

Estrategias de aplicación de fertilizantes sintéticos para la producción alimentaria medioambiental responsable

Violeta Romero-Carrión^{1,§}

Julián Ccasani-Allende¹

César Rivadeneyra-Rivas¹

Edelina Coayla-Coayla¹

1 Grupo de Investigación EcoDes-Universidad Nacional Federico Villarreal. Prolongación Camaná Núm. 1 014, Lima, Perú. (jccasani@unfv.edu.pe; crivadeneyra@unfv.edu.pe; acoayla@unfv.edu.pe).

Autor para correspondencia: vromero@unfv.edu.pe.

Resumen

Garantizar la seguridad alimentaria mundial y mitigar el calentamiento global, requiere de la optimización de la productividad agroalimentaria y la reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero como el óxido nitroso (N_2O) con potencial de calentamiento global 300 veces mayor a la del dióxido de carbono (CO_2). En este contexto se propuso, evidenciar que la adecuada aplicación de fertilizantes sintéticos posibilita la producción alimentaria medioambientalmente responsable e identificar el impacto de la reducción del óxido nitroso, mediante las estrategias del uso eficiente de los fertilizantes sintéticos. Se aplicó el diseño *ex post facto* y la revisión de la literatura en revistas indizadas en Scopus de los años 2023 y 2024, se identificaron diversas estrategias de aplicación de fertilizantes sintéticos y los resultados muestran que es necesario reducir los fertilizantes sintéticos y añadir biocarbón u otros minerales, que maximizan la utilización del nitrógeno por las plantas y minimizan las emisiones ambientales, la aplicación de T de Student para 15 investigaciones sobre cultivo de trigo, arroz y maíz, reveló con una significancia del 1% ($p = 0$) que las estrategias mostradas sobre el uso de fertilizantes nitrogenados en los cultivos, reduce la emisión de N_2O . Se concluyó que la adecuada aplicación de fertilizantes sintéticos posibilita significativamente la producción alimentaria medioambientalmente responsable.

Palabras clave:

fertilizantes, óxido nitroso, cambio climático.



Introducción

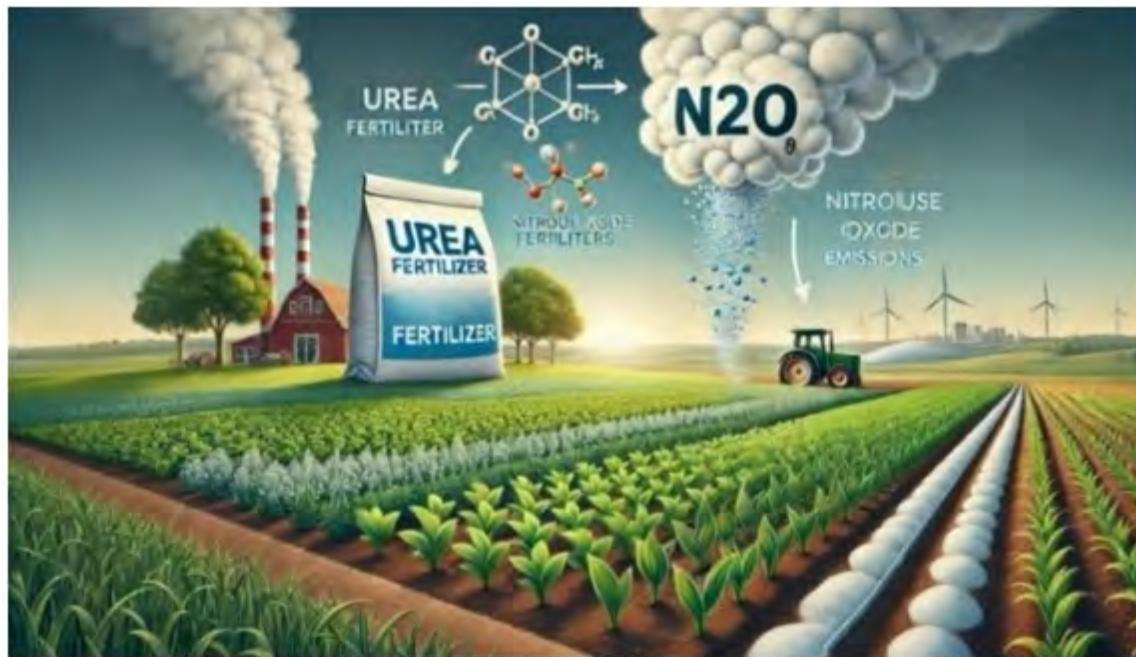
Uno de los retos más importantes del ser humano es la producción alimentaria para una población mundial en crecimiento, lo que conlleva la necesidad de preservar el suelo, recurso no renovable, mediante una gestión sostenible de almacenamiento o secuestro del carbono, minimizando los impactos ambientales (FAO, 2017). El sistema alimentario es una fuente trascendente de emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) provenientes de la producción agrícola, aportando un tercio de las emisiones globales aproximadamente (Crippa *et al.*, 2021).

El nitrógeno es abundante en nuestro planeta; sin embargo, las cantidades requeridas en los suelos para los cultivos alimentarios son insuficientes, por lo que se deben aplicar fertilizantes nitrogenados como la urea ($\text{CH}_4\text{N}_2\text{O}$). Sin embargo, es necesario adoptar prácticas agrícolas sostenibles que impacten positivamente en la naturaleza y el clima (Hu *et al.*, 2023). El nitrógeno es fundamental para la nutrición de las plantas, pero su uso en exceso contamina la atmósfera y acelera el cambio climático, principalmente a través de las emisiones de óxido nitroso (N_2O), poderoso gas de efecto invernadero (GEI) emitido desde las tierras de cultivo y la aplicación de fertilizantes.

El ciclo del nitrógeno involucra su circulación natural entre la atmósfera, las plantas, los animales y los microorganismos que viven en la tierra y en el agua; las emisiones naturales de N_2O provienen principalmente de las bacterias que descomponen el nitrógeno en la tierra y en los océanos (EPA, 2025). Las economías de China e India muestran altas tendencias de incremento de N_2O desde finales del siglo pasado a la actualidad, debido a la creciente demanda alimentaria de sus poblaciones. Por otro lado, en los Estados Unidos de América, las tierras agrícolas constituyen la fuente más grande de emisión de N_2O y representó aproximadamente el 73.9% del total de las emisiones de N_2O en el año 2017 (EPA, 2025).

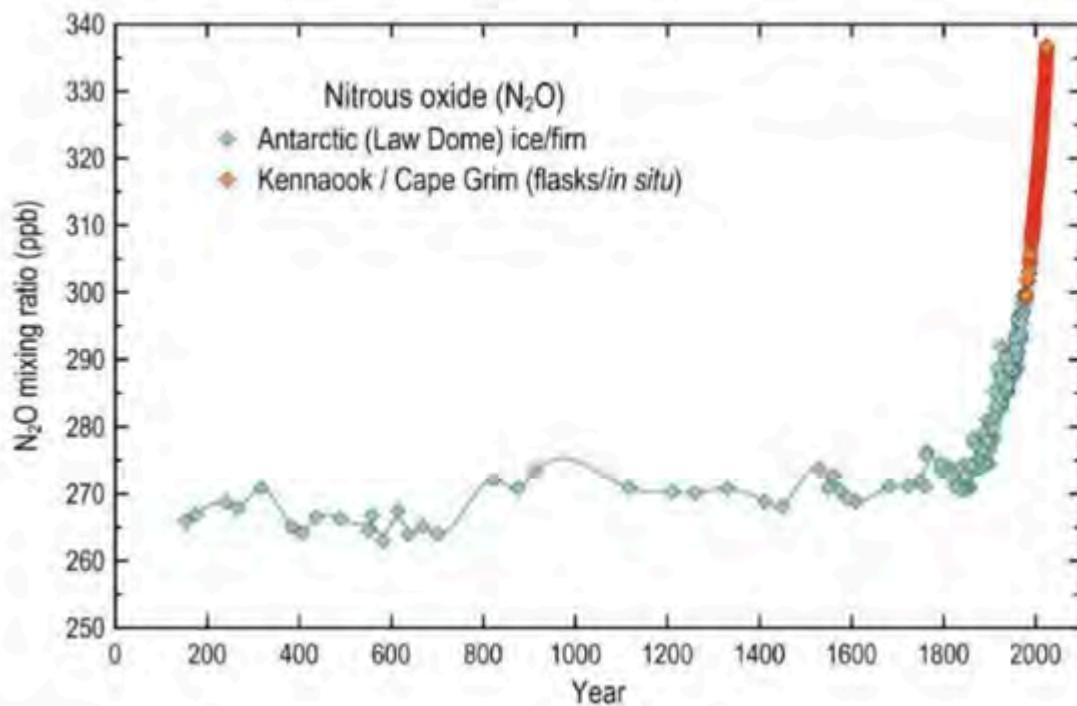
Asimismo, los aportes intensivos de nitrógeno (N) sintético en los agro sistemas de los países en desarrollo, son preocupantes, por sus impactos desfavorables en la producción y el medio ambiente (Yang *et al.*, 2024). Lo antes mencionado refleja el incremento del óxido nitroso en la actualidad y se ilustra con la Figura 1.

Figura 1. Urea esencial para el metabolismo de las plantas, pero emite N_2O incrementando los GEI.
Elaborado con ChatGPT-2025.



La Oficina Nacional de Administración Oceánica y Atmosférica (NOAA Research, 2025) menciona en su informe sobre la aceleración del crecimiento del óxido nitroso atmosférico, como lo muestran la Figura 2, consecuentemente se debe actuar con rapidez para reducir las emisiones de GEI y evitar las consecuencias del calentamiento global, considerando que el potencial de calentamiento del óxido nitroso (N_2O) es extremadamente mayor a la del dióxido de carbono (CO_2) (Griffis *et al.*, 2017). El principal desafío para reducir las emisiones de N_2O proviene de los fertilizantes aplicados a los cultivos.

Figura 2. Emisión global por años del óxido nitroso (N_2O) en PPB (NOAA Research, 2025).



Entre los impactos medioambientales negativos generados por el sistema agroalimentario, se encuentran la emisión de dióxido de carbono (CO_2), el metano (CH_4) y el óxido nitroso (N_2O), responsables en gran medida del calentamiento global actual y el deterioro de la capa de ozono (Aguilera *et al.*, 2020). En el marco del sistema alimentario, la mayor contribución para los GEI proviene de la agricultura y las actividades de cambio del uso de la tierra (71%), lo restante corresponde a las actividades de la cadena de suministro: ventas, transporte, consumo, gestión de residuos, procesos, embalaje entre otros (Crippa *et al.*, 2021).

Este hallazgo localizado por Yang *et al.* (2024) consideran que la producción de alimentos a nivel global afronta desafíos para equilibrar el requerimiento de mayores rendimientos con la sostenibilidad ambiental. Las rotaciones diversificadas de cultivo aumentan el rendimiento hasta en un 38%, reducen las emisiones de N_2O en 39% y mejoran el equilibrio de los GEI.

Fertilizantes

Con base a lo que mencionan Zabaloy (2021) sostiene que los suelos brindan a los seres humanos, la provisión de alimentos, hábitat, influyen en la regulación del clima, la retención del agua, entre otros. Sin embargo, son muy pocos los suelos con los nutrientes suficientes, resultando necesario enriquecerlos con abono o fertilizante de algún tipo. Los abonos naturales son formados por medios naturales y no han sufrido transformación alguna, tenemos entre otros, el estiércol, el follaje, el lodo y la ceniza. Además, están los fertilizantes sintéticos o químicos, creados por el hombre, para proporcionar nutrientes a las plantas, en base al fósforo, potasio y nitrógeno.

Producción alimentaria sostenible

En el año 2050 habrá que producir alimentos para 10 000 millones de personas en el mundo, lo cual implica aumentar la producción agrícola en un 50% aproximadamente. Esto debe alcanzarse sin ampliar la actual superficie cultivada, sin recurrir a la deforestación, ni cambios en el uso de la tierra, para evitar las emisiones de GEI, lo que requiere optimizar el rendimiento de los cultivos mediante la adecuada selección y dosificación de los fertilizantes (IFA, 2024).

En el marco de los objetivos de desarrollo sostenible (ODS), el objetivo 2 sobre poner fin al hambre y el objetivo 13 respecto a la acción sobre el clima, se interrelacionan en la interacción sistemática continua de sus componentes naturaleza, población y economía (Castro-Arce y Vanclay, 2020) en tal sentido es necesario aplicar alternativas de mejores prácticas de gestión de las tierras agrícolas. En este contexto mediante la revisión y análisis de la literatura, se constató que la adecuada aplicación de fertilizantes sintéticos posibilita la producción alimentaria medioambientalmente responsable e identificar el impacto de la reducción del óxido nitroso, mediante las estrategias del uso eficiente de los fertilizantes sintéticos.

Materiales y métodos

La investigación es de enfoque cuantitativo, nivel explicativo con la variable independiente aplicación adecuada de los fertilizantes sintéticos y la variable dependiente producción alimentaria medioambientalmente responsable. El diseño es *ex post facto*, basado en datos publicados en revistas indexadas en Scopus.

Universo

Cultivos en los que se aplicaron fertilizantes nitrogenados y se midieron las emisiones de N₂O.

Muestra

Intencional, 15 casos en los que aplicaron fertilizantes nitrogenados y se midieron las emisiones, para cultivos de arroz, trigo y maíz.

Procedimiento

Se elaboró un formato para el recojo de datos, con criterios de inclusión, como publicaciones en Scopus de 2023 o 2024, que tengan aplicaciones de fertilizantes nitrogenados combinados con otros y además, con mediciones de emisiones de N₂O. Se aplicó Shapiro-Wilk para establecer la normalidad de los datos y consecuentemente, se optó por t de Student para una muestra.

Resultados y discusión

Estrategias del uso eficiente de los fertilizantes para mejorar la productividad alimentaria global responsablemente

La aplicación de fertilizantes nitrogenados orgánicos e inorgánicos es crucial para mejorar la productividad alimentaria, pero su eficacia depende de las estrategias de aplicación, que maximicen la utilización del nitrógeno por las plantas y minimicen las emisiones al ambiente. A continuación, se presentan algunas estrategias clave para la aplicación de fertilizantes nitrogenados.



Rotaciones de cultivos con plantas fijadoras de nitrógeno

Es fundamental conocer las características del suelo y el clima de la región para realizar una rotación de cultivo efectiva. Las leguminosas como los chícharos, lentejas, alfalfa, soja, etc. representan un grupo muy diverso de plantas que contribuyen a la fertilidad del suelo, mediante la fijación de nitrógeno, al formar simbiosis con los rizobios (Pérez-Peralta *et al.*, 2019). Las plantas fijadoras de nitrógeno tienen en sus raíces bacterias capaces de extraer dinitrógeno (N_2) de la atmósfera y convertirlo en amoníaco (NH_3) que forma parte del proceso de la planta para contar con un suelo fértil y potenciar la productividad de los cultivos.

Optimización de la aplicación de fertilizantes

Elegir el tipo y la dosis de fertilizante, así como su momento de aplicación, puede reducir la emisión de N_2O . Las aplicaciones más frecuentes y en menor cantidad suelen ser más eficientes que las aplicaciones grandes y espaciadas (Lu y Tian, 2017). Además, la cantidad de agua en el riego, la temperatura y el tipo de suelo, son variables para considerar para la dosificación del fertilizante, siendo uno de los más utilizados la urea (CH_4N_2O), por su solubilidad en agua, su estabilidad química y su bajo costo frente a otros fertilizantes.

Tecnología de inhibidores de la nitrificación

Esta tecnología comprende dos fases, la más conocida por su fácil absorción es la fase de nitrato y la fase más delicada es la amoniacial (proveniente de la urea), pero ambas son requeridas para la nutrición de las plantas. Los inhibidores de la nitrificación son compuestos que se añaden a los fertilizantes nitrogenados, para reducir las pérdidas de nitrógeno por lixiviación o volatilización, cuando el cultivo se compone a condiciones como temperatura y humedad del entorno, lo que permite una mayor productividad de los cultivos y reduce la emisión al medio ambiente del N_2O (Lam *et al.*, 2017).

Modificación del tipo de suelo y de la cobertura

La modificación de la estructura del suelo, mediante técnicas como la adición de materia orgánica puede aumentar la porosidad del suelo y reducir la acumulación de gases de efecto invernadero. La combinación de fertilizantes nitrogenados inorgánicos y materia orgánica puede ofrecer sinergias significativas. Los estudios han demostrado que la integración de estas dos prácticas puede mejorar la eficiencia del uso de nitrógeno y reducir las pérdidas de nutrientes por lixiviación o volatilización; asimismo, mejorar la calidad (Ishfaq *et al.*, 2023).

Agricultura de precisión: análisis de suelo y fertilización basada en datos

La agricultura de precisión (AP) conocida también como agricultura por satélite, consiste en realizar el análisis del suelo para determinar las necesidades de fertilizantes como el nitrógeno, que posibilita una aplicación más precisa y eficiente del fertilizante, evitando aplicaciones excesivas y mejorando la eficiencia del uso del nitrógeno (Heffer y Prud'homme, 2017). En ese mismo orden de ideas, Coello *et al.* (2025) consideran primordial contar con conjuntos de datos precisos, para efectuar análisis exhaustivos que respalden la toma de decisiones informada y la formulación de políticas en áreas críticas como la seguridad alimentaria o el cambio climático, mediante el empleo de modelos de aprendizaje automático, como los algoritmos eXtreme Gradient Boosting e Hist Gradient Boosting, para la predicción de las tasas de aplicación de nitrógeno (N) entre otros fertilizantes y servir como insumo para diversas aplicaciones, incluido el modelado ambiental, el análisis causal, las predicciones de precios de fertilizantes y los pronósticos.

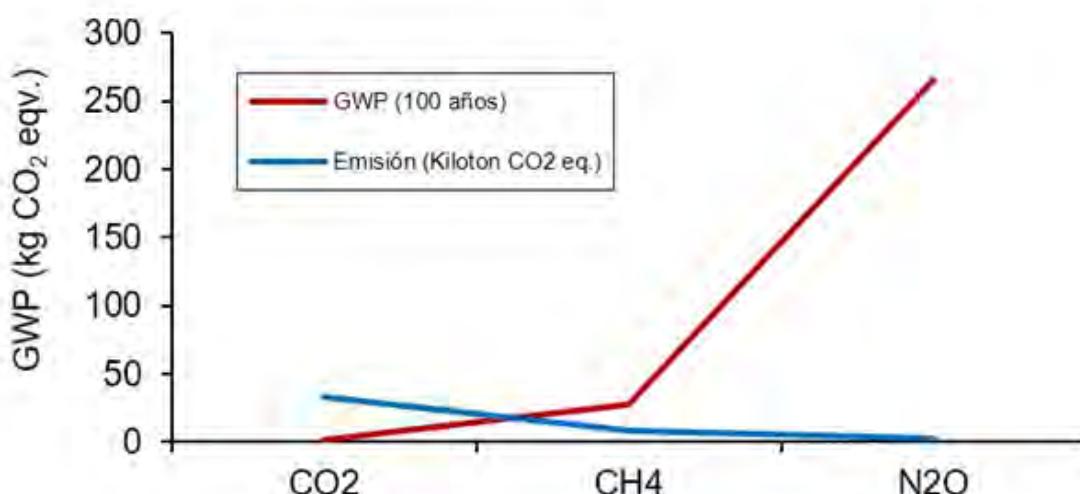
Reducción de N_2O proveniente del sector agrario en la mitigación de los GEI

El potencial de calentamiento global (PCG o GWP) por sus siglas en inglés se define como una medida que permite comparar el impacto de diversos gases en el calentamiento global, indicando

cuánta energía absorberán las emisiones de una tonelada de un gas durante un período específico, en relación con una tonelada de CO₂. Un PCG mayor significa que un gas contribuye más al calentamiento de la Tierra que el CO₂ durante ese período que suele ser de 100 años (Wypych, 2023).

Los principales GEI que contribuyen al cambio climático, de mayor a menor proporción en emisión, expresados en (Kilotón CO₂ eq.), son el dióxido de carbono CO₂, el metano (CH₄) y el óxido nitroso (N₂O), entre otros. Pero en sentido contrario, se tiene el potencial de calentamiento global (PCG o GWP), como se muestra en la Figura 3; concretamente, la emisión del óxido nitroso (N₂O) es menor en comparación con el dióxido de carbono (CO₂); sin embargo, su potencial de calentamiento global es aproximadamente 300 veces mayor a la del CO₂ en un lapso de 100 años, como lo mencionan Griffis *et al.* (2017); Wypych (2023); Lagos (2025).

Figura 3. Emisión de GEI y potencial de calentamiento global (GWP). Elaboración con data secundaria.



Los sistemas alimentarios son responsables de un tercio de las emisiones antropogénicas globales de GEI, incluye a diversos sectores económicos, ya que los alimentos se cultivan, cosechan, transportan, procesan, envasan, distribuyen y cocinan, todo este proceso requiere consumo de energía (Crippa *et al.*, 2021). La declaración de Colombo hace un llamado al mundo, a reducir el desperdicio de nitrógeno a la mitad para el año 2030, para ahorrar 100 000 millones de dólares anuales a nivel mundial, considerando esta estimación en la mitad del valor de las ventas de los fertilizantes sintéticos.

Wu *et al.* (2023) señalan que, la dosificación de fertilizantes minerales y orgánicos, la modalidad de riego, la porción de paja devuelta, la labranza cero y la hondura de labranza fueron factores determinantes para regular las emisiones de los GEI.

En el Cuadro 1 se muestran 15 estudios publicados en revistas indexadas en Scopus, que evidencian los efectos de reducción porcentual de la emisión del óxido nitroso (N₂O), mediante estrategias eficientes aplicadas en los cultivos de arroz, trigo y maíz. Se usaron fertilizantes nitrogenados sintéticos, con adición de biocarbón, minerales como wollastonita o escoria de hierro, pajas o abono orgánico, entre otros.



Cuadro 1. Estrategias de cultivos alimentarios y reducción de la emisión del N₂O reportados los años 2023 y 2024.

Autor	Estrategia fertilizante sintético +	Reducción de N ₂ O (%)
Sun <i>et al.</i> (2024)	Biocarbón de paja A	25
Lu <i>et al.</i> (2024)	Biocarbón de paja G	17.5
Zhou <i>et al.</i> (2023)	Biocarbón de tallo de maíz	25.6
Valkama <i>et al.</i> (2024)	Biocarbón/cereales	25
Li <i>et al.</i> (2024)	Biocarbón/hortalizas	18.7
Zhang <i>et al.</i> (2024)	Biocarbón y rotación a-t	13.05
Shrestha <i>et al.</i> (2023)	Biocarbón	18
Chen <i>et al.</i> (2024)	Wollastonita (mineral)+calor	47.76
Galgo <i>et al.</i> (2024)	Escoria de hierro	40
Wang <i>et al.</i> (2024)	Rotación cultivos de arroz-colza	17.9
Dos Reis <i>et al.</i> (2024)	Pastisales (-N) F2F granja	15
Zhu <i>et al.</i> (2024)	Rizobionte en raíces del maíz	36
Liu <i>et al.</i> (2023)	Cultivo ajo-maíz	40.1
Chiaravalloti <i>et al.</i> (2023)	Suelo con basalto de grano	30.5
Bi <i>et al.</i> (2023)	Abono orgánico al 50%	30.8

Para aplicar t de Student para una muestra, como prueba de hipótesis, se consideró como comparativo esperado el 10%, en base a que los insumos de material orgánico en general (residuos de cultivos, estiércol, digestato, compost y biocarbón), tienden a reducir las emisiones de N₂O en un 10% (n= 53) (Valkama *et al.*, 2024).

La aplicación del estadístico t respecto a la reducción porcentual de las emisiones de N₂O para los 15 casos experimentales, del cultivo de trigo, arroz y maíz, se muestra en el Cuadro 2 lo obtenido con una significancia del 1% (*p*= 0) lo que permitió rechazar la hipótesis nula y consecuentemente, se puede afirmar que, las estrategias mostradas sobre el uso de fertilizantes nitrogenados en los cultivos, reduce la emisión del óxido nitroso mitigando este gas de efecto invernadero y posibilitando la producción alimentaria medioambientalmente responsable.

Cuadro 2. Aplicación de t de Student para una muestra de la reducción de N₂O, con valor de prueba= 10.

t	gl	Sig. (bilateral)	Diferencia de medias	99% de intervalo de confianza de la diferencia	
				Inferior	Superior
Reducción de N ₂ O (%)	6.158	14	0	16.72733	8.6407 24.8139

En la agricultura a gran escala, el fertilizante nitrogenado inorgánico como la urea (con N= 46%) resulta imprescindible para la mejora del suelo, pero genera óxido nitroso. Es cierto, que su emisión es menor que la del dióxido de carbono, pero su potencial de calentamiento global es casi 300 veces mayor a la del CO₂. En tal sentido, coincidimos con Wang *et al.* (2024) que sostienen la necesidad de prácticas de labranza que armonicen la productividad y el respeto al medio ambiente.

El uso eficiente de los fertilizantes nitrogenados inorgánicos y orgánicos, la implementación de cultivos de manera sostenible como la rotación en la siembra, los inhibidores de la nitrificación, la gestión del suelo y agua, minimizan el impacto del óxido nitroso sobre el medioambiente como lo revelan Lu y Tian (2017); Lam *et al.* (2017); Ishfaq *et al.* (2023) lo cual se evidencia en este estudio. Es tendencia la agricultura satelital, que usa los sistemas de información geográfica como el GPS e imágenes satelitales, que monitorean los cultivos, para una toma de decisión informada, sobre aplicación de fertilizantes en la dosis y momento adecuado, optimizando los cultivos, reduciendo costos y mitigando las emisiones, posibilitando la atención de los objetivos de desarrollo sostenible

dos y trece. Es posible mitigar el N₂O con el uso del biocarbón (descomposición térmica de los desechos agrícolas), la rotación de cultivos, la incorporación de minerales como Wollastonita, rizobionte en las raíces e incorporación del abono orgánico.

Conclusiones

Se identificaron estrategias del uso eficiente de los fertilizantes sintéticos (caso urea), como la rotación en la siembra, los inhibidores de la nitrificación, la gestión del suelo con biocarbón y minerales, gestión de la cantidad de agua y la agricultura de precisión. Logrando impactar significativamente en una reducción del óxido nitroso de 26.7% en promedio, como resultado de las estrategias aplicadas, principalmente en cultivos de trigo, arroz y maíz.

Bibliografía

- 1 Aguilera, E.; Piñero, P.; Infante, J.; González-Molina, M.; Lassaletta, L. y Sanz, A. 2020. Emisiones de gases de efecto invernadero en el sistema agroalimentario y huella de carbono de la alimentación en España. Real Academia de Ingeniería. Madrid, España. 110 p. ISBN: 978-84-95662-77-4.2.
- 2 Bi, R.; Xu, X.; Zhan, L.; Chen, A.; Zhang, Q. and Xiong, Z. 2023. Proper organic substitution attenuated both N₂O and NO emissions derived from AOB in vegetable soils by enhancing the proportion of Nitrosomonas. *Science of the Total Environment*. 866:1-12. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.161231>.
- 3 Castro-Arce, K. and Vanclay, F. M. 2020. Transformative social innovation for sustainable rural development: an analytical framework to assist community-based initiatives. *Journal of Rural Studies*. 74:45-54. <https://doi.org/10.1016/j.jrurstud.2019.11.010>.
- 4 Chen, H.; Liu, C.; Sun, Q.; Li, B.; Jiang, Q. and Wang, Z. 2024. Wollastonite addition can significantly inhibit greenhouse gas emissions of freeze-thaw farmland soil. *Environmental Technology & Innovation*. 34:1-12. <https://doi.org/10.1016/j.eti.2024.103547>.
- 5 Chiaravalloti, I.; Theunissen, N.; Shuang, Z.; Wang, J.; Fengchao, S.; Ahmed, A.; Pihlap, E.; Reinhard, C. and Planavsky J. 2023. Mitigation of soil nitrous oxide emissions during maize production with basalt amendments. *Frontiers in Climate*. 5:4-6. 10.3389/fclim.2023.1203043.
- 6 Coello, F.; Decorte, T.; Janssens, I.; Mortier, S.; Sardans, J.; Peñuelas, J. and Verdonck, T. 2025. Conjunto de datos globales de fertilización específica de cultivos. *Sci Data*. 12(40):1961-2019. <https://doi.org/10.1038/s41597-024-04215-x>.
- 7 Crippa, M.; Solazzo, E.; Guizzardi, D.; Monforti-Ferrario, F.; Tubiello, F. and Leip, A. 2021. Los sistemas alimentarios son responsables de un tercio de las emisiones antropogénicas globales de GEI. *Nature Food*. 2(3):198-209. <https://doi.org/10.1038/s43016-021-00225-9>.
- 8 Dos Reis, M.; Ammann, C.; Boos, C.; Calanca, P.; Kiese, R.; Wolf, B. and Keel, S. 2024. Reducing N fertilization in the framework of the European farm to fork strategy under global change: impacts on yields, N₂O emissions and N leaching of temperate grasslands in the alpine region. *Agricultural Systems*. 219:1-9. <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2024.104036>.
- 9 EPA. 2025. Agencia de protección ambiental de Estados Unidos. Emisiones de óxido nitroso. <https://espanol.epa.gov/la-energia-y-el-medioambiente/emisiones-de-oxido-nitroso>.
- 10 FAO. 2017. Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. Apreciar el suelo sobre el que caminamos. <https://www.fao.org/newsroom/story/Cherishing-the-ground-we-walk-on/es>.
- 11 Galgo, J. C.; Canatoy, R. C.; Lim, J. Y.; Park, H. C. and Kim, P. J. 2024. A potential of iron slag-based soil amendment as a suppressor of greenhouse gas (CH₄ and N₂O) emissions in rice paddy. *Frontiers in Environmental Science*. 12:1-12. 10.3389/fenvs.2024.1290969.

- 12 Griffis, T. J.; Chen, Z.; Baker, J. M.; Wood, J. D.; Millet, D. B.; Lee, X.; Venterea, R. T. and Turner, P. A. 2017. Nitrous oxide emissions are enhanced in a warmer and wetter world. *Proceedings of the National Academy of Sciences.* 114(45)12081-12085. <https://doi.org/10.1073/pnas.1704552114>.
- 13 Heffer, P. and Prud'homme, M. 2017. Fertilizer outlook 2017-2021. International Fertilizer Association (IFA). 2-7 pp. <https://www.fertilizer.org/wp-content/uploads/2023/01/2017-IFA-Annual-Conference-Marrakech-PIT-AG-Fertilizer-Outlook.pdf>.
- 14 Hu, Y.; Su, M. and Jiao, L. 2023. Peak and fall of China's agricultural GHG emissions, *Journal of Cleaner Production.* 389:1-10. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.136035>.
- 15 IFA. 2024. International Fertilizer Association. ¿Qué son los fertilizantes? <https://www.fertilizer.org/about-fertilizers/what-are-fertilizers/>.
- 16 Ishfaq, M.; Wang, Y.; Xu, J.; UI, M.; Yuan, H.; Liu, L. y He, B. 2023. Mejora de la calidad nutricional de los cultivos alimentarios con fertilizantes: un metaanálisis. *Agronom.* 43(74):1-35. <https://doi.org/10.1007/s13593-023-00923-7>.
- 17 Lagos, A. 2025. Weya Academy. ¿Qué es el potencial de calentamiento global? <https://weya.academy/co2-equivalente/#elementor-toc-heading-anchor-7>.
- 18 Lam, S. K.; Suter, H.; Mosier, A. R. y Chen, D. 2017. Uso de inhibidores de la nitrificación para mitigar las emisiones agrícolas de N₂O ¿un arma de doble filo? *Global Change Biology.* 23:485-489. <https://doi.org/10.1111/gcb.13338>.
- 19 Li, H.; Lin, L.; Peng, Y.; Hao, Y.; Li, Z.; Li, J.; Yu, M.; Li, X.; Lu, Y.; Gu, W. and Zhang, B. 2024. Biochar's dual role in greenhouse gas emissions: nitrogen fertilization dependency and mitigation potential. *Science of The Total Environment.* 917:1-12. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.170293>.
- 20 Liu, D.; Dong, H.; Ma, C.; Mo, Q.; Liu, B.; Irshad, A.; Li, H.; Yang, B.; Ding, R.; Shayakhmetova, A.; Zhang, X. and Han, Q. 2023. Inhibiting N₂O emissions and improving environmental benefits by integrating garlic growing in grain production systems. *Agriculture, Ecosystems & Environment.* 347:1-10. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2023.108371>.
- 21 Lu, C. y Tian, H. 2017. Uso global de fertilizantes de nitrógeno y fósforo para la producción agrícola. *Earth Syst. Sci. Data.* 9(1):181-192. <https://doi.org/10.5194/essd-9-181-2017>.
- 22 Lu, J.; Zhang, W.; Liu, X.; Khan, A.; Wang, W.; Ge, J.; Yan, S. and Xiong, Y. 2024. Can converting raw straw into biochar incorporation achieve both higher maize yield and lower greenhouse gas emissions intensity in drought-prone environment? *Environmental Technology & Innovation.* 35:1-15. <https://doi.org/10.1016/j.eti.2024.103683>.
- 23 NOAA Research. 2025. Emisión de óxido nitroso. NOAA <https://research.noaa.gov/nitrous-oxide-emissions-grew-40-percent-from1980to2020-accelerating-climate-change/>.
- 24 Pérez-Peralta, P.; Ferrera-Cerrato, R.; Alarcón, A.; Trejo-Téllez, L.; Cruz-Ortega, R. y Silva-Rojas, H. 2019. Respuesta del simbiosistema frijol (*Phaseolus vulgaris* L.) y *Rhizobium tropici* CIAT899 ante el efecto alelopático de *Ipomoea purpurea* L. Roth. *Revista Argentina de Microbiología.* 51(1):47-55. <https://doi.org/10.1016/j.ram.2018.01.006>.
- 25 Shrestha, R. K.; Jacinthe, P. A.; Lal, R.; Lorenz, K.; Singh, M. P.; Demyan, S. M.; Ren, W. and Lindsey, L. E. 2023. Biochar as a negative emission technology: a synthesis of field research on greenhouse gas emissions. *Journal of Environmental Quality.* 52(4):769-798. <https://doi.org/10.1002/jeq2.20475>.
- 26 Sun, H.; Zhang, X.; Zhang, J.; Wang, C. and Zhou, S. 2024. Long term comparison of GHG emissions and crop yields in response to direct straw or biochar incorporation in rice-wheat rotation systems: a 10-year field observation. *Agriculture, Ecosystems & Environment.* 374:1-11. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2024.109188>.
- 27 Valkama, E.; Tzemi, D.; Esparza-Robles, U. R.; Syp, A.; O'Toole, A. and Maenhout, P. 2024. Effectiveness of soil management strategies for mitigation of N₂O emissions in European

- arable land: a meta-analysis. European Journal of Soil Science. 75(3):e13488. <https://doi.org/10.1111/ejss.13488>.
- 28 Wang, C.; Wang, Z.; Liu, M.; Batool, M.; El-Badri, A.; Wang, X.; Lou, H.; Shao, D.; Tan, X.; Li, Z.; Kuai, J.; Wang, B.; Wang, J.; Xu, Z.; Zhou, G.; Jiang, D. and Zhao, J. (2024). Optimizing tillage regimes in rice-rapeseed rotation system to enhance crop yield and environmental sustainability. Field Crops Research. 318:1-12. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2024.109614>.
- 29 Wu, Q.; Wang, J.; He, J.; Liu, Y. y Jiang, Q. 2023. Evaluación cuantitativa y estrategias de mitigación de las emisiones de GEI de los arrozales en China: basado en datos y modelado estadístico. Computers and Electronics in Agriculture. 210:1-12. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2023.107929>.
- 30 Wypych, A. 2023. Information on data fields. Editorial ChemTec Publishing. 2da. Edición. Ontario, Canada. 3-16 pp. <https://doi.org/10.1016/B978-1-77467-012-5.50005-6>.
- 31 Yang, X.; Xiong, J.; Du, T.; Ju, X.; Gan, Y.; Li, S.; Xia, L.; Shen, Y.; Pacenka, S.; Siddique, K.; Kang, S. y Butterbach-Bahl, K. 2024. La diversificación de la rotación de cultivos aumenta la producción de alimentos, reduce las emisiones netas de gases de efecto invernadero y mejora la salud del suelo. Nature Communications. 15(198):1-14. <https://doi.org/10.1038/s41467-023-44464-9>.
- 32 Zabaloy, M. 2021. Una sola salud: la salud del suelo y su vínculo con la salud humana. Revista Argentina de Microbiología. 53(4):275-276. <https://doi.org/10.1016/j.ram.2021.11.001>.
- 33 Zhang, L.; Zhang, F.; Zhang, K.; Liao, P. and Xu, Q. 2024. Effect of agricultural management practices on rice yield and greenhouse gas emissions in the rice wheat rotation system in China. Science of The Total Environment. 196:1-12. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.170307>.
- 34 Zhou, Y.; Li, D.; Li, Z.; Guo, S.; Chen, Z.; Wu, L. and Zhao, Y. 2023. Greenhouse gas emissions from soils amended with cornstalk biochar at different addition ratios. International Journal of Environmental Research and Public Health. 20(927):1-13. <https://doi.org/10.3390/ijerph20020927>.
- 35 Zhu, Y.; Qu, Z.; Zhao, J.; Wang, J.; Wei, D. and Meng, Q. 2024. Can high-yielding maize system decrease greenhouse gas emissions largely while simultaneously enhancing economic and ecosystem benefits through the 'Rhizobiont' concept? evidence from field. Science of the Total Environment. 914:1-12. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.169889>.





Estrategias de aplicación de fertilizantes sintéticos para la producción alimentaria medioambiental responsable

Journal Information
Journal ID (publisher-id): remexca
Title: Revista mexicana de ciencias agrícolas
Abbreviated Title: Rev. Mex. Cienc. Agríc.
ISSN (print): 2007-0934
Publisher: Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias

Article/Issue Information
Date received: 01 November 2025
Date accepted: 01 February 2026
Publication date: 01 January 2026
Publication date: Jan-Feb 2026
Volume: 17
Issue: 1
Electronic Location Identifier: e3871
DOI: 10.29312/remexca.v17i1.3871

Categories

Subject: Artículos

Palabras clave:

Palabras clave:

fertilizantes
óxido nitroso
cambio climático

Counts

Figures: 3

Tables: 2

Equations: 0

References: 35