



Nanofertilizantes en el suelo y emisiones de óxido nitroso

Producto 10: Documento de investigación que evidencie el efecto de la aplicación de los nanofertilizantes sobre las emisiones de óxido nitroso y dióxido de carbono edáfico.

Andrés Camilo Meléndez Arenales, Julián Mauricio Botero Londoño, Mónica Andrea Botero Londoño y Erika Mayerly Celis Celis.

2025



Códigos JEL: Q16

ISBN:

FONTAGRO (Fondo Regional de Tecnología Agropecuaria) es un mecanismo único de cooperación técnica entre países de América Latina, el Caribe y España, que promueve la competitividad y la seguridad alimentaria. Las opiniones expresadas en esta publicación son de los autores y no necesariamente reflejan el punto de vista del Banco Interamericano de Desarrollo (BID), del Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura (IICA), FONTAGRO, de sus Directorios Ejecutivos ni de los países que representan.

El presente documento ha sido preparado por Mónica Andrea Botero Londoño, tomando como base algunos de los estudios realizados por el estudiante de pregrado del programa de Zootecnia de la Universidad Industrial de Santander Andrés Camilo Meléndez Arenales en el proyecto de grado titulado: “Fertilización y nanotecnología en la producción intensiva de forrajes bajo condiciones de invernadero”

Copyright © 2025 Banco Interamericano de Desarrollo. Esta obra se encuentra sujeta a una licencia Creative Commons IGO 3.0 Reconocimiento-NoComercial- SinObrasDerivadas (CC-IGO 3.0 BY-NC-ND) (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/3.0/igo/legalcode>) y puede ser reproducida para cualquier uso no comercial otorgando el reconocimiento respectivo al BID. No se permiten obras derivadas. Cualquier disputa relacionada con el uso de las obras del BID que no pueda resolverse amistosamente se someterá a arbitraje de conformidad con las reglas de la CNUDMI (UNCITRAL). El uso del nombre del BID para cualquier fin distinto al reconocimiento respectivo y el uso del logotipo del BID no están autorizados por esta licencia CC-IGO y requieren de un acuerdo de licencia adicional. Note que el enlace URL incluye términos y condiciones adicionales de esta licencia.

Esta publicación puede solicitarse a:

FONTAGRO

Correo electrónico: fontagro@fontagro.org

www.fontagro.org



Tabla de Contenidos

Resumen.....	6
Abstract	6
Resumen ejecutivo.....	7
Introducción	8
Objetivos	9
Objetivo General.....	9
Objetivo Específico.....	9
Marco teórico.....	9
Uso de fertilizantes en la agricultura y sus implicaciones ambientales	9
Emisiones de CO ₂ y N ₂ O en la agricultura	10
Nanotecnología en la agricultura	10
Metodología	10
Cultivos de <i>Lolium perenne</i> bajo condiciones de invernadero	10
Ubicación	10
Nanoestructuración y caracterización de nanopartículas.....	11
Establecimiento del cultivo	11
Diseño experimental	11
Captura de carbono	13
Eficiencia en la recuperación del nitrógeno (ERN).....	13
Análisis estadístico	13
Sistemas de pastoreo rotacional.....	13
Ubicación	13
Diseño experimental	14



Emisiones de CO ₂ y N ₂ O	14
Análisis estadístico	15
Resultados	15
Cultivos de <i>Lolium perenne</i> bajo condiciones de invernadero	15
Emisiones edáficas de CO ₂	15
Contenido y captura de carbono en las plantas.....	18
Emisiones edáficas de N ₂ O.....	19
Sistemas de pastoreo rotacional.....	21
Emisiones edáficas de CO ₂	21
Concentración y captura de carbono.....	22
Emisiones edáficas de N ₂ O.....	23
Conclusiones y recomendaciones.....	25
Referencias Bibliográficas	26
Instituciones participantes.....	30



INDICE DE GRÁFICOS

Gráfico 1. Dinámica del CO ₂ en las cámaras.	17
Gráfico 2. Emisiones y captura de CO ₂ en el tiempo por hectárea.	17
Gráfico 3. Concentración de carbono en <i>L. perenne</i>	18
Gráfico 4. Captura de carbono de <i>L. perenne</i> por ha-año.	19
Gráfico 5. Emisiones de óxido nitroso flujo equivalente ($\mu\text{g N}_2\text{O-N m}^{-2} \text{ h}^{-1}$).	20
Gráfico 6. Eficiencia en la recuperación del nitrógeno.	20
Gráfico 7. Concentración de CO ₂ (ppm) en el aire dentro de las cámaras.	21
Gráfico 8. Emisiones de CO ₂ expresadas como kg CO ₂ ha ⁻¹ por periodo (0–30 y 30–60 min).	22
Gráfico 9. Concentración (a) y captura de carbono (b) en plantas de <i>Cenchrus clandestinus</i>	23
Gráfico 10. Emisiones de óxido nitroso flujo equivalente ($\mu\text{g N}_2\text{O-N m}^{-2} \text{ h}^{-1}$).	24
Gráfico 11. Eficiencia en la recuperación del nitrógeno.	24



RESUMEN

Este documento, desarrollado en el marco del proyecto "Nanofertilizantes en el suelo y emisiones de óxido nitroso", financiado por FONTAGRO y ejecutado por la Universidad Industrial de Santander (Colombia) y la Universidad Técnica de Manabí (Ecuador), presenta el producto 10, en el cual se analiza el efecto de los nanofertilizantes sobre las emisiones edáficas de dióxido de carbono (CO_2) y óxido nitroso (N_2O). La investigación se realizó en condiciones de invernadero en la sede Málaga de la Universidad Industrial de Santander, donde se aplicaron tratamientos con nanozeolita y óxido de zinc en cultivos de *Lolium perenne*, así como en los predios La Bricha y El Palmar, Villa Lorena y La Llanada, en sistemas de rotación de potreros con fertilizantes balanceados y mezclas con nanozeolita. Las emisiones de CO_2 y N_2O se evaluaron mediante cámaras de vidrio colocadas sobre el suelo tras la aplicación de los tratamientos. Los resultados mostraron que la aplicación de nanopartículas incrementó la emisión inicial de CO_2 , vinculada a una mayor actividad biológica, seguida por una significativa captación de carbono en las plantas. Además, la presencia de nanopartículas mejoró notablemente la eficiencia en el uso del nitrógeno, reduciendo de manera significativa las emisiones de N_2O y promoviendo un manejo más sostenible del suelo.

ABSTRACT

This document, developed within the framework of the "Nanofertilizers in Soil and Nitrous Oxide Emissions" project, funded by FONTAGRO and implemented by the Universidad Industrial de Santander (Colombia) and the Universidad Técnica de Manabí (Ecuador), presents Product 10, which analyzes the effect of nanofertilizers on soil emissions of carbon dioxide (CO_2) and nitrous oxide (N_2O). The study was conducted under greenhouse conditions at the Málaga campus of the Universidad Industrial de Santander, where treatments with nanozeolite and zinc oxide were applied to *Lolium perenne* crops, as well as at field sites La Bricha and El Palmar, Villa Lorena, and La Llanada, in rotational grazing systems with balanced fertilizers and mixtures containing nanozeolite. CO_2 and N_2O emissions were assessed using glass chambers placed over the soil following the treatments. The results demonstrated that the application of nanoparticles initially increased CO_2 emissions, linked to enhanced biological activity, followed by a significant uptake of carbon by the plants. Additionally, the presence of nanoparticles markedly improved nitrogen use efficiency, significantly reducing N_2O emissions and promoting a more sustainable soil management approach.



RESUMEN EJECUTIVO

El presente documento tiene como objetivo evaluar el efecto de mezclas de fertilizantes con nanopartículas de zeolita y óxido de zinc sobre las emisiones de dióxido de carbono (CO_2) y óxido nitroso (N_2O) en cultivos de *Lolium perenne* bajo condiciones de invernadero, y evaluar el efecto de mezclas de fertilizantes con nanopartículas de zeolita sobre las emisiones de CO_2 y N_2O en sistemas de pastoreo rotacional. La investigación se realizó en el invernadero de la Universidad Industrial de Santander, sede Málaga, y en los predios La Bricha, El Palmar, Villa Lorena y La Llanada. En las condiciones de invernadero, se emplearon 30 bandejas de poliestireno (29 x 44 x 20 cm) llenas con 14 kg de suelo Inceptisol, donde se sembraron plantas de *Lolium perenne*. Los resultados mostraron que la fertilización, especialmente con nanopartículas, incrementa la actividad microbiana y las emisiones iniciales de CO_2 , pero también favorece una mayor captación de carbono, proceso potenciado por la presencia de biomasa vegetal (hojas). La interacción entre fertilización, nanopartículas y material vegetal resulta clave para optimizar la captura de carbono y reducir emisiones en prácticas sostenibles. Además, las nanopartículas de ZnO y zeolita redujeron significativamente las emisiones de N_2O , con disminuciones cercanas al 62,2% y 57,3% en tratamientos con 4 g de fertilizante, atribuibles a su capacidad catalítica y de retención de nitrógeno, que mejoran su absorción y disminuyen las vías de producción de N_2O . Para los sistemas de rotación de potreros, se utilizó un diseño experimental de bloques completos al azar con cinco tratamientos y cuatro repeticiones, en el que las emisiones de CO_2 y N_2O mostraron diferencias significativas ($p < 0.05$). La fertilización aumentó las emisiones de CO_2 , especialmente en tratamientos con nanopartículas de zeolita, pero también promovió una mayor captación de carbono en las plantas, con incrementos de hasta el 54,9% entre 30 y 60 minutos en tratamientos con 20 g de fertilizante. En suelos desnudos, las emisiones alcanzaron 7934 g de CO_2 por ha en una hora tras la fertilización. Las emisiones de N_2O aumentaron con la fertilización convencional, pero las nanopartículas de zeolita lograron reducirlas significativamente, en un 27,7% y 25,3% en tratamientos con 20 g y 30 g de fertilizante, respectivamente, debido a su capacidad de retener nitratos, mejorar la aireación del suelo y reducir condiciones anaeróbicas, promoviendo un uso más eficiente del nitrógeno en la agricultura sostenible.

Palabras Clave: Nanofertilizantes, emisiones de CO_2 , captura de carbono, emisiones de N_2O , eficiencia de recuperación del nitrógeno.



INTRODUCCIÓN

El cambio climático, el crecimiento de las ciudades, la poca disponibilidad de espacio para cultivar, el manejo inadecuado de los recursos naturales y los problemas medioambientales relacionados con el uso de fertilizantes, representan desafíos para el sector agrícola (Chen & Yada, 2011), dado que con el incremento de la población se hace necesario aumentar la producción de alimentos para satisfacer la elevada demanda a nivel mundial, pues se estima que para el año 2050 se tendrá que alimentar a cerca de 9 a 10 mil millones de personas (Scott et al., 2018). En consecuencia, se vuelve imperativo el empleo de fertilizantes que favorezcan la producción agrícola.

El incremento de la productividad agrícola supondría también un aumento en los efectos negativos sobre el medio ambiente y el ecosistema edáfico implicados en el uso de altas cantidades de fertilizantes, tales como mayor generación de gases de efecto invernadero (CO_2 , N_2O , CH_4) y contaminación de diversos ecosistemas. De acuerdo con Usman et al. (2020), para producir 3 mil millones de toneladas de alimentos se requiere del uso de 187 millones de toneladas de fertilizante, debido a la baja asimilación de los fertilizantes existentes por parte de las plantas que oscilan entre el 20 y el 40%, lo que indica pérdidas significativas de hasta 80%, e influye negativamente en la economía del agricultor, y en la contaminación ambiental (Grageda-Cabrera et al., 2018). Se estima que la generación de gases de efecto invernadero será de 2,69 % anual, con un aporte importante por parte del sector agrícola, lo que resulta preocupante pues estos gases son responsables directos del aumento de la temperatura del planeta (González-Estrada & Camacho Amador, 2017; Karthiyayini, 2018).

En este contexto, la nanotecnología se presenta como una alternativa que permitiría sortear la problemática anteriormente planteada, pues diversos estudios han demostrado que al adicionar nanopartículas en la fertilización se incrementa la eficiencia al facilitar el rápido acceso de nutrientes a las plantas, interviene en la mitigación de gases de efecto invernadero, contribuye a la ecología y a la reducción de los costos de producción por la disminución del uso de soluciones nutritivas (Méndez Argüello et al., 2018; Mohanraj et al., 2019; Solanki et al., 2015). Además, puede ser aplicable a distintos tipos de cultivos, así como en la producción de forrajes; presentan un alto potencial para la síntesis de biocombustibles y poseen la capacidad de capturar grandes cantidades de carbono (Aga Vera & Rodríguez Gordillo, 2021; Cárdenas et al., 2012).

Como respuesta a lo anterior, este documento presenta el efecto de la aplicación de mezclas de fertilizantes con nanopartículas de zeolita y óxido de zinc sobre las emisiones de dióxido de carbono (CO_2) y óxido nitroso (N_2O) en cultivos de *Lolium perenne* bajo condiciones de invernadero, así como el impacto de las mezclas de fertilizantes con nanopartículas de zeolita sobre estas mismas emisiones en sistemas de pastoreo rotacional.



OBJETIVOS

Objetivo General

- Evaluar el efecto de la aplicación de mezclas de fertilizantes y nanopartículas de zeolita y óxido de zinc sobre las emisiones edáficas de dióxido de carbono y óxido nitroso.

Objetivo Específico

- Evaluar el efecto de mezclas de fertilizantes con nanopartículas de zeolita y óxido de zinc sobre las emisiones de dióxido de carbono (CO₂) y óxido nitroso (N₂O) en cultivos de *Lolium perenne* bajo condiciones de invernadero.
- Evaluar el efecto de mezclas de fertilizantes con nanopartículas de zeolita sobre las emisiones de dióxido de carbono (CO₂) y óxido nitroso (N₂O) en sistemas de pastoreo rotacional.

MARCO TEÓRICO

Uso de fertilizantes en la agricultura y sus implicaciones ambientales

El aumento sostenido de la productividad agrícola ha estado estrechamente ligado al uso intensivo de fertilizantes sintéticos, especialmente aquellos basados en nitrógeno, fósforo y potasio (Abebe et al., 2022). Si bien estos insumos han permitido incrementar los rendimientos de los cultivos, su aplicación ineficiente ha generado importantes impactos ambientales, entre los que se destacan la emisión de gases de efecto invernadero (GEI), la degradación del suelo y la contaminación de cuerpos de agua superficiales y subterráneos (Hamzah Saleem et al., 2022; Rashmi et al., 2020; Tyagi et al., 2022). En particular, el óxido nitroso (N₂O) es considerado uno de los GEI más relevantes en sistemas agrícolas, debido a su alto potencial de calentamiento global y a su estrecha relación con los procesos de fertilización nitrogenada (Guo et al., 2022; Huang et al., 2023).

La baja eficiencia en el uso de fertilizantes nitrogenados provoca pérdidas significativas por volatilización, lixiviación y desnitrificación, incrementando la huella ambiental de la agricultura (Martínez-Dalmau et al., 2021; Zhang et al., 2015). Estas pérdidas no solo afectan la sostenibilidad de los agroecosistemas, sino que también representan un costo económico considerable para los productores, lo que ha motivado la búsqueda de alternativas tecnológicas que permitan mejorar la eficiencia en el uso de nutrientes (Nakachew et al., 2024; Penuelas et al., 2023).



Emisiones de CO₂ y N₂O en la agricultura

Las emisiones de dióxido de carbono (CO₂) y óxido nitroso (N₂O) en suelos agrícolas están fuertemente influenciadas por el tipo de fertilizante, la dosis aplicada, las condiciones edafoclimáticas y el manejo agronómico del cultivo (Dencsó et al., 2020; Shcherbak et al., 2014). El CO₂ se libera principalmente como resultado de la respiración microbiana y la mineralización de la materia orgánica del suelo, procesos que pueden intensificarse tras la aplicación de fertilizantes que estimulan la actividad biológica (Das et al., 2014; Kosolapova et al., 2016; Rao et al., 2019). Por su parte, el N₂O se produce mayoritariamente durante los procesos microbianos de nitrificación y desnitrificación, los cuales se ven favorecidos por altas concentraciones de nitrógeno mineral, humedad elevada y disponibilidad limitada de oxígeno (Han et al., 2024; Hassan et al., 2022).

Nanotecnología en la agricultura

La nanotecnología ha emergido como una herramienta prometedora para mejorar la eficiencia de los fertilizantes tradicionales y reducir sus impactos ambientales (Yadav, Yadav, Ahmad, et al., 2023). Los nanofertilizantes se caracterizan por una mayor superficie específica, una liberación más controlada de nutrientes y una mejor interacción con el sistema radical de las plantas, lo que favorece una absorción más eficiente de los nutrientes (Fatima et al., 2021; Yadav, Yadav, & Abd-Elsalam, 2023). Diversos estudios han demostrado que la incorporación de nanopartículas en formulaciones fertilizantes puede disminuir las pérdidas de nitrógeno y, en consecuencia, reducir las emisiones de N₂O desde el suelo (Hu et al., 2022; Hube et al., 2022; Ogwugwa & Bandh, 2023).

Adicionalmente, la liberación gradual de nutrientes asociada a los nanomateriales puede disminuir la frecuencia y dosis de aplicación, contribuyendo tanto a la sostenibilidad económica como ambiental de los sistemas productivos (Ditta & Arshad, 2016; Elemike et al., 2019).

METODOLOGÍA

Cultivos de *Lolium perenne* bajo condiciones de invernadero

Ubicación

La investigación se realizó en el invernadero de la Universidad Industrial de Santander, sede Málaga (Santander, Colombia), ubicado a 2.200 msnm. Los análisis de laboratorio se efectuaron en el Laboratorio de Reconversión Ganadera y Agroforestal de la misma sede. Las nanopartículas de zeolita y óxido de zinc fueron nanoestructuradas y caracterizadas en los laboratorios del Parque Tecnológico Guatiguará de la Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga.



Nanoestructuración y caracterización de nanopartículas

El proceso de nanoestructuración se llevó a cabo utilizando un molino de bolas de alta dureza. Se empleó una zeolita natural compuesta por Sodio (Na), Aluminio (Al), Silicio (Si) y Oxígeno (O); y el óxido de zinc se obtuvo a partir de un material comercial. La caracterización fisicoquímica se realizó mediante difracción de rayos X (XRD) y microscopía electrónica de barrido (SEM), técnicas que permitieron determinar la composición química, el tamaño y la morfología de las nanopartículas. Con base en estos resultados, se seleccionaron materiales cuyos tamaños oscilaron entre 22 y 148 nm, predominantemente con morfología esférica, con el objetivo de mejorar su interacción con nutrientes, microorganismos y raíces.

Establecimiento del cultivo

Para el establecimiento del cultivo, se utilizaron 30 bandejas de poliestireno con dimensiones de 29 cm de ancho, 44 cm de largo y 20 cm de profundidad, las cuales se llenaron con 14 kg de un suelo Inceptisol. Este suelo presentaba un pH ligeramente ácido (5,91) y contenidos medios en materia orgánica (5,02%). Sus niveles de nutrientes fueron: bajos en fósforo (8,38 mg kg⁻¹), medios en potasio (0,16 meq 100 g⁻¹ de suelo), medios en calcio (3,2 meq 100 g⁻¹ de suelo), bajos en magnesio (0,42 meq 100 g⁻¹ de suelo), bajos en azufre (8,1 mg kg⁻¹), medios en cobre (1,21 mg kg⁻¹), zinc (2,03 mg kg⁻¹), manganeso (5,71 mg kg⁻¹), altos en hierro (89 mg kg⁻¹) y bajos en boro (0,14 mg kg⁻¹). En cada bandeja se sembraron 4 g de semillas de *Lolium perenne*. La formulación del fertilizante consideró las características del sustrato, los requerimientos de la planta y la eficiencia estimada de los nutrientes. Se diseñó un fertilizante con un contenido de 30,34% de N, 7,47% de P₂O₅, 7,75% de K₂O, 1,80% de MgO y 1,62% de S, balanceado con los siguientes insumos: urea (59,61%), DAP (16,24%), KCl (12,91%), MgSO₄ (10,92%) y azufre (0,31%).

Diseño experimental

Se implementó un diseño completamente al azar con 10 tratamientos, cada uno con 3 réplicas, para un total de 30 unidades experimentales y 4 cortes. Los tratamientos fueron los siguientes:

Control: sustrato sin adición de fertilizantes.

- f4g: 4 g de fertilizante.
- f8g: 8 g de fertilizante.
- f12g: 12 g de fertilizante.
- f4gZnO: 4 g de fertilizante y 200 mg de NPs-ZnO.
- f8gZnO: 8 g de fertilizante y 200 mg de NPs-ZnO.
- f12gZnO: 12 g de fertilizante y 200 mg de NPs-ZnO.
- f4gZe: 4 g de fertilizante y 200 mg de NPs-zeolita.
- f8gZe: 8 g de fertilizante y 200 mg de NPs-zeolita.
- f12gZe: 12 g de fertilizante y 200 mg de NPs-zeolita.

Los tratamientos fueron aplicados un día después de la cosecha del forraje.



Materia seca, carbono y nitrógeno

Los contenidos en materia seca se determinaron mediante secado en horno a 105 °C durante 24 horas. Los contenidos de nitrógeno y carbono se determinaron empleando un analizador elemental (C, H, N, S, O). La captura de carbono del forraje se calculó multiplicando la producción de biomasa en base seca por el porcentaje de carbono presente en cada muestra.

Mediciones de CO₂ y N₂O

Para estimar las emisiones de CO₂ y N₂O en el suelo, se utilizaron cámaras de vidrio de 0,3 m x 0,3 m x 0,3 m (volumen de 0,027 m³) equipadas con jeringas de 50 mL y válvulas de tres pasos, que se instalaron herméticamente en orificios en la parte superior de las cámaras, las cuales fueron instaladas sobre el suelo posterior a la fertilización. Se realizaron muestreos de gases en diferentes intervalos: para CO₂, a los 0, 10, 30 y 60 minutos, y para N₂O, a los 0 y 60 minutos, tras lo cual las muestras fueron analizadas en un cromatógrafo de gases para determinar las concentraciones, permitiendo así calcular las emisiones de ambos gases. Además, en el último corte del experimento, después de recolectar las muestras, se hizo un nuevo corte a nivel del suelo (sin cobertura vegetal), se fertilizó nuevamente, y se reinstalaron las cámaras bajo las mismas condiciones y distribuciones temporales para realizar mediciones adicionales de CO₂.

Las emisiones de CO₂ por hectárea y por periodo de tiempo (0-10, 10-30 y 30-60 min) se calcularon empleando la siguiente fórmula:

$$CO_2 \text{ por periodo } \left(\frac{kg \text{ CO}_2}{ha} \right) = \frac{\Delta C \text{ (ppm)} \times 10^{-6} \times P \text{ (Pa)} \times V_c \text{ (m}^3\text{)} \times M_{CO_2} \left(\frac{g}{mol} \right)}{R \left(\frac{J}{mol \text{ K}} \right) \times T \text{ (K)} \times 1000 \times A_{ha}}$$

Donde,

- ΔC = concentración final de CO₂ – concentración inicial de CO₂ durante el periodo, en ppm.
- P= presión en pascales (Pa).
- V_c= volumen de la caja en m³.
- MCO₂ = masa molar del CO₂ (44,01 g/mol).
- R= 8,314463 J/mol K.
- T= temperatura en Kelvin (K).
- A_{ha}= área cubierta por la cámara en ha.

Las emisiones de N₂O se calcularon con base en la siguiente formula:

$$F_{N_2O-N} = M_N \times \frac{V}{A} \times \frac{P}{RT} \times \frac{dC}{dt} \times 10^{-3}$$

Donde,

- F_{N_2O-N} = flujo de N_2O expresado como nitrógeno ($\mu\text{g N m}^{-2} \text{ h}^{-1}$).
- M_N = masa molar del nitrógeno ($28,013 \text{ g mol}^{-1}$).
- V = volumen de la cámara (m^3).
- A = área de la cámara (m^2).
- P = presión atmosférica (Pa).
- R = constante de los gases ($8,314 \text{ J mol}^{-1} \text{ K}^{-1}$).
- T = temperatura absoluta (K).
- dC/dt = pendiente de concentración de N_2O en el tiempo (ppb h^{-1}).

El factor 10^{-3} corrige las unidades de ppb a fracción molar y de g a μg .

Captura de carbono

La captura de carbono se estimó a partir del contenido porcentual de carbono (Analizador Elemental CHNS/O) determinado en las muestras secas, multiplicado por la biomasa seca extrapolada por hectárea. De esta forma, la cantidad de carbono fijado se expresó en toneladas de carbono por hectárea año ($\text{t C ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$).

Eficiencia en la recuperación del nitrógeno (ERN)

La eficiencia en la recuperación del nitrógeno (N) se cuantificó empleando la siguiente formula:

$$\text{Eficiencia de Recuperación (ER)} = (NTf - NTt) / (NTa)$$

Donde,

- NTa = g del nutriente (N) aplicado en la fertilización.
- NTf = g de nutriente (N) producido en el tratamiento con fertilización.
- NTt = g de nutriente (N) producido en el tratamiento sin fertilización.

Análisis estadístico

Los datos obtenidos fueron sometidos a un análisis de varianza, una vez verificada la homogeneidad y normalidad de los datos; cuando se encontraron diferencias estadísticas ($p < 0,05$) se aplicó la prueba de rangos múltiples de Tukey.

Sistemas de pastoreo rotacional

Ubicación

El ensayo se llevó a cabo en los predios La Bricha y El Palmar, en Macaravita; Villa Lorena, en Málaga; y en el área de agrosistemas de la Reserva Natural La Llanada, en Concepción, Santander. En estos sitios, se implementaron sistemas de rotación de potreros con pasto kikuyu y mezclas de rye grass, con el objetivo de mejorar la utilización del suelo y aumentar la productividad del



sistema ganadero. Los análisis de laboratorio se realizaron en el Laboratorio de Reconversión Ganadera y Agroforestal de la Universidad Industrial de Santander, sede Málaga. Las nanopartículas de zeolita fueron sintetizadas y caracterizadas en los laboratorios del Parque Tecnológico de Guatiguará, adscrito a la Universidad Industrial de Santander (Bucaramanga, Colombia).

Diseño experimental

Para evaluar el efecto de la aplicación de mezclas de fertilizante balanceado y nanopartículas de zeolita sobre la captura de carbono en praderas y emisiones de gases de CO₂ y N₂O, se estableció un diseño experimental de bloques completos al azar con cuatro repeticiones y cinco tratamientos: control; 20 g m⁻² de fertilizante; 30 g m⁻² de fertilizante; 20 g m⁻² de fertilizante + 1 % de nanozeolita; y 30 g m⁻² de fertilizante + 1 % de nanozeolita. El fertilizante utilizado contenía 30,34% de N, 7,47% de P₂O₅, 7,75% de K₂O, 1,80% de MgO y 1,62% de S, y fue formulado a partir de urea (59,61%), DAP (16,24%), KCl (12,91%), MgSO₄ (10,92%) y azufre (0,31%). Además, se implementó un sistema de pastoreo rotacional con un día de ocupación y 29 días de descanso. Antes del pastoreo, se recolectaron muestras para estimar la producción de biomasa y realizar los análisis de captura de carbono.

Dentro de cada predio se seleccionaron los potreros 3, 9, 15 y 21, en los cuales se establecieron las parcelas experimentales. Cada unidad experimental correspondió a un área de 4 m² seleccionada al azar dentro de cada potrero.

Emisiones de CO₂ y N₂O

Las emisiones de CO₂ y N₂O se evaluaron con cámaras de vidrio (27000 cm³ de volumen, área de cobertura 900 cm²) provistas de un orificio superior y muestreadas con jeringas plásticas de 50 ml con válvula de tres pasos. La fertilización se realizó un día después del pastoreo, seguida inmediatamente por el riego. Posteriormente, se instalaron las cámaras y se tomaron muestras de aire a los 0, 30 y 60 min para CO₂ y a los 0 y 60 min para N₂O. Adicionalmente, para las emisiones de CO₂ se llevaron a cabo mediciones en condiciones de suelo desnudo, fertilizando pequeñas parcelas previamente cortadas al ras del suelo, simulando praderas sometidas a sobrepastoreo. De igual manera se tomaron los datos de temperatura (T) y presión atmosférica (P). Las muestras de gas fueron analizadas en un cromatógrafo de gases. Las emisiones de CO₂ por hectárea y por periodo de tiempo (0-30 y 30-60 min) se calcularon empleando la siguiente fórmula:

$$CO_2 \text{ por periodo } \left(\frac{kg \text{ CO}_2}{ha} \right) = \frac{\Delta C \text{ (ppm)} \times 10^{-6} \times P \text{ (Pa)} \times V_c \text{ (m}^3\text{)} \times M_{CO_2} \left(\frac{g}{mol} \right)}{R \left(\frac{J}{mol \text{ K}} \right) \times T \text{ (K)} \times 1000 \times A_{ha}}$$

Donde,

- ΔC = concentración final de CO₂ – concentración inicial de CO₂ durante el periodo, en ppm.
- P= presión en pascales (Pa).

- V_c = volumen de la caja en m^3 .
- M_{CO_2} = masa molar del CO_2 (44,01 g/mol).
- R = 8,314463 J/mol K.
- T = temperatura en Kelvin (K).
- A_{ha} = área cubierta por la cámara en ha.

Las emisiones de N_2O se calcularon con base en la siguiente formula:

$$F_{N_2O-N} = M_N \times \frac{V}{A} \times \frac{P}{RT} \times \frac{dC}{dt} \times 10^{-3}$$

Donde,

- F_{N_2O-N} = flujo de N_2O expresado como nitrógeno ($\mu g\ N\ m^{-2}\ h^{-1}$).
- M_N = masa molar del nitrógeno (28,013 g mol^{-1}).
- V = volumen de la cámara (m^3).
- A = área de la cámara (m^2).
- P = presión atmosférica (Pa).
- R = constante de los gases (8,314 J $mol^{-1}\ K^{-1}$).
- T = temperatura absoluta (K).
- dC/dt = pendiente de concentración de N_2O en el tiempo (ppb h^{-1}).

El factor 10^{-3} corrige las unidades de ppb a fracción molar y de g a μg .

Análisis estadístico

Los datos obtenidos se sometieron a un análisis de varianza (ANOVA), previa verificación de los supuestos de homogeneidad de varianzas y normalidad. Cuando se detectaron diferencias significativas ($p < 0,05$), se aplicó la prueba de rangos múltiples de Tukey para la comparación de medias.

RESULTADOS

Cultivos de *Lolium perenne* bajo condiciones de invernadero

Emisiones edáficas de CO_2

Las emisiones edáficas de CO_2 evidenciaron diferencias significativas ($p < 0,05$) entre tratamientos, mostrando variaciones en la dinámica de emisión a lo largo del tiempo. En los tratamientos con fertilización, se observó una alta emisión de CO_2 durante los primeros 10 minutos, observando emisiones de 1781, 2902 y 2071 g $CO_2\ ha^{-1}$ para F4g, F4gZnO y F4gZe respectivamente, relacionada con la actividad microbiana intensificada por el aporte de nutrientes, agua y temperatura. Entre los 10 y 30 minutos se registró una reducción en las



emisiones de -2635 , -3347 y -2702 g CO_2 ha^{-1} para F4g, F4gZnO y F4gZe respectivamente (ver Gráfico 2), lo cual sugiere una mayor actividad de las plantas en la absorción de nutrientes y un incremento en la tasa de conversión de CO_2 durante los procesos de fotosíntesis. Además, los tratamientos que incluyen nanopartículas generaron una mayor emisión inicial de CO_2 , lo que indica una mayor actividad microbiana en el suelo y una posible interacción de estas nanopartículas con los microorganismos. Sin embargo, en estos tratamientos con nanopartículas también se observó una mayor captura de carbono después de los 10 minutos, lo que refleja una actividad fotosintética más intensa en las plantas y una mayor captura de carbono. En los tratamientos sin fertilización, prevaleció una baja actividad del suelo, coherente con una baja biomasa producida. Cuando se evaluó la emisión de CO_2 en tratamientos con fertilización en bandejas con cortes a nivel de suelo, se evidenció un incremento constante en las emisiones, lo que destaca la importancia de fertilizar en presencia de material vegetal (hojas) para facilitar la captura y aprovechamiento del CO_2 emitido por el suelo (ver Gráfico 1 y Gráfico 2).

Los resultados indican que la fertilización, especialmente cuando se combina con nanopartículas de ZnO, aumenta significativamente la actividad microbiana y las emisiones iniciales de CO_2 en el suelo, reflejando una mayor mineralización de la materia orgánica y una intensificación de los procesos biológicos. Sin embargo, también se evidenció que estas condiciones favorecen una mayor captación de carbono por parte de las plantas, contribuyendo potencialmente a un mayor secuestro de carbono. La capacidad de captar carbono en presencia de material vegetal (hojas) y el incremento de emisiones en suelos desnudos subrayan la importancia de la fertilización en ambientes con biomasa activa, ya que facilita el aprovechamiento del carbono y ayuda a disminuir las emisiones edáficas durante los picos de mayor actividad. En conjunto, la interacción entre fertilización, nanopartículas y material vegetal influye en los procesos de emisión y captura de carbono en el suelo, siendo fundamental considerarlos en el diseño de estrategias de manejo sostenible y mitigación de gases de efecto invernadero.

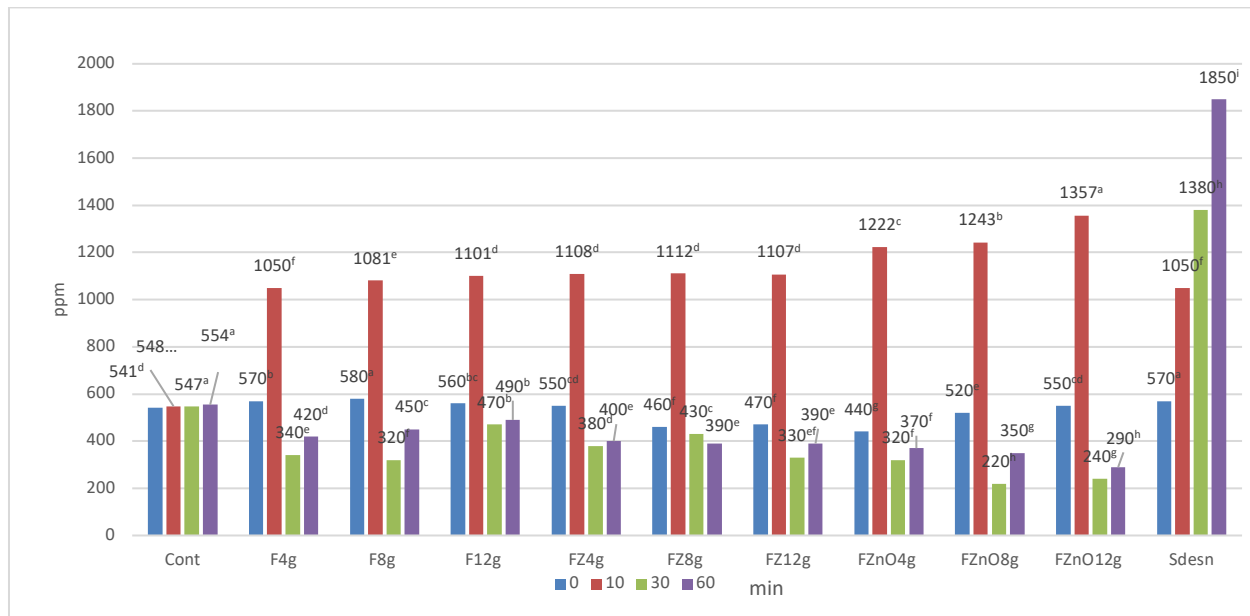


Gráfico 1. Dinámica del CO₂ en las cámaras.

Nota: Medias con letras diferentes son significativamente diferentes ($p < 0,05$), prueba de rangos múltiples de Tukey. Sdesn: Suelo desnudo.

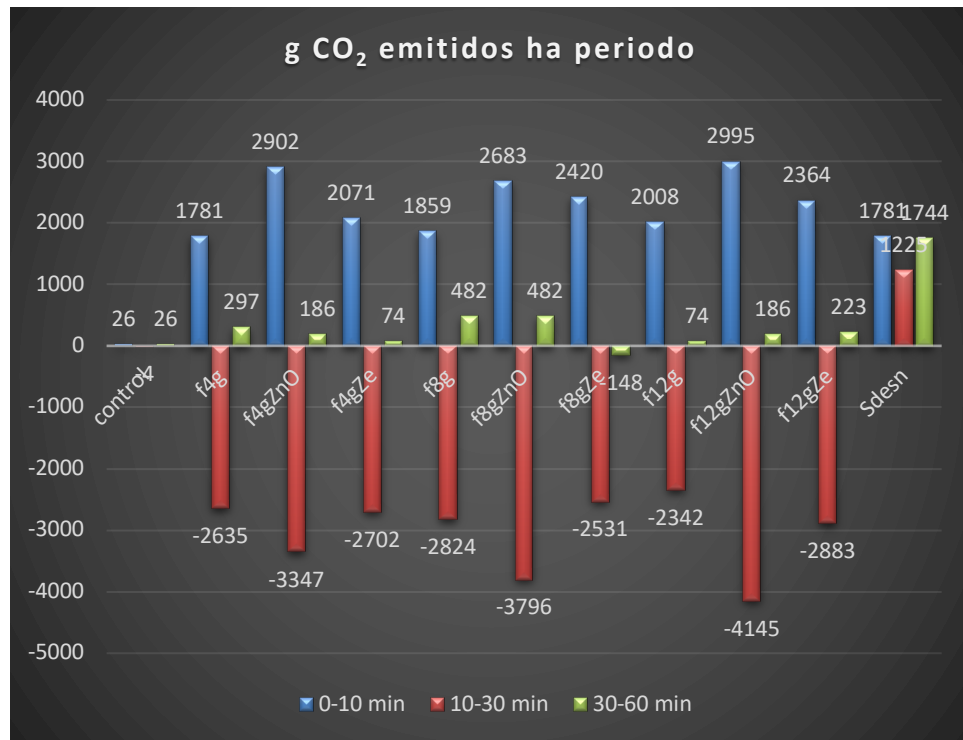


Gráfico 2. Emisiones y captura de CO₂ en el tiempo por hectárea.



Contenido y captura de carbono en las plantas

La concentración de carbono en las plantas mostró diferencias significativas ($p < 0,05$) entre el tratamiento sin fertilización y los tratamientos con fertilización; sin embargo, no se detectaron diferencias estadísticas significativas entre estos últimos (ver Gráfico 3). No obstante, la capacidad de captura de carbono por planta sí presentó variaciones entre los tratamientos. Los mayores niveles de captura correspondieron a las dosis más altas de fertilizante combinadas con nanopartículas de ZnO y zeolita (f12gZnO y f8gZe). En los tratamientos con 4 g de fertilizante, la captura de carbono aumentó en un 14,5% y 15,4% al agregar nanopartículas de ZnO y zeolita (pasando de 22,1 t ha año a 25,3 ZnO y 25,5 Ze), respectivamente. De manera similar, en los tratamientos con 8 g de fertilizante, la captura se incrementó en un 24,5% y 19,9% con la adición de nanopartículas de ZnO y zeolita, respectivamente (pasando de 34,5 t ha año a 33,2 ZnO y 25,5 Ze), como se observa en el Gráfico 4.

La incorporación de nanopartículas de ZnO y zeolita en los tratamientos con fertilización mejoró significativamente la capacidad de las plantas para captar carbono. Esto sugiere que los nanofertilizantes pueden potenciar la eficiencia del proceso de asimilación y almacenamiento de carbono en las plantas, contribuyendo a un manejo agrícola más sostenible y al secuestro de carbono en sistemas productivos. Estos hallazgos resaltan el potencial de las nanopartículas como herramientas complementarias para mejorar la sostenibilidad agrícola y reducir el impacto del cambio climático.

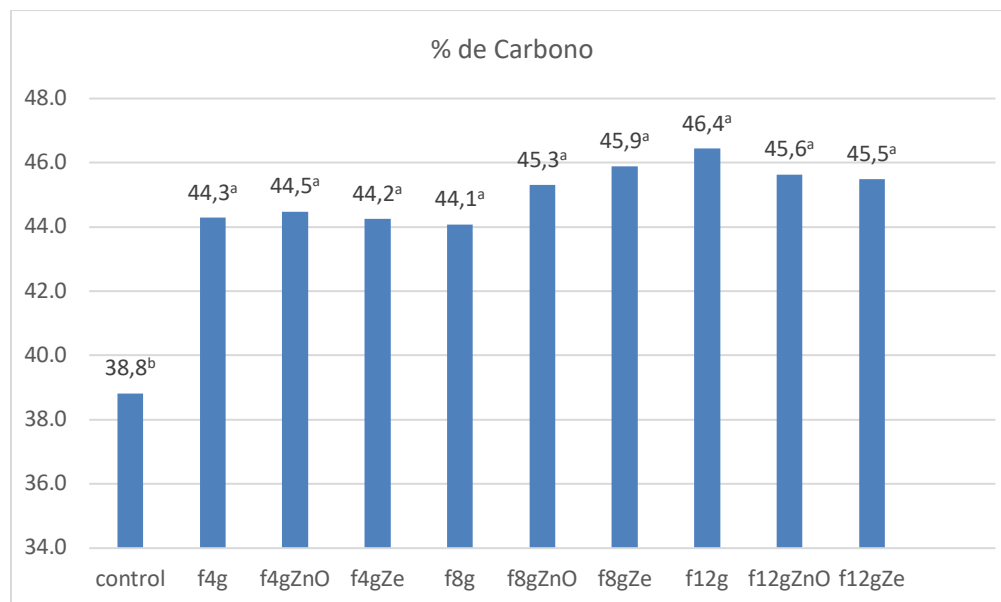


Gráfico 3. Concentración de carbono en *L. perenne*.

Nota: Medias con letras diferentes son significativamente diferentes ($p < 0,05$), prueba de rangos múltiples de Tukey.

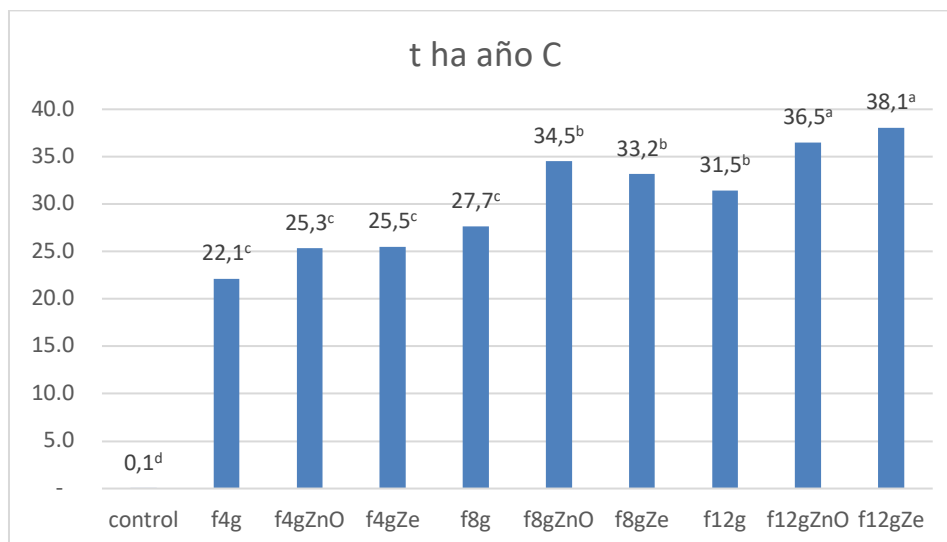


Gráfico 4. Captura de carbono de *L. perenne* por ha-año.

Nota: Medias con letras diferentes son significativamente diferentes ($p < 0,05$), prueba de rangos múltiples de Tukey.

Emisiones edáficas de N_2O

Las emisiones de N_2O mostraron diferencias ($p < 0,05$), evidenciando que, con el incremento en la fertilización, las emisiones aumentan; sin embargo, la adición de nanopartículas de ZnO y zeolita disminuyó significativamente estas emisiones. Específicamente, para la fertilización con 4 g, la reducción fue del 62,2 y 57,3% con ZnO y zeolita, respectivamente (pasando de 315,6 $ug N_2O-N m^{-2} h^{-1}$ a 119,4 ZnO y 134,8 Ze); para 8 g, la reducción fue del 36,4 y 38,1% (pasando de 409,4 $ug N_2O-N m^{-2} h^{-1}$ a 260,6 ZnO y 253,3 Ze); y para 12 g, la disminución alcanzó el 29,7 y 31,9% (pasando de 639,8 $ug N_2O-N m^{-2} h^{-1}$ a 449,5 ZnO y 435,9 Ze). Esto indica que, con dosis menores de fertilizante, la utilización de nanopartículas logra una mayor reducción de las emisiones, probablemente debido a una mayor relación entre la cantidad de fertilizante y de nanopartícula (ver Gráfico 5). Estos resultados son coherentes con la eficiencia de recuperación de nitrógeno observada (ver Gráfico 6).

La incorporación de nanopartículas de ZnO y zeolita evidenció su capacidad para reducir las emisiones de N_2O derivadas de la fertilización, especialmente en dosis menores de fertilizante. Esto se atribuye al mayor poder catalítico del ZnO, que optimiza las reacciones bioquímicas del nitrógeno en el suelo, como la nitrificación y la desnitrificación, promoviendo su absorción por las plantas y reduciendo las vías de liberación de N_2O . Además, el mayor desarrollo radicular observado con la aplicación de ZnO indica una mayor extensión de la zona de absorción, mejorando la eficiencia del uso de nitrógeno en el suelo. Por otro lado, las nanozeolitas, con su alta capacidad de intercambio iónico, actúan como reservorios que retienen los nutrientes, facilitando una liberación lenta y controlada, lo que reduce las pérdidas por lixiviación y

volatilización. Estos hallazgos sugieren que las nanopartículas pueden constituir una estrategia prometedora para mitigar las emisiones de gases de efecto invernadero en sistemas de manejo agrícola, promoviendo una mayor eficiencia en la recuperación y utilización del nitrógeno, aspectos críticos para la sostenibilidad de los suelos y la reducción del impacto ambiental. La relación entre la dosis de fertilizante y la cantidad de nanopartículas es crucial, ya que dosis menores permiten una mayor efectividad en la reducción de emisiones, optimizando el uso de insumos y minimizando los impactos negativos sobre la salud del suelo y los recursos hídricos.

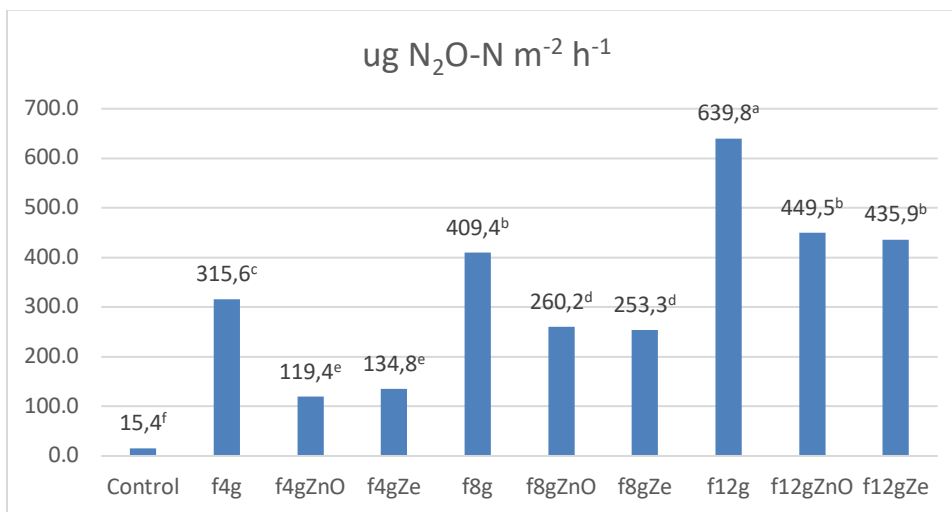


Gráfico 5. Emisiones de óxido nitroso flujo equivalente ($\mu\text{g N}_2\text{O-N m}^{-2} \text{ h}^{-1}$).

Nota: Medias con letras diferentes son significativamente diferentes ($p < 0,05$), prueba de rangos múltiples de Tukey.

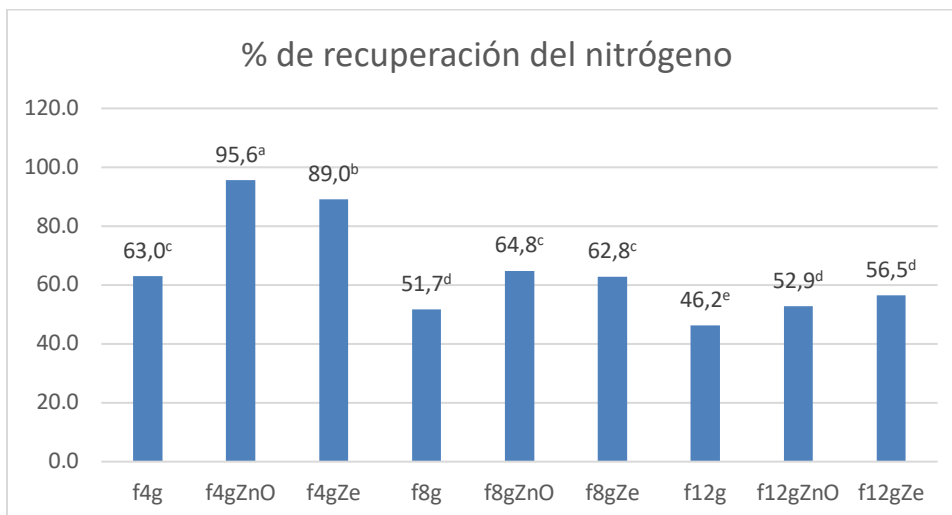


Gráfico 6. Eficiencia en la recuperación del nitrógeno.

Nota: Medias con letras diferentes son significativamente diferentes ($P < 0.05$), prueba de rangos múltiples de Tukey.

Sistemas de pastoreo rotacional

Emisiones edáficas de CO₂

Las emisiones de CO₂ mostraron diferencias significativas ($p < 0,05$). En el tratamiento control, las variaciones fueron muy bajas, reflejando una actividad y respiración celular mínima en el suelo. Tras la fertilización, las emisiones aumentaron notablemente, siendo mucho mayores en los tratamientos con nanopartículas de zeolita, lo que indica que estas estimulaban la actividad microbiana en el suelo. Sin embargo, también se observó que estas condiciones favorecían significativamente la absorción de CO₂, con incrementos de hasta el 55,0% en la captura de CO₂ entre los 30 y 60 minutos después de la fertilización en tratamientos con 20 g de fertilizante (pasando de -1676 g CO₂ ha periodo a -2598 con fz), y del 27,4% en los de 30 g (pasando de -2071 g CO₂ ha periodo a -2638 con fz) como se observa en el Gráfico 8. En el suelo desnudo, las emisiones alcanzaron valores totales de 7934 g de CO₂ por ha en la hora posterior a la fertilización (ver Gráficos 7 y 8).

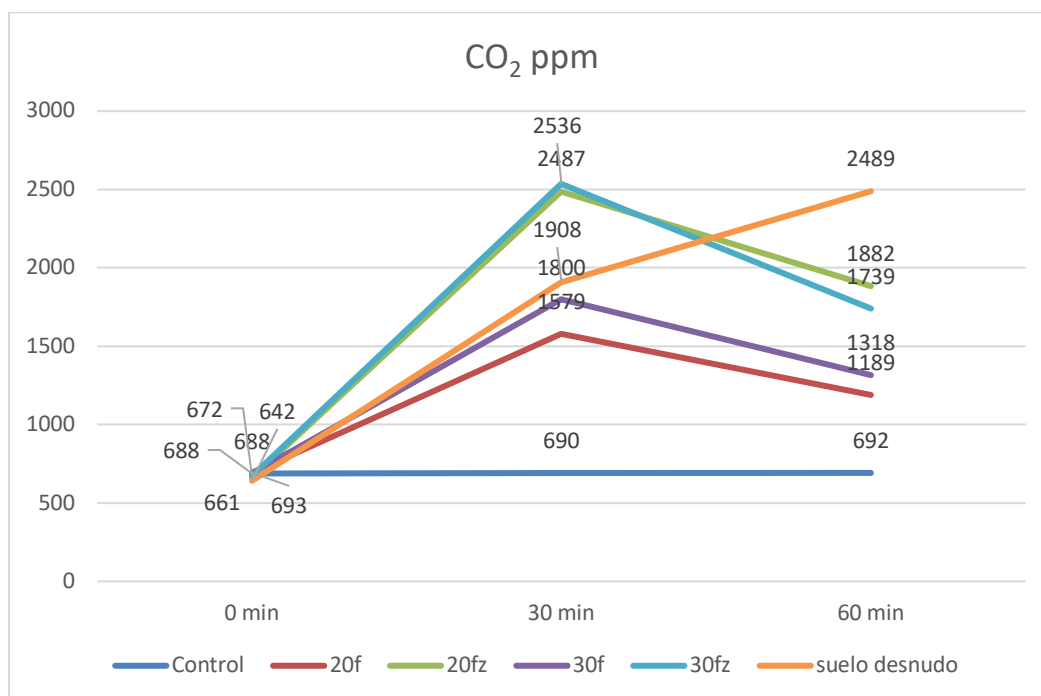


Gráfico 7. Concentración de CO₂ (ppm) en el aire dentro de las cámaras.

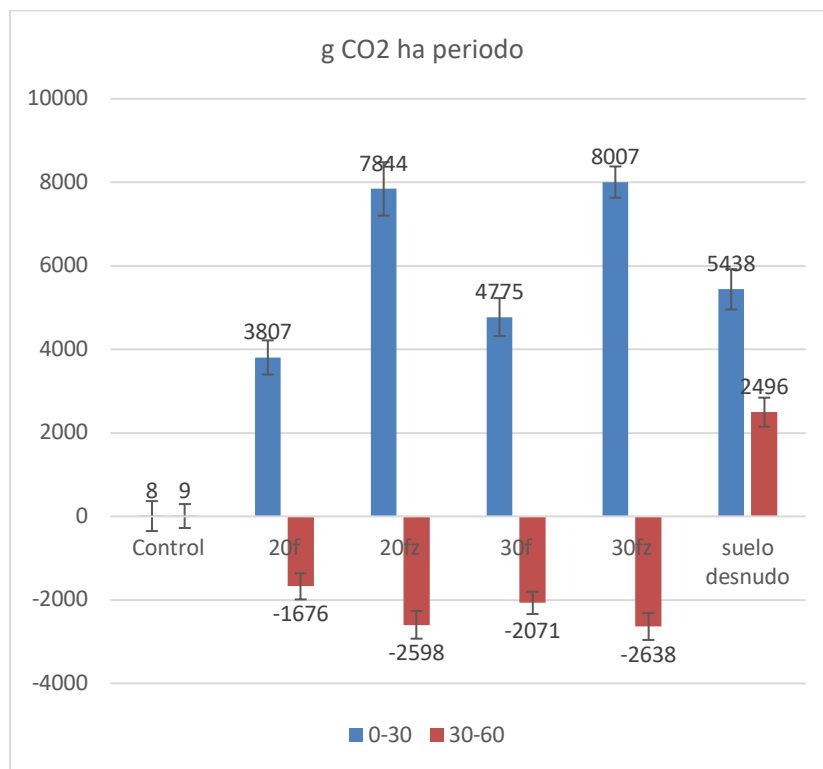


Gráfico 8. Emisiones de CO₂ expresadas como kg CO₂ ha⁻¹ por periodo (0–30 y 30–60 min).

Nota: Los valores se presentan como medias $\pm$ desviación estándar.

Concentración y captura de carbono

La concentración y captura de carbono en las plantas evidenciaron diferencias estadísticamente significativas ($p < 0,05$). La concentración mostró diferencias entre el control y los tratamientos con fertilización, con leves incrementos en la implementación de la nanozeolita, sin existir diferencias significativas entre estos últimos. Por su parte, la captura de carbono aumentó de manera significativa tanto con la fertilización como con la aplicación de nanopartículas. En los tratamientos con 20 g de fertilizante, la captura de carbono se incrementó en un 11.3% (pasando de 10,6% a 11,8%), mientras que en los tratamientos con 30 g el aumento fue del 6.6% (pasando de 12,2 a 13,0 ton C ha año), como se observa en el Gráfico 9 (a-b).

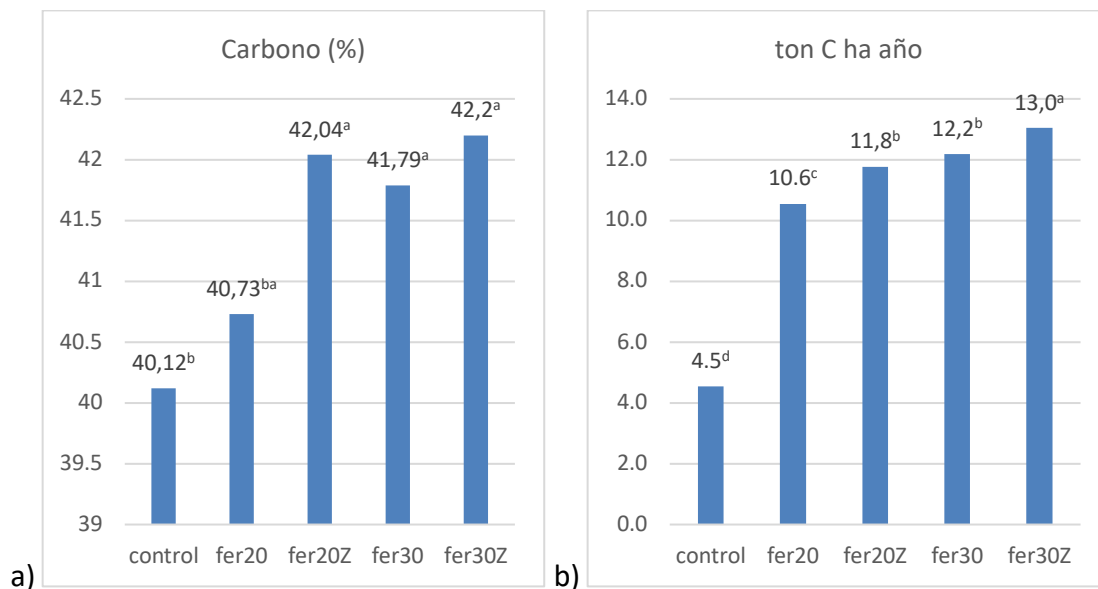


Gráfico 9. Concentración (a) y captura de carbono (b) en plantas de *Cenchrus clandestinus*.

Nota: Medias con letras diferentes son significativamente diferentes ($p < 0,05$), prueba de rangos múltiples de Tukey.

Emisiones edáficas de N_2O

Las emisiones de N_2O evidenciaron diferencias estadísticamente significativas ($p < 0,05$). Se observó un aumento en las emisiones con la fertilización convencional, asociado a la mayor disponibilidad de nitrógeno en el suelo que favorece procesos microbiológicos responsables de la producción de N_2O , como la nitrificación y la desnitrificación. Sin embargo, la aplicación de nanopartículas de zeolita resultó en una reducción significativa de las emisiones, demostrando su capacidad para modificar la dinámica del nitrógeno en el suelo. Específicamente, cuando se aplicaron 20 g de fertilizante y se adicionaron nanopartículas de zeolita, las emisiones de N_2O disminuyeron en un 27,7%, (pasando de 310,5 a 224,3 $\mu\text{g N m}^{-2} \text{ h}^{-1}$) y en el caso de 30 g de fertilizante, la reducción fue del 25,3% (pasando de 390,7 a 291,7%), como se observa en el Gráfico 10. Este efecto puede atribuirse a la alta capacidad de intercambio iónico de la zeolita, que retiene y libera lentamente los nitratos, reduciendo su disponibilidad para procesos de nitrificación y desnitrificación excesivos que generan N_2O . Además, la zeolita puede mejorar aireación del suelo, disminuyendo las condiciones anaeróbicas que favorecen estas emisiones. Estos resultados sugieren que el uso de nanopartículas de zeolita es una estrategia efectiva para mitigar las emisiones de gases de efecto invernadero, además de mejorar la eficiencia del uso de nitrógeno en los sistemas de manejo agrícola.

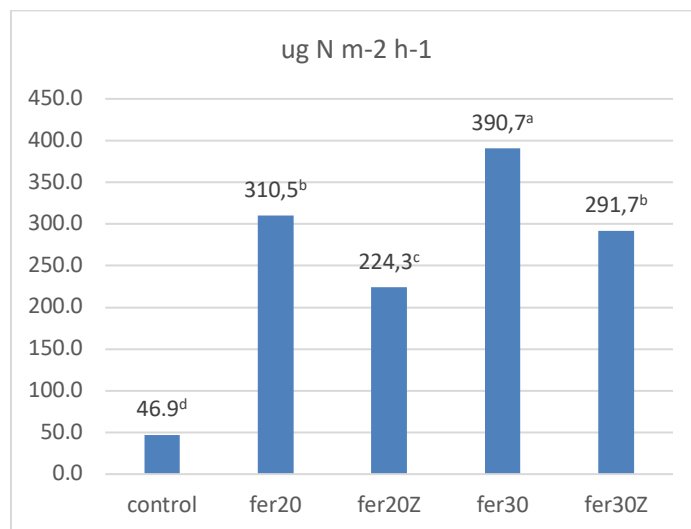


Gráfico 10. Emisiones de óxido nitroso flujo equivalente ($\mu\text{g N}_2\text{O-N m}^{-2} \text{ h}^{-1}$).

Nota: Medias con letras diferentes son significativamente diferentes ($P < 0.05$), prueba de rangos múltiples de Tukey.

Los resultados de las emisiones son coherentes con la mayor eficiencia de recuperación de nitrógeno observada en los tratamientos con nanopartículas de zeolita. Se registró un incremento significativo en la eficiencia de recuperación del nitrógeno, con aumentos del 21,3% en la fertilización con 20 g (pasando de 58,1 a 79,4%) y del 12,3% en la fertilización con 30 g (pasando de 50,4 a 62,7%), como se observa en el Gráfico 11. Estos hallazgos sugieren que la incorporación de nanozeolita contribuye a mejorar el uso del nitrógeno por parte de las plantas y a reducir las pérdidas por emisiones, favoreciendo prácticas agrícolas más sostenibles.

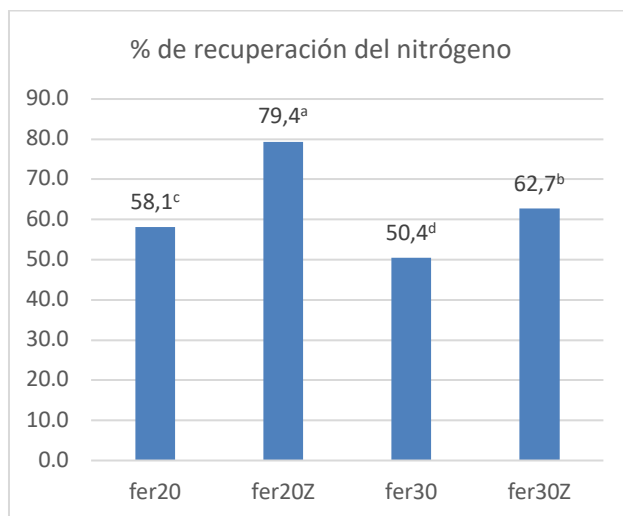


Gráfico 11. Eficiencia en la recuperación del nitrógeno.

Nota: Medias con letras diferentes son significativamente diferentes ($P < 0.05$), prueba de rangos



múltiples de Tukey.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Los resultados evidencian que, mediante la combinación de fertilización con nanopartículas de ZnO y zeolita, es posible reducir significativamente las emisiones de CO₂ y potenciar la captura de carbono en plantas de *Lolium perenne* bajo condiciones de invernadero. Estas nanopartículas no solo estimulan la actividad microbiana y los procesos de mineralización controlada, sino que también favorecen una mayor actividad fotosintética, incrementando la absorción de CO₂ y contribuyendo al secuestro de carbono en los sistemas agrícolas. La implementación de estas estrategias puede ser clave para promover prácticas sostenibles, reducir las emisiones de gases de efecto invernadero y potenciar la capacidad del suelo y las plantas para captar carbono, en favor de la mitigación del cambio climático.

La incorporación de nanopartículas de ZnO y zeolita en los fertilizantes resultó en una significativa reducción de las emisiones de N₂O y una mejora en la eficiencia de recuperación del nitrógeno en los sistemas de cultivo de *Lolium perenne*. Estas nanopartículas actúan como reservorios controlados de nitrógeno, disminuyen las pérdidas por volatilización y desnitrificación, y favorecen un uso más eficiente del fertilizante por las plantas. Por tanto, su uso constituye una estrategia prometedora para mitigar las emisiones de gases de efecto invernadero, optimizar la utilización del nitrógeno y promover prácticas agrícolas más sostenibles y responsables con el medio ambiente.

El uso de mezclas de fertilizantes con nanopartículas de zeolita en sistemas de rotación de praderas aumenta la actividad microbiana, elevando las emisiones iniciales de CO₂ en el suelo. Sin embargo, también fomenta una mayor capacidad de las plantas para capturar carbono, alcanzando incrementos significativos en la incorporación de este elemento en la biomasa vegetal, especialmente en tratamientos con dosis menores de fertilizante. Estas estrategias mejoran el balance entre emisión y secuestro de carbono, promoviendo prácticas agrícolas más sostenibles.

La aplicación de nanopartículas de zeolita en sistemas de rotación de potreros reduce significativamente las emisiones de N₂O, debido a su capacidad de retener y liberar nitrógeno de forma controlada, lo que mejora la gestión del nitrógeno en el suelo. Además, estas nanopartículas aumentan la eficiencia en la recuperación del nitrógeno por las plantas, disminuyen las pérdidas de nutrientes por lixiviación y desnitrificación, y contribuyen a sistemas de manejo agrícola más sostenibles y responsables con el ambiente.



REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Abebe, T. G., Tamtam, M. R., Abebe, A. A., Abtemariam, K. A., Shigut, T. G., Dejen, Y. A., & Haile, E. G. (2022). Growing Use and Impacts of Chemical Fertilizers and Assessing Alternative Organic Fertilizer Sources in Ethiopia. *Applied and Environmental Soil Science*, 2022, 1–14. <https://doi.org/10.1155/2022/4738416>
- Aga Vera, S. R., & Rodríguez Gordillo, M. E. (2021). *Aprovechamiento de biomasa a partir de bagazo de cebada de malta para la elaboración de pellets como biocombustible* [Bachelor's thesis]. Universidad de Guayaquil.
- Cárdenas, E., Bustamante, A., Espitia, J., & Paez, A. (2012). Productividad en materia seca y captura de carbono en un sistema silvopastoril y un sistema tradicional en cinco fincas ganaderas de piedemonte en el departamento de Casanare. *Revista de Medicina Veterinaria*, 24, 51–57.
- Chen, H., & Yada, R. (2011). Nanotechnologies in agriculture: New tools for sustainable development. *Trends in Food Science & Technology*, 22(11), 585–594. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2011.09.004>
- Das, B., Chakraborty, D., Singh, V. K., Aggarwal, P., Singh, R., Dwivedi, B. S., & Mishra, R. P. (2014). Effect of integrated nutrient management practice on soil aggregate properties, its stability and aggregate-associated carbon content in an intensive rice–wheat system. *Soil and Tillage Research*, 136, 9–18. <https://doi.org/10.1016/j.still.2013.09.009>
- Dencsó, M., Horel, Á., Bogunovic, I., & Tóth, E. (2020). Effects of Environmental Drivers and Agricultural Management on Soil CO₂ and N₂O Emissions. *Agronomy*, 11(1), 54. <https://doi.org/10.3390/agronomy11010054>
- Ditta, A., & Arshad, M. (2016). Applications and perspectives of using nanomaterials for sustainable plant nutrition. *Nanotechnology Reviews*, 5(2). <https://doi.org/10.1515/ntrev-2015-0060>
- Elemike, E. E., Uzoh, I. M., Onwudiwe, D. C., & Babalola, O. O. (2019). The Role of Nanotechnology in the Fortification of Plant Nutrients and Improvement of Crop Production. *Applied Sciences*, 9(3), 499. <https://doi.org/10.3390/app9030499>
- Fatima, F., Hashim, A., & Anees, S. (2021). Efficacy of nanoparticles as nanofertilizer production: a review. *Environmental Science and Pollution Research*, 28(2), 1292–1303. <https://doi.org/10.1007/s11356-020-11218-9>
- González-Estrada, A., & Camacho Amador, M. (2017). Emisión de gases de efecto invernadero de la fertilización nitrogenada en México. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 8(8), 1733–1745. <https://doi.org/10.29312/remexca.v8i8.698>



- Grageda-Cabrera, O. A., González-Figueroa, S. S., Vera-Núñez, J. A., Aguirre-Medina, J. F., & Peña-Cabriales, J. J. (2018). Efecto de los biofertilizantes sobre la asimilación de nitrógeno por el cultivo de trigo. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 9(2), 281–289. <https://doi.org/10.29312/remexca.v9i2.1071>
- Guo, C., Liu, X., & He, X. (2022). A global meta-analysis of crop yield and agricultural greenhouse gas emissions under nitrogen fertilizer application. *Science of The Total Environment*, 831, 154982. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.154982>
- Hamzah Saleem, M., Usman, K., Rizwan, M., Al Jabri, H., & Alsafran, M. (2022). Functions and strategies for enhancing zinc availability in plants for sustainable agriculture. *Frontiers in Plant Science*, 13. <https://doi.org/10.3389/fpls.2022.1033092>
- Han, B., Yao, Y., Liu, B., Wang, Y., Su, X., Ma, L., Liu, D., Niu, S., Chen, X., & Li, Z. (2024). Relative importance between nitrification and denitrification to N₂O from a global perspective. *Global Change Biology*, 30(1). <https://doi.org/10.1111/gcb.17082>
- Hassan, M. U., Aamer, M., Mahmood, A., Awan, M. I., Barbanti, L., Seleiman, M. F., Bakhsh, G., Alkharabsheh, H. M., Babur, E., Shao, J., Rasheed, A., & Huang, G. (2022). Management Strategies to Mitigate N₂O Emissions in Agriculture. *Life*, 12(3), 439. <https://doi.org/10.3390/life12030439>
- Hu, L., Feng, Z., Yu, Y., & Yao, H. (2022). Effects of Metal Oxide Nanoparticles on Nitrous Oxide Emissions in Agriculture Soil. *Agriculture*, 12(6), 770. <https://doi.org/10.3390/agriculture12060770>
- Huang, M., Gu, C., & Bai, Y. (2023). Effect of Fertilization on Methane and Nitrous Oxide Emissions and Global Warming Potential on Agricultural Land in China: A Meta-Analysis. *Agriculture*, 14(1), 34. <https://doi.org/10.3390/agriculture14010034>
- Hube, S., Salazar, F., Rodríguez, M., Mejías, J., Ramírez, L., & Alfaro, M. (2022). Dynamics of Nitrogen Gaseous Losses Following the Application of Foliar Nanoformulations to Grasslands. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 22(2), 1758–1767. <https://doi.org/10.1007/s42729-022-00769-0>
- Karthiyayini, S. (2018). *Emerging Trends of Nanotechnology in Environment and Sustainability A Review-Based Approach*. Springer Briefs in Environmental Science.
- Kosolapova, A., Yamaltdinova, V., Mitrofanova, E., Fomin, D., & Teterlev, I. (2016). Biological activity of soil depending on fertilizer systems. *Bulgarian Journal of Agricultural Science*, 22(6).
- Martínez-Dalmau, J., Berbel, J., & Ordóñez-Fernández, R. (2021). Nitrogen Fertilization. A Review of the Risks Associated with the Inefficiency of Its Use and Policy Responses. *Sustainability*, 13(10), 5625. <https://doi.org/10.3390/su13105625>
- Méndez Argüello, B., Vera Reyes, I., Cárdenas Flores, A., De los Santos Villarreal, G., Ibarra



- Jiménez, L., & Lira Saldivar, R. (2018). Water holding capacity of substrates containing zeolite and its effect on growth, biomass production and chlorophyll content of *Solanum lycopersicum* Mill. *Nova Scientia*, 10(21), 45–60. <https://doi.org/10.21640/ns.v10i21.1413>
- Mohanraj, J., Subramanian, K. S., & Lakshmanan, A. (2019). Role of nano-fertilizer on Greenhouse Gas Emission in Rice Soil Ecosystem. *Madras Agricultural Journal*, 106.
- Nakachew, K., Yigermal, H., Assefa, F., Gelaye, Y., & Ali, S. (2024). Review on enhancing the efficiency of fertilizer utilization: Strategies for optimal nutrient management. *Open Agriculture*, 9(1). <https://doi.org/10.1515/opag-2022-0356>
- Ogwugwa, V. H., & Bandh, S. A. (2023). Nitrogen Fertilizer Application Techniques to Reduce Nitrous Oxide Emissions. In *Strategizing Agricultural Management for Climate Change Mitigation and Adaptation* (pp. 1–10). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-031-32789-6_1
- Penuelas, J., Coello, F., & Sardans, J. (2023). A better use of fertilizers is needed for global food security and environmental sustainability. *Agriculture & Food Security*, 12(1), 5. <https://doi.org/10.1186/s40066-023-00409-5>
- Rao, D. L., Aparna, K., & Mohanty, S. R. (2019). Microbiology and biochemistry of soil organic matter, carbon sequestration and soil health. *Indian Journal of Fertilisers*, 15(2), 124–138.
- Rashmi, I., Roy, T., Kartika, K. S., Pal, R., Coumar, V., Kala, S., & Shinoji, K. C. (2020). Organic and Inorganic Fertilizer Contaminants in Agriculture: Impact on Soil and Water Resources. In *Contaminants in Agriculture* (pp. 3–41). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-030-41552-5_1
- Scott, N. R., Chen, H., & Cui, H. (2018). Nanotechnology Applications and Implications of Agrochemicals toward Sustainable Agriculture and Food Systems. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 66(26), 6451–6456. <https://doi.org/10.1021/acs.jafc.8b00964>
- Shcherbak, I., Millar, N., & Robertson, G. P. (2014). Global metaanalysis of the nonlinear response of soil nitrous oxide (N₂O) emissions to fertilizer nitrogen. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 111(25), 9199–9204. <https://doi.org/10.1073/pnas.1322434111>
- Solanki, P., Bhargava, A., Chhipa, H., Jain, N., & Panwar, J. (2015). Nano-fertilizers and Their Smart Delivery System. In *Nanotechnologies in Food and Agriculture* (pp. 81–101). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-319-14024-7_4
- Tyagi, J., Ahmad, S., & Malik, M. (2022). Nitrogenous fertilizers: impact on environment sustainability, mitigation strategies, and challenges. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 19(11), 11649–11672. <https://doi.org/10.1007/s13762-022-04027-9>
- Usman, M., Farooq, M., Wakeel, A., Nawaz, A., Cheema, S. A., Rehman, H. ur, Ashraf, I., & Sanaullah, M. (2020). Nanotechnology in agriculture: Current status, challenges and future



opportunities. *Science of The Total Environment*, 721, 137778.
<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.137778>

Yadav, A., Yadav, K., & Abd-Elsalam, K. (2023). Nanofertilizers: Types, Delivery and Advantages in Agricultural Sustainability. *Agrochemicals*, 2(2), 296–336.
<https://doi.org/10.3390/agrochemicals2020019>

Yadav, A., Yadav, K., Ahmad, R., & Abd-Elsalam, K. (2023). Emerging Frontiers in Nanotechnology for Precision Agriculture: Advancements, Hurdles and Prospects. *Agrochemicals*, 2(2), 220–256. <https://doi.org/10.3390/agrochemicals2020016>

Zhang, X., Davidson, E. A., Mauzerall, D. L., Searchinger, T. D., Dumas, P., & Shen, Y. (2015). Managing nitrogen for sustainable development. *Nature*, 528(7580), 51–59.
<https://doi.org/10.1038/nature15743>

INSTITUCIONES PARTICIPANTES



UNIVERSIDAD
TÉCNICA DE
MANABÍ
Fundada en 1952

Secretaría Técnica Administrativa



Con el apoyo de:



www.fontagro.org

Correo electrónico: fontagro@fontagro.org