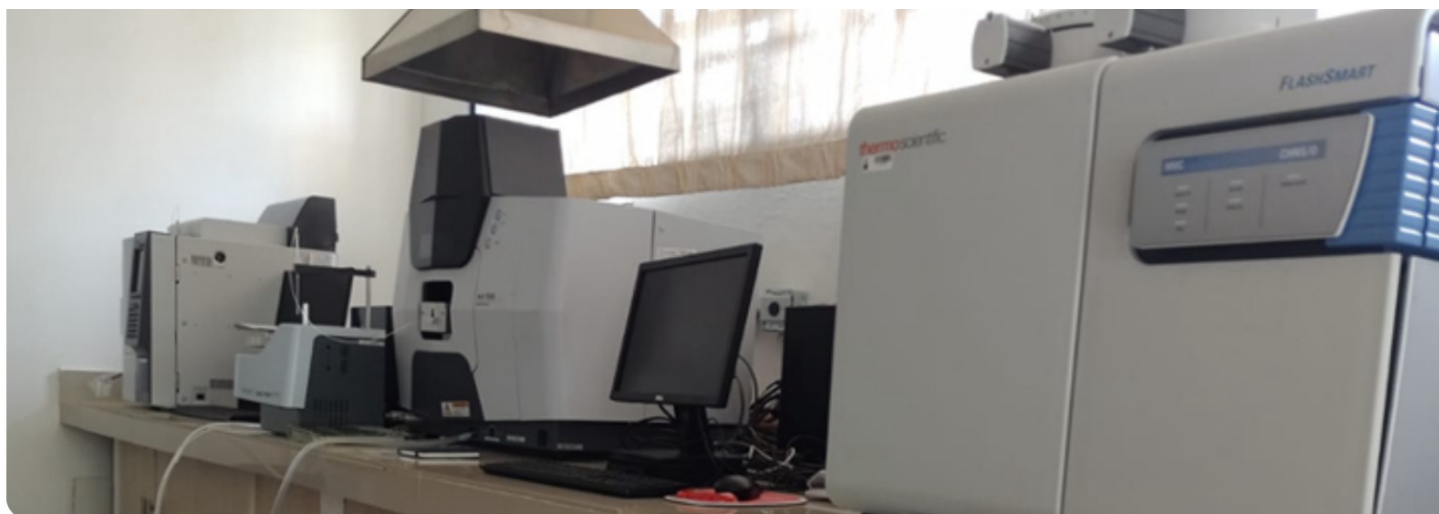




NANOFERTILIZANTES EN EL SUELO Y EMISIONES DE ÓXIDO NITROSO

Producto 5: Nota técnica que valide el efecto de aplicación de los nanofertilizantes en la absorción y concentración de nutrientes en la planta y el porcentaje en la eficiencia de uso de los nutrientes.

Rogelio Ospina Ospina, Mónica Andrea Botero Londoño, Julián Mauricio Botero Londoño, Ezequiel Zamora Ledezma, Henry Antonio Pacheco Gil, Duban Alberto Basto Piza, Andrés Camilo Meléndez Arenales, Sergio Andrés Cáceres Hernández y Myriam Yaritza Parra Zabala

2025



**UNIVERSIDAD
TÉCNICA DE
MANABÍ**
Fundada en 1952



FONTAGRO



Códigos JEL: Q16

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, preparado y ajustado por Julián Mauricio Botero Londoño tomando como base tres tesis de grado realizadas por estudiantes del programa de Zootecnia de la Universidad Industrial de Santander, Sede Málaga: estudiante Duban Alberto Basto Piza, proyecto titulado “Nanozeolita en la producción intensiva de alfalfa (*Medicago sativa*) bajo invernadero”. Estudiante Andrés Camilo Meléndez Arenales, proyecto titulado “Fertilización y nanotecnología en la producción intensiva de forrajes bajo condiciones de invernadero”. Estudiantes Sergio Andrés Cáceres Hernández y Myriam Yaritza Parra Zabala, proyecto titulado “Aplicación de Nanofertilizantes en la Producción Intensiva de Avena (*Avena sativa*) en 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	5
Abstract	5
Resumen ejecutivo.....	6
Introducción	78
Marco teórico	89
Nanofertilizantes y absorción de nutrientes.....	89
Fertilización balanceada	89
Eficiencia en el uso del nitrógeno.....	89
Objetivos	910
Objetivo general	910
Objetivos específicos	910
Metodología	1011
Nanoestructuración de los materiales.....	1011
Diseño Experimental y Aplicación en Cultivos de <i>Lolium perenne</i>	1011
Diseño Experimental y Aplicación en Cultivos de <i>Avena sativa</i>	1112
Diseño Experimental y Aplicación en Cultivos de <i>Medicago sativa</i>	1213
Diseño Experimental y Aplicación en Cultivos de <i>Zea mayz</i>	1314
Eficiencia en el Uso del Nitrógeno	1415
Resultados y discusión.....	1415
Eficiencia de recuperación del nitrógeno en <i>Lolium perenne</i>	1415
Eficiencia de recuperación del nitrógeno en <i>Avena sativa</i>	1516
Eficiencia de recuperación del nitrógeno en <i>Medicago sativa</i>	1617
Gráfico 3. Eficiencia en el uso del nitrógeno en <i>Medicago sativa</i>	¡Error! Marcador no definido.20
Eficiencia en el uso del nitrógeno y absorción de nutrientes en maíz.....	1920



Gráfico 8. Absorción de N, P y K en plantas de maíz.....	¡Error! Marcador no definido. 25
Conclusiones y recomendaciones.....	2225
Referencias bibliográficas	2326
Instituciones participantes	2629

ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro 1. Tratamientos experimentales en Lolium perenne.....	11140
Cuadro 2. Tratamientos experimentales en Avena sativa.....	11
Cuadro 3. Tratamientos experimentales en Medicago sativa	1312

ÍNDICE DE GRÁFICOS

Gráfico 1. Eficiencia de recuperación del nitrógeno en Lolium perenne ..	¡Error! Marcador no definido. 16
Gráfico 2. Eficiencia de recuperación del nitrógeno en Avena sativa	¡Error! Marcador no definido. 17
Gráfico 4. Eficiencia de recuperación de nitrógeno en plantas de maíz. ...	¡Error! Marcador no definido. 21
Gráfico 5. Eficiencia agronómica del nitrógeno en plantas de maíz.	¡Error! Marcador no definido. 22
Gráfico 6. Eficiencia fisiológica del nitrógeno en plantas de maíz.	¡Error! Marcador no definido. 23
Gráfico 7. Factor parcial de productividad del nitrógeno en plantas de maíz.	¡Error! Marcador no definido. 24
Gráfico 8. Absorción de N, P y K en plantas de maíz.	¡Error! Marcador no definido. 25



RESUMEN

El presente documento fue 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). Esta nota técnica corresponde al producto 5, relacionado con el efecto de la aplicación de nanofertilizantes en la absorción y concentración de nutrientes en la planta y el porcentaje en la eficiencia de uso de los nutrientes. Para la realización de este estudio se implementaron cultivos de *Lolium perenne*, *Avena sativa* y *Medicago sativa* en condiciones de invernadero y en cultivos de maíz en condiciones de campo. Los ensayos se realizaron en instalaciones de la Universidad Industrial de Santander, Sede Málaga, donde se aplicaron tratamientos de fertilización balanceada con inclusión de nanopartículas de zeolita, óxido de zinc y dióxido de titanio. Los resultados obtenidos indican que la incorporación de nanopartículas produce una mejora significativa en la eficiencia de la utilización del nitrógeno, reduciendo la lixiviación de nitritos y nitratos y las emisiones de óxido nitroso.

ABSTRACT

This document, developed within the framework of the project “*Nanofertilizers in the soil and nitrous oxide emissions*”, financed by FONTAGRO and executed by the Universidad Industrial de Santander (Colombia) y la Universidad Técnica de Manabí (Ecuador). This technical note corresponds to product 5, related to the effect of the application of nanofertilizers on the absorption and concentration of nutrients in the plant and the percentage of nutrient use efficiency. For this study, crops of *Lolium perenne*, *Avena sativa*, and *Medicago sativa* were established under greenhouse conditions, along with maize crops under field conditions. The trials were conducted at the facilities of the Industrial University of Santander, Málaga campus, where balanced fertilization treatments were applied, including the incorporation of zeolite, zinc oxide, and titanium dioxide nanoparticles. The results indicate that the incorporation of nanoparticles leads to a significant improvement in nitrogen use efficiency, reducing nitrite and nitrate leaching as well as nitrous oxide emissions.



RESUMEN EJECUTIVO

El uso de nanotecnología en la producción de forrajes se presenta como un avance hacia el desarrollo de una agricultura sustentable, la cual permite garantizar alimento suficiente y de calidad en áreas reducidas, incrementar la eficiencia en la absorción de los nutrientes y disminuir los efectos del cambio climático. Este documento evidencia el efecto de la aplicación de nanopartículas de zeolita, óxido de zinc (ZnO) y dióxido de titanio (TiO₂) en la eficiencia del uso de nutrientes en cuatro especies: *Lolium perenne*, *Medicago sativa*, *Avena sativa* y *Zea mays*. El diseño experimental fue completamente al azar, con tres o cuatro replicas por tratamiento y tres o cuatro cortes experimentales para los ensayos en invernadero. En el maíz se empleó un diseño de bloques completos al azar. En las plantas de *Lolium perenne*, se evaluó la combinación de una dosis única de nanopartículas de zeolita y ZnO con tres niveles de dosificación de un fertilizante balanceado. En *Medicago sativa*, se investigó la respuesta a dos dosis de nanopartículas de zeolita combinadas con tres dosis de fertilizante balanceado. En *Avena sativa*, los tratamientos comprendieron la aplicación de dos dosis de cada tipo de nanopartícula (zeolita, ZnO y TiO₂) en conjunción con dos dosis de fertilizante balanceado. En maíz se implementó un fertilizante balanceado con la incorporación de nanopartículas de zeolita, ZnO y TiO₂ al 1 %. Los resultados más relevantes de esta investigación demuestran el potencial significativo de la nanotecnología aplicada a la fertilización para optimizar la eficiencia de recuperación del nitrógeno (ERN) y, consecuentemente, mejorar la sostenibilidad agrícola. En *Lolium perenne*, la aplicación de 4 g de fertilizante balanceado enriquecido con nanopartículas de zeolita o de óxido de zinc incrementó notablemente la ERN, alcanzando valores de 89,0 y 95,5% respectivamente. De manera similar, en *Medicago sativa*, la inclusión de 0.1 g de nanozeolita con 6 g de fertilizante balanceado resultó en una ERN del 89,7%, asociada a una producción de biomasa sustancial, lo que sugiere un mecanismo eficiente de absorción de nitrógeno mediado por la nanozeolita. En *Avena sativa*, la aplicación combinada de 0,1 g de nanopartículas de TiO₂, ZnO y zeolita, junto con 3 g de fertilizante balanceado, demostró una notable eficiencia en la recuperación de nitrógeno (ERN), alcanzando valores de 87, 94 y 113% respectivamente. En el maíz se observaron incrementos significativos en la recuperación del nitrógeno con la incorporación de las nanopartículas, siendo mayores en el tratamiento con TiO₂. Estos hallazgos posicionan a la nanotecnología como una estrategia prometedora para la reducción de costos en fertilización y la mitigación de impactos ambientales críticos, tales como la lixiviación de nitratos y nitritos, así como las emisiones de óxido nitroso desde el suelo.

Palabras Clave: Eficiencia de recuperación del nitrógeno, nanotecnología, nanofertilizantes.



INTRODUCCIÓN

El uso de fertilizantes en la agricultura es esencial para satisfacer la demanda de alimentos ocasionada a partir del crecimiento poblacional. Sin embargo, los fertilizantes convencionales presentan limitaciones significativas en términos de eficiencia, particularmente los que contienen nitrógeno. Se estima que entre el 50% y 70% del nitrógeno aplicado en sistemas agrícolas se pierde, principalmente por volatilización y lixiviación, lo que no solo incrementa los costos de producción, sino que también genera problemas ambientales graves, como la contaminación de fuentes de agua y la degradación del suelo (Botero et al., 2019; Duan et al., 2023; Dubey & Mailapalli, 2016).

En este contexto, los nanofertilizantes, tales como las nanozeolitas, nanopartículas de óxido de zinc (ZnO) y de dióxido de titanio (TiO₂), han surgido como una alternativa prometedora. Estos nanomateriales, sintetizados mediante procesos como la molienda de alta energía, poseen una mayor área superficial y capacidades mejoradas de intercambio iónico, lo cual favorece la adsorción y liberación controlada de nutrientes, incrementando su disponibilidad para las plantas y mejorando la eficiencia en su uso. Además, estos nanofertilizantes reducen las pérdidas de nutrientes por lixiviación y volatilización, promoviendo un uso más eficiente de los recursos (Khan et al., 2021; Nilmini, 2021).

Por lo tanto, este documento tiene como objetivo mostrar el efecto de la incorporación de nanopartículas de zeolita, óxido de zinc y dióxido de titanio, junto con un fertilizante balanceado, sobre la eficiencia de recuperación del nitrógeno (ERN) en cultivos de *Lolium perenne*, *Avena sativa*, *Medicago sativa* y *Zea mays*.



MARCO TEÓRICO

Nanofertilizantes y absorción de nutrientes

La aplicación de nanofertilizantes conlleva una mayor eficiencia en el uso de nutrientes, una minimización de la toxicidad edáfica y una reducción tanto de los posibles efectos negativos asociados a altas dosificaciones como de la frecuencia de aplicación de estos insumos. Lo que sugiere que la nanotecnología posee un considerable potencial para el desarrollo de una agricultura sostenible (Kekeli et al., 2025; Saurabh et al., 2024).

Los nanofertilizantes mejoran la eficiencia de uso de nutrientes gracias a su alta capacidad de adsorción y liberación controlada. Las nanozeolitas, en particular, han demostrado ser eficaces en la retención y liberación gradual de nutrientes esenciales como el nitrógeno y el potasio. Esto se debe a su estructura cristalina y su alta área superficial específica, lo que maximiza la interacción con las raíces de las plantas y mejora la absorción de nutrientes (Jarosz et al., 2022; Ming & Allen, 2001).

Fertilización balanceada

La aplicación prolongada de una fertilización balanceada favorece la transformación de nutrientes esenciales, como el carbono y el fósforo en el suelo, lo que se traduce en una mejora de su fertilidad. Este manejo también optimiza la absorción de nutrientes de los cultivos, incrementando su rendimiento productivo (Wang et al., 2021). De manera similar, Zhang et al. (2025) reportaron que la fertilización balanceada aumenta significativamente los rendimientos en cultivos de trigo y maíz, al tiempo que promueve una mayor captura de carbono en el suelo. En conjunto, estos hallazgos respaldan la fertilización balanceada como una estrategia sostenible para mejorar la eficiencia en el uso de nutrientes, incrementar la productividad agrícola y contribuir a la mitigación del cambio climático.

Eficiencia en el uso del nitrógeno

El nitrógeno (N) es un elemento esencial que constituye una parte fundamental de las proteínas, los ácidos nucleicos y otros componentes vitales de las células, desempeñando un papel clave en el crecimiento y desarrollo de las plantas. La fijación biológica del nitrógeno, junto con la nitrificación, mineralización, desnitrificación y la oxidación anaeróbica del amonio, son procesos microbianos esenciales en el suelo que permiten su conversión y disponibilidad para las plantas (Xu et al., 2012).



La eficiencia en el uso del nitrógeno (EUN) constituye un indicador clave para evaluar la relación entre el nitrógeno suministrado al sistema agrícola y el nitrógeno efectivamente aprovechado por los cultivos, siendo fundamental para mejorar la sostenibilidad de los sistemas productivos (Congreves et al., 2021; Govindasamy et al., 2023). Esta eficiencia puede ser afectada por la fuente de nitrógeno aplicada, que incluye fertilizantes sintéticos (urea, nitrato de amonio), enmiendas orgánicas (estiércol, compost), biofertilizantes o incluso el nitrógeno aportado por la fijación biológica (Mălinaș, 2022; Elrys, 2022). El uso eficiente del nitrógeno puede evaluarse a través de distintos indicadores que permiten entender mejor las diferentes dimensiones de su aprovechamiento. La eficiencia agronómica (EA) refleja cuánto aumenta el rendimiento del cultivo por cada unidad de N aplicada, lo que permite valorar de forma directa la respuesta productiva a la fertilización (Li et al., 2023). La eficiencia fisiológica (EF) describe la capacidad del cultivo para transformar el N absorbido en biomasa o grano adicional, destacando la eficiencia interna con la que el nutriente es utilizado para sostener la producción (Congreves et al., 2021). A su vez, la eficiencia de recuperación aparente (ERA) indica qué proporción del N aplicado es efectivamente absorbida por el cultivo, siendo un indicador fundamental para comprender las pérdidas que pueden derivar en contaminación ambiental (Govindasamy et al., 2023). Finalmente, el factor parcial de productividad (FPP) relaciona el rendimiento total con la cantidad de N aplicada, brindando una visión más amplia de la eficiencia global del manejo del fertilizante (Fixen et al., 2015). Considerados en conjunto, estos indicadores permiten diseñar prácticas de fertilización más inteligentes y sostenibles, que no solo aumentan la productividad, sino que también reducen los costos y ayudan a mitigar el impacto ambiental asociado al uso excesivo de fertilizantes.

OBJETIVOS

Objetivo general

Cuantificar el efecto del uso de nanofertilizantes en la eficiencia de fertilización.

Objetivos específicos

- Determinar el efecto de mezclas de fertilizante balanceado y nanopartículas de zeolita y óxido de zinc sobre la disponibilidad, absorción y eficiencia en el uso de nitrógeno en *Lolium perenne*.
- Evaluar el efecto de inclusión de nanopartículas de zeolita en la eficiencia en el uso de nitrógeno en plantas de *Medicago sativa* (alfalfa) bajo invernadero.
- Determinar el efecto de la aplicación de nanopartículas de zeolita, óxido de zinc y dióxido de titanio sobre la eficiencia en el uso del nitrógeno en *Avena sativa*.

- Evaluar el efecto de inclusión de nanopartículas zeolita, óxido de zinc y dióxido de titanio en la eficiencia en la absorción de nutrientes y el uso del nitrógeno en cultivos de maíz.

METODOLOGÍA

Nanoestructuración de los materiales

Las nanopartículas de zeolita, óxido de zinc (ZnO) y dióxido de titanio (TiO₂) se obtuvieron a través de molienda de alta energía utilizando un molino planetario RETSCH PM100. El proceso de molienda de cada material estuvo determinado por tres variables: factor de llenado (FRV), velocidad de molienda (rpm) y tiempo efectivo de molienda (h). Se optimizaron las condiciones de molienda para cada material nanoestructurado, buscando obtener nanopartículas con el menor tamaño posible y con morfología esférica. Los nanomateriales fueron caracterizados mediante diversas técnicas, entre ellas Microscopía Electrónica de Barrido (SEM), Microscopía de Fuerza Atómica (AFM), Difracción de Rayos X (XRD) y Dispersión de Luz Dinámica (DLS), para evaluar la morfología, el tamaño y las propiedades texturales de las partículas.

Diseño Experimental y Aplicación en Cultivos de *Lolium perenne*

Se desarrolló un diseño completamente al azar con 10 tratamientos, tres réplicas por cada uno y cuatro cortes experimentales para un total de 30 unidades experimentales. Se establecieron tratamientos de fertilización con una dosis fija para las nanopartículas de óxido de zinc y zeolita, variando la dosis de fertilizante balanceado (ver Cuadro 1). La aplicación de los tratamientos se realizó un día después del corte y, posteriormente, se efectuó el riego de las plantas. Para el establecimiento del cultivo se utilizaron 30 bandejas de poliestireno con medidas de 29 cm de ancho por 44 cm de largo y 20 cm de profundidad, que se llenaron con 14 kg de un suelo Inceptisol con pH ligeramente ácido (5,91) contenidos medios en materia orgánica (5.02%), contenidos bajos en fósforo (8,38 mg kg⁻¹), contenidos medios en potasio (0,16 meq 100g⁻¹ de suelo), contenidos medio de calcio (3,2 meq 100g⁻¹ de suelo), contenidos bajos en magnesio (0.42 100g⁻¹ de suelo), contenidos bajos de azufre (8.1 mg kg⁻¹), contenidos medios en cobre (1.21 mg kg⁻¹) contenidos medios zinc (2.03 mg kg⁻¹), contenidos medios en manganeso (5.71 mg kg⁻¹), contenidos altos en hierro (89 mg kg⁻¹) y contenidos bajos en boro (0.14 mg kg⁻¹). En cada bandeja se sembraron 4 g de semillas de *Lolium perenne*. Para la formulación del fertilizante se tuvieron en cuenta las características del sustrato, el requerimiento de la planta y la eficiencia estimada de los nutrientes, con lo cual se preparó un fertilizante que contenía 30,34 % de N, 7,47% de P₂O₅, 7,75% de K₂O, 1,80% de MgO y 1,62% de S y fue balanceado empleando Urea (59,61%), DAP (16,24%), KCl (12,91%), MgSO₄ (10,92%) y Azufre (0,31%). Una vez establecido el forraje se realizó un primer



corte de homogenización a los 30 días, se asignaron y aplicaron los tratamientos en forma aleatoria y se realizaron 6 cortes con intervalos de 15 días entre cortes, las muestras para los análisis experimentales se tomaron de los últimos 4 cortes.

Cuadro 1. Tratamientos experimentales en *Lolium perenne*

Tratamiento	Nanofertilizante usado (g)	Cantidad de fertilizante usado (g)
Control	0	0
4g Fert	0	4
8g Fert	0	8
12 g Fert	0	12
0,2 g ZnO + 4 g Fert	Óxido de Zinc – 0,2	4
0,2 g ZnO + 8 g Fert	Óxido de Zinc – 0,2	8
0,2 g ZnO + 12 g Fert	Óxido de Zinc – 0,2	12
0,2 g Zeolita + 4 g Fert	Zeolita – 0,2	4
0,2 g Zeolita + 8 g Fert	Zeolita – 0,2	8
0,2 g Zeolita + 12 g Fert	Zeolita – 0,2	12

Para la recolección de datos, se cosechó el forraje de cada bandeja experimental a 7 cm del suelo. El material vegetal se pesó, se deshidrató y se determinó la producción de biomasa fresca y seca.

Diseño Experimental y Aplicación en Cultivos de *Avena sativa*

Para el desarrollo experimental de la investigación se emplearon bandejas de vidrio de 0,3 m de largo x 0,3 m de ancho x 0,3 m de profundidad (0.027 m³). Cada bandeja fue llenada con 34 kg de un suelo Inceptisol, el cual fue mezclado uniformemente y caracterizado física y químicamente.

Se estableció un cultivo empleando 9 g de semilla por unidad experimental (bandeja). El primer corte se realizó a los 30 días de establecido el cultivo y posteriormente se realizaron 4 cortes cada 15 días. Los tratamientos de fertilización se establecieron con base en el aporte de nutrientes del suelo, la concentración de nutrientes en la planta y la absorción de nutrientes. Con lo cual se formuló un fertilizante balanceado (Urea – 56,99%, DAP – 17,60%, KCl – 12,57%, MgSO₄ – 11,73% y Azufre – 1,11%).

Los tratamientos de fertilización se realizaron empleando 0, 3 y 6 g del fertilizante balanceado junto a la adición de un nanofertilizante (TiO₂, ZnO y zeolita) a razón de 0,1 y 0,2 g por unidad experimental y corte. La primera aplicación del fertilizante se realizó en el primer corte.

Se empleo un diseño experimental completamente al azar con 1 tratamiento control, 4 tratamientos por cada nanofertilizante (3 y 6 g de fertilizante + 0.1 g y + 0.2 g de cada uno de los nanofertilizantes), para un total de 15 tratamientos totales (ver Cuadro 2).



Cuadro 2. Tratamientos experimentales en *Avena sativa*

Tratamiento	Nanofertilizante usado (g)	Cantidad de fertilizante usado (g)
Control	0	0
3g Fert	0	3
6g Fert	0	6
0,1 g Z + 3 g Fert	Zeolita – 0,1	3
0,1 g Z + 6 g Fert	Zeolita – 0,1	6
0,2 g Z + 3 g Fert	Zeolita – 0,2	3
0,2 g Z + 6 g Fert	Zeolita – 0,2	6
0,1 g TiO ₂ + 3 g Fert	Dióxido de Titanio – 0,1	3
0,1 g TiO ₂ + 6 g Fert	Dióxido de Titanio – 0,1	6
0,2 g TiO ₂ + 3 g Fert	Dióxido de Titanio – 0,2	3
0,2 g TiO ₂ + 6 g Fert	Dióxido de Titanio – 0,2	6
0,1 g ZnO + 3 g Fert	Óxido de Zinc – 0,1	3
0,1 g ZnO + 6 g Fert	Óxido de Zinc – 0,1	6
0,2 g ZnO + 3 g Fert	Óxido de Zinc – 0,2	3
0,2 g ZnO + 6 g Fert	Óxido de Zinc – 0,2	6

Diseño Experimental y Aplicación en Cultivos de *Medicago sativa*

El presente estudio se llevó a cabo bajo un diseño factorial completamente al azar, con una estructura 3 × 4. Se evaluaron tres niveles de nanozeolita (0, 0.5 y 1 g/m²) y cuatro niveles de fertilizante balanceado (0, 3, 6 y 9 g/bandeja), lo que resultó en un total de 12 combinaciones de tratamiento. Cada combinación fue replicada cuatro veces, sumando un total de 48 unidades experimentales. Cada unidad experimental consistió en una bandeja de poliestireno llenada con 17 kg de un suelo Inceptisol homogenizado.

Se partió de un suelo deficiente en sus características para la producción de cultivos: pH 4.3, materia orgánica 6.2%, potasio 0.09 cmol(+)kg⁻¹, magnesio 0.28 cmol(+)kg⁻¹, calcio 1.06 cmol(+)kg⁻¹, acidez intercambiable 4.2 cmol(+)kg⁻¹, aluminio intercambiable 3.2 cmol(+)kg⁻¹, fósforo 4.8 mg kg⁻¹, azufre 5.22 mg kg⁻¹, hierro 552 mg kg⁻¹, manganeso 18.2 mg kg⁻¹, Cu 1.63 mg kg⁻¹, boro 0.37 mg kg⁻¹, CIC 7.8 cmol(+)kg⁻¹. El diseño inicial se planteó con la aplicación de tratamientos en el suelo en condiciones iniciales y suelo con la adición de 21 g de cal y 300 ml de microorganismos eficientes por bandeja. En los tratamientos con condiciones iniciales de suelo, la germinación fue muy baja y las plantas que germinaron no sobrevivieron al primer corte.

Una vez establecido el cultivo se realizó un corte de homogenización a los 60 días, posteriormente se realizaron cortes cada 20 días (3 cortes experimentales). La fertilización se aplicó a partir del primer corte, el día después de cada corte. Se formuló un fertilizante que contenía: 23.5 % de N, 16.1 % de P₂O₅, 8.5 % de K₂O, 2.1 % de MgO y 2.1 % de S, el cual fue formulado con base en los requerimientos nutricionales de la alfalfa. Los tratamientos se mezclaron con 300 ml de agua y



fueron aplicados uniformemente sobre las bandejas. Igualmente, las plantas fueron regadas dos veces al día con microaspersores. Los cortes se realizaron a 5 cm del suelo, posteriormente cada muestra de cada unidad experimental fue pesada, deshidratada al sol, pesada nuevamente y molida. Posteriormente fueron llevadas al laboratorio donde termino de cuantificar su contenido en materia seca en horno a una temperatura de 105°C durante 24 horas. Con los datos obtenidos se estimó la producción de biomasa, *absorción y eficiencia en el uso del nitrógeno*.

Cuadro 3. Tratamientos experimentales en *Medicago sativa*

Tratamiento	Nanofertilizante usado (g)	Cantidad de fertilizante usado (g)
Control	0	0
0,05 g Zeolita Control	Zeolita – 0,05	0
0,1 g Zeolita Control	Zeolita – 0,1	0
3g Fert	0	3
6g Fert	0	6
9 g Fert	0	9
0,05 g Zeolita + 3 g Fert	Zeolita – 0,05	3
0,1 g Zeolita + 3 g Fert	Zeolita – 0,1	3
0,05 g Zeolita + 6 g Fert	Zeolita – 0,05	6
0,1 g Zeolita + 6 g Fert	Zeolita – 0,1	6
0,05 g Zeolita + 9 g Fert	Zeolita – 0,05	9
0,1 g Zeolita + 9 g Fert	Zeolita – 0,1	9

Diseño Experimental y Aplicación en Cultivos de *Zea mays*

Se implementó un diseño experimental de bloques completos al azar, con 5 tratamientos, 4 bloques y 4 réplicas por tratamiento, para un total de 80 unidades experimentales. Cada unidad experimental consistió en 1 m² con 8 plantas. Los tratamientos de fertilización consistieron en la aplicación del fertilizante balanceado mezclados con la nanopartícula (TiO₂, ZnO y zeolita) al 1%.

La fertilización consistió en una primera aplicación a los 10 días de germinación de las plantas donde se aplicaron 8 g por planta de un fertilizante que contenía 19.5, 23.8, 7.7, 2.0, 2.3 y 0.05% de N, P₂O₅, K₂O, Mg, S y Zn respectivamente. La segunda fertilización se aplicó a los 40 días de germinación, donde se aplicaron 6 g por planta de un fertilizante que contenía 27.7, 12.0, 8.7, 1.4, 1.7 y 0.05 de N, P₂O₅, K₂O, Mg, S y Zn respectivamente. La tercera fertilización se aplicó a los 70 días de germinación, donde se aplicaron 6 g por planta de un fertilizante que contenía 17.7, 9.0, 25.9, 0.9, 1.1 y 0.06 de N, P₂O₅, K₂O, Mg, S y B respectivamente.



En la cosecha se tomó cada planta de forma individual, se determinó la producción de biomasa en base fresca de cada uno de los componentes de la planta (hojas, tallo, espiga, granos, cascara, y corazón), se determinó el contenido en base seca en horno a 105°C por 24 horas y se determinó la producción de biomasa en base fresca y seca. Asimismo, a cada planta se le determinó su contenido en N, P y K para evaluar la absorción de nutrientes y la eficiencia en el uso del nitrógeno.

Eficiencia en el Uso del Nitrógeno

El contenido en nitrógeno en las plantas se cuantificó empleando un analizador elemental CHNS/O y con base en la producción de biomasa y el porcentaje en nitrógeno se determinó el nitrógeno absorbido. Se estimó la eficiencia agronómica (EAN), eficiencia de recuperación (ERN), eficiencia fisiológica (EFN) y factor parcial de productividad en el nitrógeno (FPPN), haciendo uso de las siguientes fórmulas:

$$\begin{aligned}\text{Eficiencia Agronómica: } & (RT_f - RT_t) / (NT_a) \\ \text{Eficiencia de Recuperación: } & (NT_f - NT_t) / (NT_a) \\ \text{Eficiencia Fisiológica: } & (RT_f - RT_t) / (NT_f - NT_t) \\ \text{Factor Parcial de Productividad: } & (RT_f) / (NT_a)\end{aligned}$$

Donde:

RT_f = g de materia seca (MS) producidos en el tratamiento con fertilización.

RT_t = g de MS producidos en el tratamiento sin fertilización.

NT_a = g del nutriente (N) aplicado en la fertilización.

NT_f = g de nutriente (N) absorbido en el tratamiento con fertilización.

NT_t = g de nutriente (N) absorbido en el tratamiento sin fertilización.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Eficiencia de recuperación del nitrógeno en *Lolium perenne*

La eficiencia de recuperación de nitrógeno presentó diferencias ($p < 0.05$). Esta eficiencia está correlacionada con la capacidad que tiene la planta para recuperar el nitrógeno que es adicionado a través de la fertilización. La absorción de nitrógeno de la planta estuvo influenciada por la cantidad de fertilizante y la aplicación de nanopartículas. Los tratamientos con 4 g presentaron la mayor eficiencia en el uso del nitrógeno, mientras que al aumentar la cantidad de fertilizante la

eficiencia disminuyó. Por otro lado, la aplicación de nanofertilizantes incrementó significativamente la eficiencia en el uso del nitrógeno, encontrando eficiencias de recuperación del 95,5 y 89,0% para los tratamientos con 4g de fertilizante + nanopartículas de ZnO y con 4g de fertilizante + nanopartículas de zeolita, respectivamente (ver Gráfico 1).

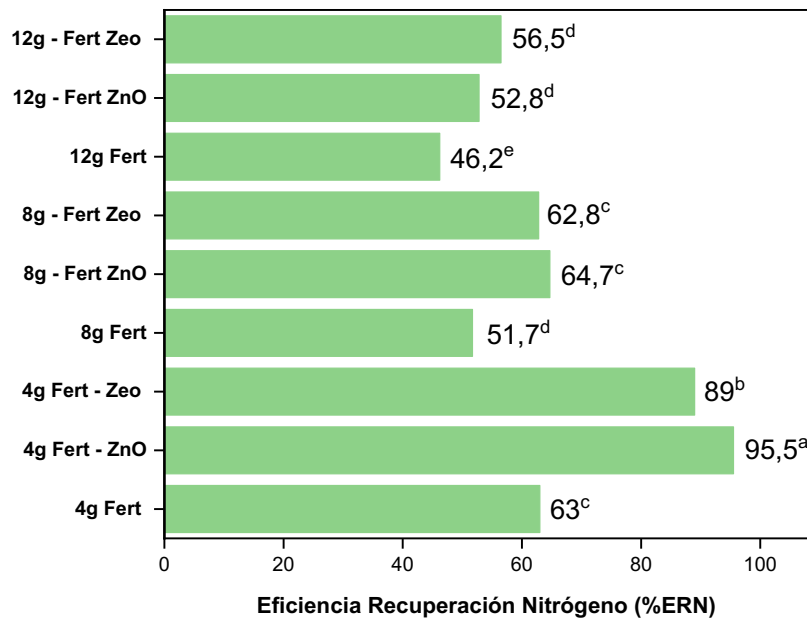


Gráfico 1. Eficiencia de recuperación del nitrógeno en *Lolium perenne*

De acuerdo con los hallazgos reportados por Aziz et al. (2019) y los resultados de este estudio, se confirma que tanto las nanopartículas de zeolita como de óxido de zinc generan una mejora en la absorción de nitrógeno en plantas de *L. perenne*. Los valores de ERN para la nanozeolita (89%) encontrados en este estudio fueron superiores a los hallados por Aziz et al., (2019). Por otro lado, la incorporación de nanopartículas de óxido de zinc demostró un impacto significativo en la eficiencia de recuperación del nitrógeno, alcanzando un valor máximo de 95,5%. Este resultado muestra que el tratamiento con ZnO obtuvo un 32,5% de eficiencia de recuperación por encima del tratamiento donde solo se utilizaron 4g de fertilizante (63%).

Eficiencia de recuperación del nitrógeno en *Avena sativa*

La eficiencia de recuperación de nitrógeno presentó diferencias ($p < 0.05$). La cantidad de fertilizante aplicado evidenció un efecto significativo sobre la eficiencia de recuperación: cuando se emplearon 3 g de fertilizante hubo una eficiencia del 80%, mientras que cuando se aplicaron 6 g de fertilizante la eficiencia bajó a un 32%. Es decir, el nitrógeno aplicado se perdió a través de lixiviados en forma de nitritos y nitratos y a través de emisiones de óxido nítrico y amoníaco. Además, se encontró que la adición de los nanofertilizantes generó un incremento significativo en

la eficiencia de recuperación del nitrógeno, pasando de 80 a 113% cuando se adicionaron 3 g de fertilizante y 0.1 g de nanozeolita. Esto quiere decir que la nanopartícula además de propiciar que se recupere la totalidad del nitrógeno, genera un estímulo en el suelo que permite que los microorganismos liberen más nitrógeno que está siendo tomado por la planta, indicando que las nanopartículas contribuyen a estimular la actividad microbiana en el suelo. Sin embargo, cuando se aplican dosis elevadas tanto de fertilizante (6 g) como de nanofertilizante (0,2 g), la eficiencia se reduce. Esto sugiere una posible intoxicación de las plantas, además de un incremento en la contaminación por lixiviación de nitritos y nitratos, así como en las emisiones de óxido nitroso y evidencian la importancia de fertilizar con base en la capacidad de la planta de absorber nutrientes (ver Gráfico 2).

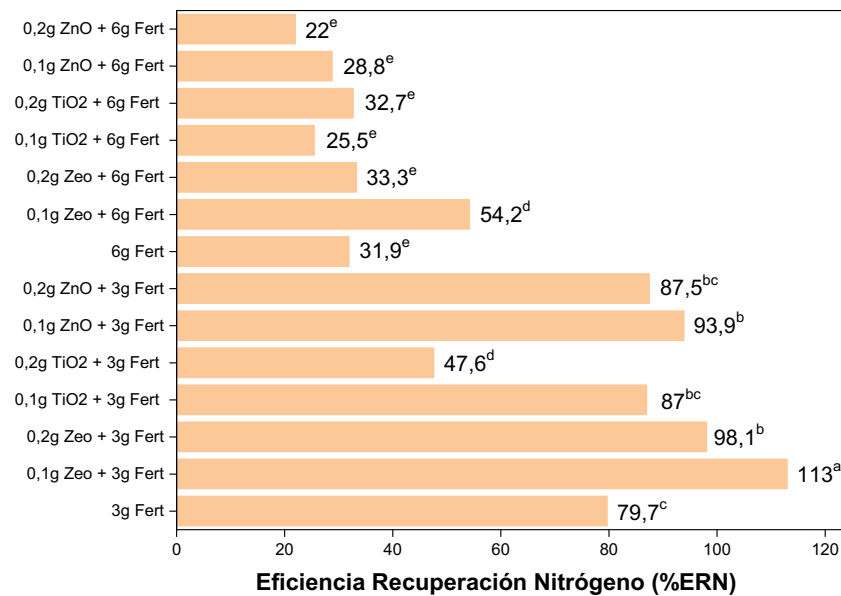


Gráfico 2. Eficiencia de recuperación del nitrógeno en *Avena sativa*

Eficiencia de recuperación del nitrógeno en *Medicago sativa*

La eficiencia de recuperación de nitrógeno presentó diferencias ($p < 0.05$). En el tratamiento con 3 g de fertilizante se recuperaron 0.83 g de N por cada g de N aplicado, sin embargo, cuando se adicionó la nanozeolita la recuperación fue de 1.33 y 1.45 g de N por g de N aplicado para el tratamiento F3g0.05gz y F3g0.1gz respectivamente, lo que estaría indicando un incremento en la disponibilidad de N en el suelo posiblemente por una interacción entre los microorganismos fijadores de N y la aplicación de la nanopartícula. Pese a que la eficiencia se redujo con el incremento en la fertilización, siempre se observó un incremento con la adición de la nanopartícula. En los tratamientos con 6 g de fertilizante, la eficiencia en el uso del N se



incrementó en el 24.1 y 44.4% cuando se adicionaron 0.05 g y 0.1 g de la nanopartícula respectivamente. Para los tratamientos con 9 g los incrementos fueron del 9.9 y 4.0% para los tratamientos con 0.05 g y 0.1 g de la nanopartícula respectivamente, los cuales fueron menores a los tratamientos con menos fertilizante, posiblemente por una saturación de N en la planta (ver Gráfico 3). Se evidencia la importancia de formular fertilizaciones adecuadas donde pese a que se produce menor biomasa, se incrementa significativamente la eficiencia en el uso del N, se incrementa la rentabilidad y se reducen las emisiones de óxido nitroso y lixiviación de nitratos y nitratos en el suelo.

El factor parcial de productividad presentó diferencias ($P < 0.05$). En el tratamiento F3g por cada g de N aplicado se produjeron 42.9 g de biomasa seca y un incremento de 2.3 y 3.1g en los tratamientos F3g0.05gz y F3g0.1gz respectivamente. En el tratamiento F6g la producción de biomasa fue de 22.3 g por g N aplicado y un incremento en la producción de biomasa del 9.9 y 20.3% cuando se adicionaron 0.05 y 0.1 g de nanozeolita respectivamente. Esta tendencia se redujo significativamente con 9 g de fertilizante, donde el FPP bajo a 15.4, 17.5 y 16.4 g de MS por cada g de nitrógeno aplicado. Estos resultados evidencian nuevamente la importancia de formular las dosis adecuadas de fertilizantes y la aplicación de productos que incrementen su eficiencia (ver Gráfico 3).

La eficiencia agronómica del nitrógeno presentó diferencias ($p < 0.05$). En el tratamiento F3 g por cada g de N aplicado se incrementó la producción de biomasa en 18.3 g de MS, mientras en el tratamiento F3g0.05gz y F3g0.1gz el incremento fue de 20.6 y 21.3 g de MS por g de N aplicado respectivamente. En los tratamientos con 6 g de fertilizante la producción de biomasa seca se incrementó en 2.2 y 4.5 g por g de N aplicado cuando se adicionaron 0.05 g y 0.1 g de la nanopartícula respectivamente. Mientras en los tratamientos con 9 g el incremento fue de 2.1 y 1.0 g respectivamente. Es decir, se observó un incremento con la aplicación de la nanopartícula. Sin embargo, el incremento fue mayor en los tratamientos con menores dosis de fertilizante (Gráfico 3).

La eficiencia fisiológica del N evidenció diferencias ($p < 0.05$). Por cada gramo de absorción de N en la planta se produjeron 22.2, 15.7 y 14.7 g de biomasa seca para los tratamientos F3g, F3g0.05gz y F3g0.1gz respectivamente. La misma tendencia se observó en los tratamientos con 6 g de fertilizante, donde la eficiencia fisiológica para la producción de biomasa se redujo con la aplicación de la nanopartícula (ver Gráfico 3). Esto se debe a la alta eficiencia que presenta la alfalfa para absorber el N y transformarlo en proteína. En el tratamiento con 6 g de fertilizante la eficiencia fisiológica fue de 21.7, 17.5, 16.1 g de biomasa por g de N absorbido (ver Gráfico 3), mientras que las concentraciones de proteína fueron de 28.4, 32.0, 34.0% y las producciones de

proteína de 12.56, 15.54 y 18.05 t de proteína ha año-1 para F6g, F6g0.05gz y F6g0.1gz respectivamente. Encontrando que cuando se incrementa la absorción de N se reduce la producción de biomasa por g absorbido de N, pero se incrementa la concentración y producción de proteína. En los tratamientos con 9 g de fertilizante no se observaron diferencias estadísticas en la eficiencia fisiológica de fertilización ni en las concentraciones de proteína por una posible saturación de N.

La eficiencia en el uso del N en la alfalfa con la adición de nanopartículas de zeolita evidencia la capacidad que tiene la planta para absorber altas cantidad de nitrógeno y transformarlo en biomasa. Igualmente, se observa el efecto de las nanopartículas para incrementar la producción de proteína, sin embargo, esta se encuentra limitada por la capacidad de la planta para absorber nutrientes, producir biomasa y compuestos nitrogenados.

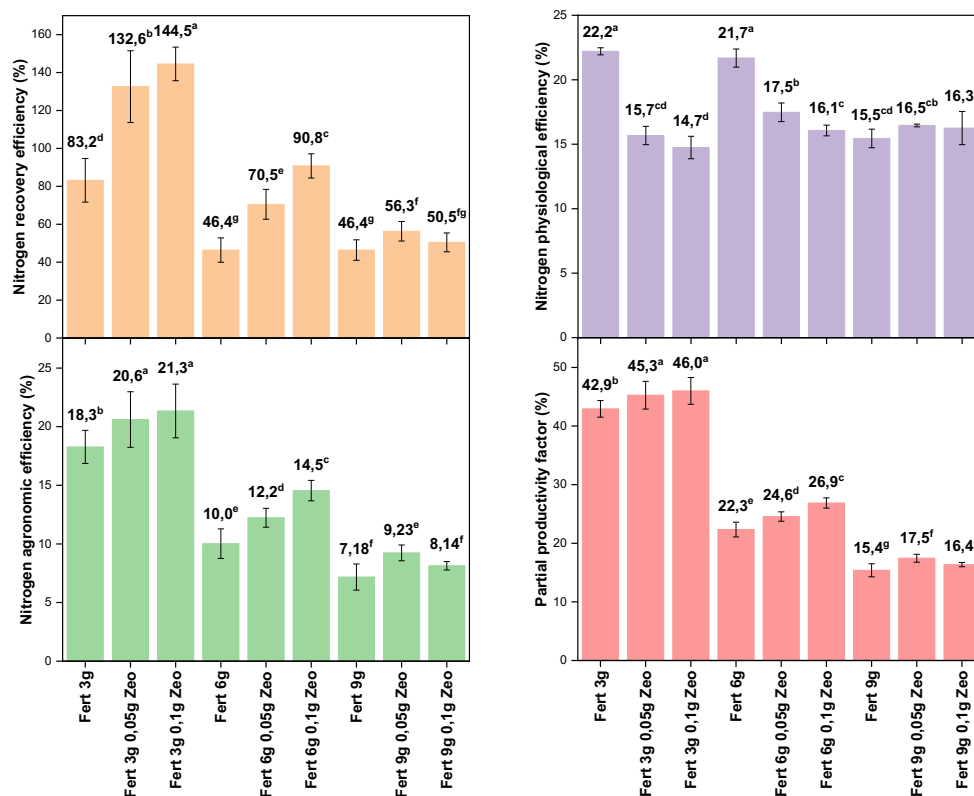


Gráfico 3. Eficiencia en el uso del nitrógeno en Medicago sativa.

Eficiencia en el uso del nitrógeno y absorción de nutrientes en maíz

La eficiencia en la recuperación de N mostró diferencias ($P < 0.05$) entre los tratamientos, con un incremento asociado a la aplicación de nanopartículas. El tratamiento con TiO_2 registró la mayor eficiencia, seguido por ZnO . Este comportamiento se atribuye a la naturaleza catalítica de las nanopartículas, que favorecen los procesos bioquímicos en el suelo y mejoran la disponibilidad de nitrógeno. El maíz es un cultivo con alta capacidad de absorción de nutrientes y elevada producción de biomasa, lo cual potencia el aprovechamiento del nitrógeno. Los resultados indican que por cada kg de N aplicado la planta absorbe en el tratamiento con TiO_2 , 0.681 kg de N, mientras en el tratamiento con solo fertilizante se absorben 0.549 kg (ver Gráfico 4).

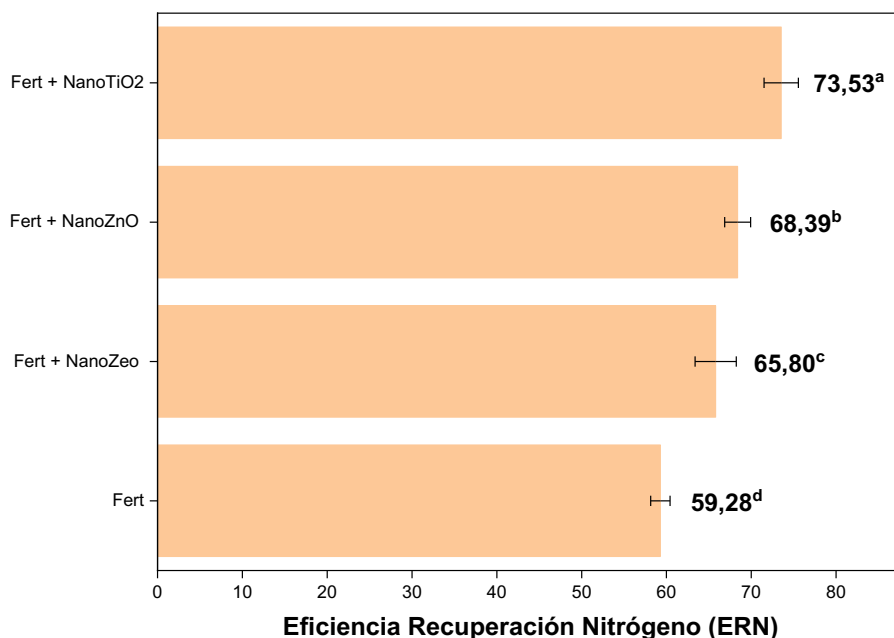


Gráfico 4. Eficiencia de recuperación de nitrógeno en plantas de maíz.

La eficiencia agronómica del N mostró diferencias significativas ($P < 0.05$), con los valores más altos en los tratamientos con nanopartículas. En el tratamiento FertTiO_2 se produjeron 34.8 kg de grano por cada kg de N aplicado, mientras que en el tratamiento con fertilizante convencional la producción fue de 25.2 kg, lo que representa un incremento de 9.6 kg de grano por kg de N aplicado (ver Gráfico 5).

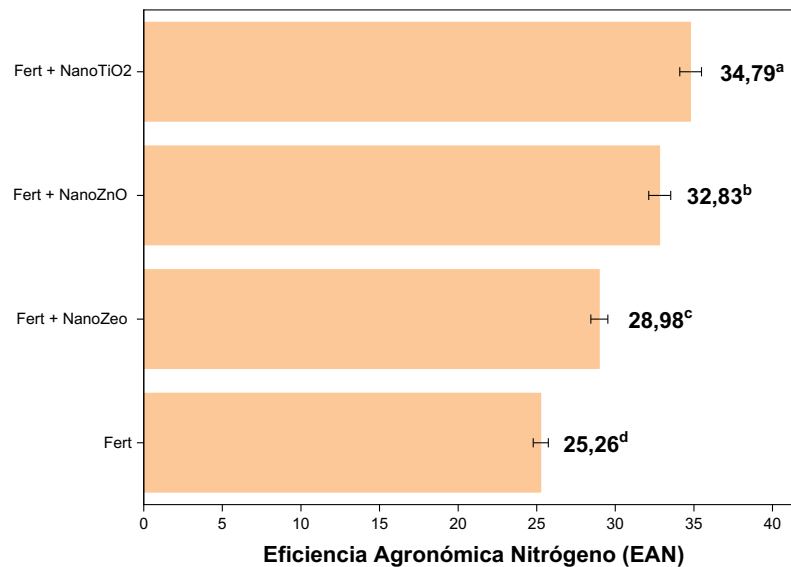


Gráfico 5. Eficiencia agronómica del nitrógeno en plantas de maíz.

La eficiencia fisiológica del N presentó diferencias significativas ($P < 0.05$). Por cada gramo de N absorbido, la planta produjo 42.6, 44.1, 47.9 y 47.3 g de grano en los tratamientos Control, Fertilizante, FertNanozeolita, FertZnO y FertTiO₂, respectivamente. Estos resultados muestran incrementos de hasta 4.7 g de grano por cada gramo de N absorbido en comparación con el tratamiento con fertilizante convencional, posiblemente asociados a una mayor eficiencia en la absorción y aprovechamiento de otros nutrientes (ver Gráfico 6).

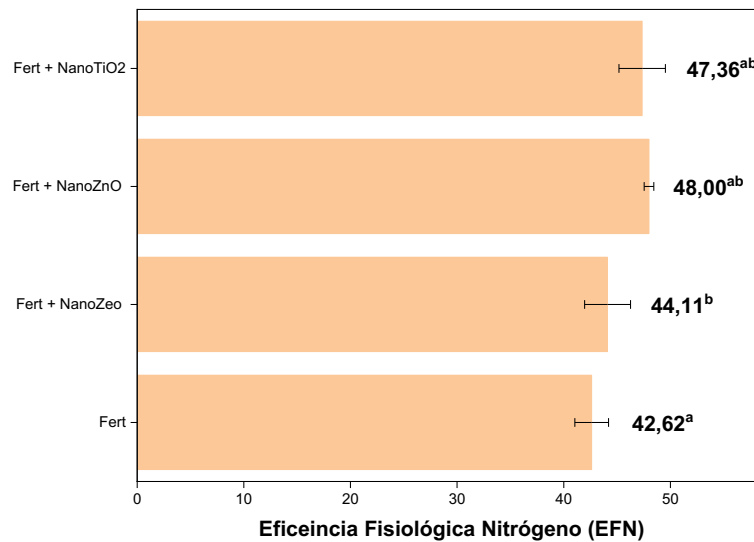


Gráfico 6. Eficiencia fisiológica del nitrógeno en plantas de maíz.

El factor parcial de productividad presentó diferencias ($P < 0.05$). En el tratamiento fertilizante por cada g de N aplicado se produjeron 32.8 g de grano de maíz y un incremento de 3.7, 7.5, y 9.5 g cuando se implementaron los tratamientos FertNanozeolita, FertZnO y FertTiO₂ respectivamente. Evidenciando nuevamente el efecto de la aplicación de las nanopartículas sobre la eficiencia en la fertilización y productividad del cultivo (ver Gráfico 7).

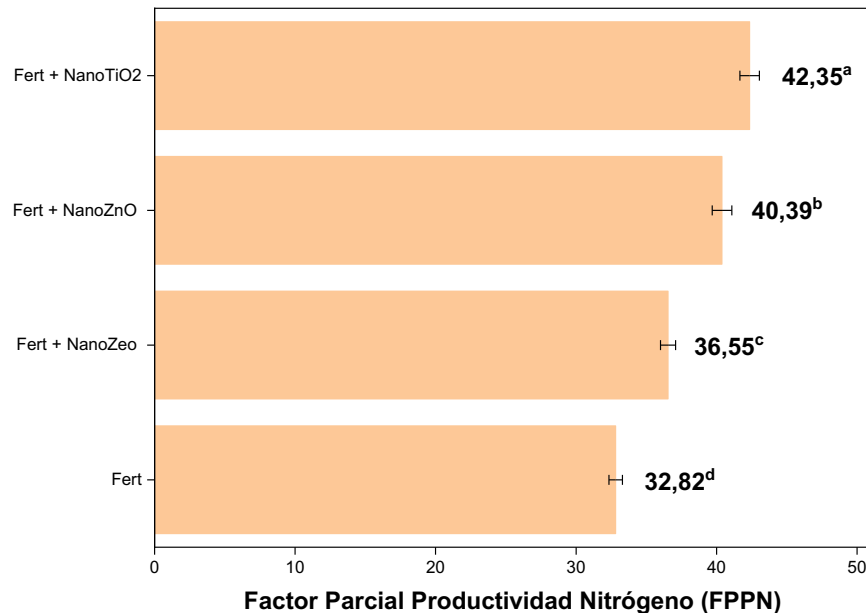


Gráfico 7. Factor parcial de productividad del nitrógeno en plantas de maíz.

La absorción de nitrógeno, fósforo y potasio en el cultivo de maíz presentó diferencias significativas ($P < 0.05$) entre los tratamientos, con incrementos en aquellos que incluyeron nanopartículas. En el tratamiento FertTiO₂ la absorción alcanzó 252.1, 111.0 y 466.5 kg ha⁻¹ año⁻¹ de N, P y K, respectivamente, mientras que en el tratamiento con fertilizante convencional se registraron 213.0, 77.8 y 393.2 kg ha⁻¹ año⁻¹. Estos resultados evidencian el mayor potencial de absorción de nutrientes del cultivo bajo condiciones de fertilización con nanopartículas (ver Gráfico 8).

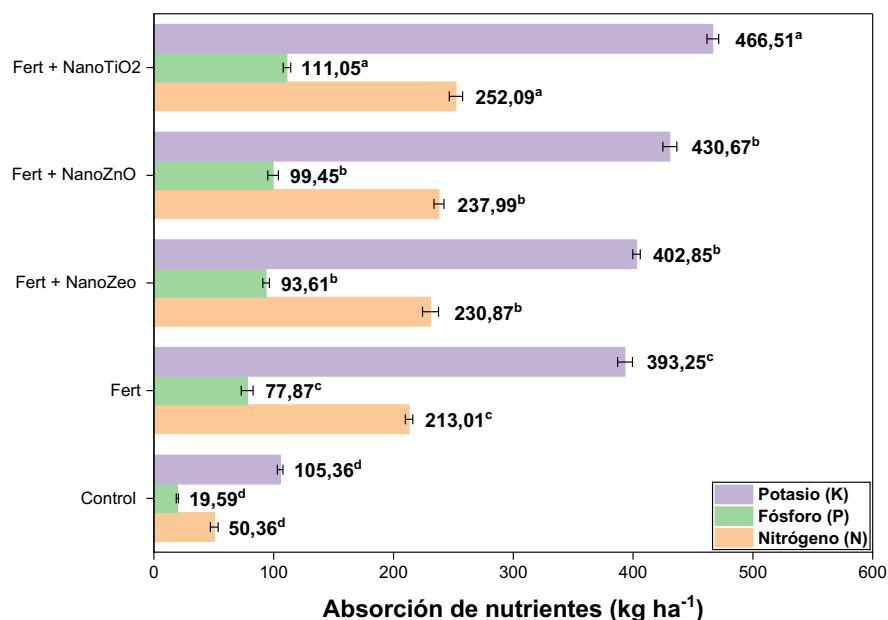


Gráfico 8. Absorción de N, P y K en plantas de maíz.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

La adición de nanopartículas de óxido de zinc y zeolita en la fertilización en plantas de *Lolium perenne* incrementa significativamente la eficiencia en el aprovechamiento del nitrógeno, lo que convierte a esta tecnología en una gran alternativa para reducir los costos por fertilización y mitigar los efectos por lixiviación de nitritos y nitratos, así como las emisiones edáficas de óxido nitroso.

Para las plantas de *Avena Sativa*, se evidenció que altas dosis de fertilizante redujeron la eficiencia en el uso de nutrientes conllevando a una baja eficiencia en el uso de los nutrientes y una mayor contaminación. Dosis adecuadas con la adición de nanopartículas incrementaron significativamente el uso del nitrógeno y potencializaron la mineralización de nutrientes del suelo.

En las plantas de *Medicago Sativa* la aplicación de bajas dosis de fertilizante con 0,1g de nanopartículas de zeolita presentaron eficiencias de recuperación de nitrógeno superiores al 100%. Sin embargo, al considerar la producción de biomasa, el tratamiento más eficiente en la recuperación de este nutriente fue 6 g de fertilizante + 0,1 g de nanozeolita, indicio de que la adición de nanozeolita incrementa la absorción de nitrógeno por parte de la planta dejando



menores residuos, lo que, a su vez, evita menores efectos nocivos en el medio ambiente y en los ecosistemas edáficos y acuáticos.

La aplicación de nanopartículas en la producción de maíz incrementó significativamente la eficiencia en el uso del nitrógeno, lo que se tradujo en una mayor productividad y un uso más eficiente de los fertilizantes. En particular, las nanopartículas de TiO_2 promovieron un mayor desarrollo vegetativo y una mayor producción de grano, efecto asociado a su acción catalítica que favorece las reacciones bioquímicas del suelo y aumenta la disponibilidad de nutrientes para la planta. Dado que el maíz es un cultivo con alta capacidad de absorción de nutrientes, logra aprovechar de manera eficiente el nitrógeno disponible lo que se traduce en mayor productividad.

Se recomienda realizar combinaciones de las nanopartículas de zeolita con nanopartículas de TiO_2 o ZnO con el propósito de aprovechar la capacidad que tienen los catalizadores para optimizar las reacciones bioquímicas del suelo liberando nutrientes y la capacidad de la zeolita para capturar nutrientes y liberarlos progresivamente hacia la solución del suelo.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Aziz, Y., Shah, G. A., & Rashid, M. I. (2019). ZnO nanoparticles and zeolite influence soil nutrient availability but do not affect herbage nitrogen uptake from biogas slurry. *Chemosphere*, 216, 564–575. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2018.10.119>
- Botero, J. M., Gómez, A., & Botero, M. A. (2019). Nutrient Absorption in Tithonia Diversifolia. *Agriculture and Entomology*, 24(1), 33–48.
- Congreves, K. A., Otchere, O., Ferland, D., Farzadfar, S., Williams, S., & Arcand, M. M. (2021). Nitrogen use efficiency definitions of today and tomorrow. *Frontiers in Plant Science*, 12, 637108. <https://doi.org/10.3389/fpls.2021.637108>
- Duan, Q., Jiang, S., Chen, F., Li, Z., Ma, L., Song, Y., Yu, X., Chen, Y., Liu, H., & Yu, L. (2023). Fabrication, evaluation methodologies and models of slow-release fertilizers: A review. *Industrial Crops and Products*, 192, 116075. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2022.116075>
- Dubey, A., & Mailapalli, D. R. (2016). *Nanofertilisers, Nanopesticides, Nanosensors of Pest and Nanotoxicity in Agriculture* (pp. 307–330). https://doi.org/10.1007/978-3-319-26777-7_7
- Elrys, A. S., Elnahal, A. S., Abdo, A. I., Desoky, E.-S. M., Selem, E., & Rady, M. M. (2022). Traditional, Modern, and Molecular Strategies for Improving the Efficiency of Nitrogen Use in Crops for Sustainable Agriculture: a Fresh Look at an Old Issue. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 22(3), 3130–3156. <https://doi.org/10.1007/s42729-022-00873-1>



- Fixen, P., Brentrup, F., Bruulsema, T., Garcia, F., Norton, R., & Zingore, S. (2015). Nutrient/fertilizer use efficiency: Measurement, current situation and trends. In *Managing Water and Fertilizer for Sustainable Agricultural Intensification* (pp. 8–38). International Fertilizer Industry Association (IFA), International Plant Nutrition Institute (IPNI), International Potash Institute (IPI)
- Govindasamy, P., Muthusamy, S. K., Bagavathiannan, M., et al. (2023). Nitrogen use efficiency — a key to enhance crop productivity under a changing climate. *Frontiers in Plant Science*, 14, 1121073. <https://doi.org/10.3389/fpls.2023.1121073>
- Jarosz, R., Szerement, J., Gondek, K., & Mierzwa-Hersztek, M. (2022). The use of zeolites as an addition to fertilisers – A review. *CATENA*, 213, 106125. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2022.106125>
- Kekeli, M. A., Wang, Q., & Rui, Y. (2025). The Role of Nano-Fertilizers in Sustainable Agriculture: Boosting Crop Yields and Enhancing Quality. *Plants*, 14(4), 554. <https://doi.org/10.3390/plants14040554>
- Khan, M. Z. H., Islam, M. R., Nahar, N., Al-Mamun, M. R., Khan, M. A. S., & Matin, M. A. (2021). Synthesis and characterization of nanozeolite based composite fertilizer for sustainable release and use efficiency of nutrients. *Heliyon*, 7(1), e06091. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2021.e06091>
- Li, B., Wang, Y., Zhang, J., & Chen, X. (2023). In-season assessment of agronomic nitrogen use efficiency in maize systems. *Frontiers in Plant Science*, 14, 1128799. <https://doi.org/10.3389/fpls.2023.1128799>
- Mălinaș, A., (2022). Current status and future prospective for nitrogen use efficiency in wheat (*Triticum aestivum* L.). *Plants*, 11(2), 217. <https://doi.org/10.3390/plants11020217>
- Ming, D. W., & Allen, E. R. (2001). Use of Natural Zeolites in Agronomy, Horticulture and Environmental Soil Remediation. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, 45(1), 619–654. <https://doi.org/10.2138/rmg.2001.45.18>
- Nilmini, A. (2021). Nanofertilizers: A novel Approach Towards a Sustainable Agriculture. *Journal of Research and Technology and Engineering*, 2(1).
- Saurabh, K., Prakash, V., Dubey, A. K., Ghosh, S., Kumari, A., Sundaram, P. K., Jeet, P., Sarkar, B., Upadhyaya, A., Das, A., Kumar, S., Makarana, G., Kumar, U., Kumar, A., & Singh, R. R. (2024). Enhancing sustainability in agriculture with nanofertilizers. *Discover Applied Sciences*, 6(11), 559. <https://doi.org/10.1007/s42452-024-06267-5>



- Wang, J. L., Liu, K. Lou, Zhao, X. Q., Zhang, H. Q., Li, D., Li, J. J., & Shen, R. F. (2021). Balanced fertilization over four decades has sustained soil microbial communities and improved soil fertility and rice productivity in red paddy soil. *Science of The Total Environment*, 793, 148664. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.148664>
- Xu, G., Fan, X., & Miller, A. J. (2012). Plant Nitrogen Assimilation and Use Efficiency. *Annual Review of Plant Biology*, 63(1), 153–182. <https://doi.org/10.1146/annurev-arplant-042811-105532>
- Zhang, H., Zhai, H., Zan, R., Tian, Y., Ma, X., Ji, H., & Zhang, D. (2025). Balanced Fertilization Improves Crop Production and Soil Organic Carbon Sequestration in a Wheat–Maize Planting System in the North China Plain. *Plants*, 14(6), 838. <https://doi.org/10.3390/plants14060838>

INSTITUCIONES PARTICIPANTES



UNIVERSIDAD
TÉCNICA DE
MANABÍ
Fundada en 1952

Secretaría Técnica Administrativa



Con el apoyo de:



www.fontagro.org

Correo electrónico: fontagro@fontagro.org