. Reussi Calvo; M. Redel; S. Rillo; H. Rimski-Korsakov; H.R. Sainz-Rozas; M. Saks; M.G. Tellería; L. Ventimiglia; J.L. Zorzín; Ma.M. Zubillaga; F. Salvagiotti. 2021. Attainable yield and soil texture as drivers of maize response to nitrogen: A synthesis analysis for Argentina. *Field Crops Research* <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2021.108299>.
- Dunn, D.J., and G. Stevens. 2008. Response of rice yields to phosphorus fertilizer rates and polymer coating. www.plantmanagementnetwork.org/cm/. *Crop Manage*. 7. doi:10.1094/CM-2008-0610-01-RS
- Guelfi, D.; Nunes, A. P. P.; Sarkis, L. F.; Oliveira, D. P. (2022). Innovative phosphate fertilizer technologies to improve phosphorus use efficiency in agriculture. *Sustainability*, 14(21), 14266.
- Hopkins, B. G., Schmitt, M. A., & Osher, L. J. (2018). AVAIL Phosphorus Fertilizer Enhancer: Meta-Analysis of 503 Field Evaluations. *Agronomy Journal*, 110(4), 1131-1144.
- Iglesias, P.; Wyngaard, N.; Sainz Rozas, H.; Lewczuk, N.; Toribio, M.; García, F.; Reussi Calvo, N. 2025. Gestión del nitrógeno en maíz: balance entre productividad y sostenibilidad. Simposio Fertilidad 2025.
- IPCC. (2018) Global Warming of 1.5°C. An IPCC Special Report on the impacts of global warming of 1.5°C above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways, in the context of strengthening the global response to the threat of climate change, sustainable development, and efforts to eradicate poverty [V. Masson-Delmotte, P. Zhai, H. O. Pörtner, D. Roberts, J. Skea, P.R.

