



Uleam
UNIVERSIDAD LAICA
ELOY ALFARO DE MANABÍ

**FACULTAD DE CIENCIAS DE LA VIDA Y
TECNOLOGÍAS**

CARRERA DE INGENIERÍA AGROPECUARIA

ESTUDIO DE CASO

**TRABAJO DE TITULACIÓN PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL
TÍTULO DE INGENIERO AGROPECUARIO**

TEMA

“APLICACIÓN DE NANOFERTILIZANTES EN SUELO Y
CULTIVOS HORTÍCOLAS: UNA REVISIÓN SOBRE EL
POTENCIAL DE LA NANOTECNOLOGÍA EN ECUADOR”

AUTOR

LUIS ANDRÉS CEDEÑO VINCES

TUTOR

ING. LIZ SABRINA TRUEBA MACÍAS, Mg.

MANTA-MANABÍ-ECUADOR

2025

MIEMBROS DEL TRIBUNAL

Los respectivos integrantes del tribunal, declaran que han aprobado el presente trabajo de titulación “**APLICACIÓN DE NANOFERTILIZANTES EN SUELO Y CULTIVOS HORTÍCOLAS: UNA REVISIÓN SOBRE EL POTENCIAL DE LA NANOTECNOLOGÍA EN ECUADOR**”, del egresado **LUIS ANDRÉS CEDEÑO VINCES**, luego de haber sido analizada por los señores Miembros del Tribunal de Grado, en cumplimiento de lo que establece la ley se da por aprobada la sustentación, acción por la cual se hace merecedora al título de Ingeniero agropecuario.



Ing. Francisco Cañarte García, Mg

Miembro del Tribunal



Ing. Paola Alcívar Vaca, Mg

Miembro del Tribunal

CERTIFICACIÓN DEL TUTOR

Yo, Ing. Liz Sabrina Trueba Macías, certifico haber tutelado el presente trabajo de titulación “**APLICACIÓN DE NANOFERTILIZANTES EN SUELO Y CULTIVOS HORTÍCOLAS: UNA REVISIÓN SOBRE EL POTENCIAL DE LA NANOTECNOLOGÍA EN ECUADOR**”, del egresado **LUIS ANDRÉS CEDEÑO VINCES** de la carrera de Ingeniería agropecuaria, previo a la obtención del título de Ingeniero agropecuario, de acuerdo con el reglamento para la elaboración de tesis de grado de tercer nivel, de la Universidad Eloy Alfaro de Manabí.



Ing. Liz Sabrina Trueba Macías

Tutor

DECLARACIÓN DEL AUTORIA

Yo, **LUIS ANDRÉS CEDEÑO VINCES**, egresado de la Facultad de Ciencias de la vida y Tecnologías, de la carrera de Ingeniería agropecuaria, libre y voluntariamente declaramos que la responsabilidad del contenido de la presente investigación titulada **“APLICACIÓN DE NANOFERTILIZANTES EN SUELO Y CULTIVOS HORTÍCOLAS: UNA REVISIÓN SOBRE EL POTENCIAL DE LA NANOTECNOLOGÍA EN ECUADOR”**, del egresado corresponde exclusivamente al tutor y patrimonio intelectual del autor, dejando establecido que aquellos aportes intelectuales de otros autores se han referenciado debidamente en el texto de dicho trabajo.



Luis Andrés Cedeño Vincés

©2024, Luis Andrés Cedeño Vincés

Se autoriza la reproducción total o parcial, con fines académicos, por cualquier medio o procedimiento, incluyendo la cita bibliográfica del documento, siempre y cuando se reconozca el Derecho de Autor.

AGRADECIMIENTO

De corazón agradezco a mis queridos padres, que con esfuerzo, amor y humildad me llenaron de valores y estudios que permitieron guiarme por un buen camino y ser la persona que hoy en día soy, además de su apoyo incondicional y ser pilares fundamentales a lo largo de mi carrera universitaria y en la vida.

También agradezco a mis hermanos y abuela, por su apoyo constante para lograr ser el profesional que soy hoy en día, además de agradecer a mis excelentes maestros docentes de la Facultad de Ciencias de la Vida y Tecnologías por haber compartido sus conocimientos a lo largo de mi preparación académica.

DEDICATORIA

El presente trabajo lo dedico a mis padres quienes con su apoyo incondicional y la confianza que me brindaron permitieron que se conviertan en mi inspiración a salir adelante le dedico este trabajo a ellos porque no hay amor más puro y real que el amor de familia.

ÍNDICE GENERAL

MIEMBROS DEL TRIBUNAL.....	II
CERTIFICACIÓN DEL TUTOR.....	III
DECLARACIÓN DEL AUTORIA	IV
AGRADECIMIENTO	V
DEDICATORIA	VI
RESUMEN.....	1
ABSTRACT.....	2
I. ANTECEDENTES Y ESTADO ACTUAL DEL TEMA	3
II. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	4
III. JUSTIFICACIÓN	5
IV. OBJETIVOS.....	7
4.1. Objetivo general.....	7
4.2. Objetivos específicos.....	7
V. METODOLOGÍA.....	8
VI. MARCO TEÓRICO	9
6.1. Nanofertilizantes.....	9
6.1.1 Tipos de nanofertilizante	9
6.1.2. Ventajas y Desventajas de cada tipo de nanofertilizante	11
6.2. Mecanismo de acción de los nanofertilizantes	15
6.3. Modos de aplicación de nanofertilizantes	15
6.4. Ventajas de los nanofertilizantes frente a los fertilizantes químicos convencionales.....	17
VII. RESULTADOS	20
7.1. Resultados generales.....	20
7.2. Uso de nanofertilizantes y su efecto sobre cultivos agrícolas.....	20
7.3. Alcance del uso de nanofertilizantes en Ecuador, riesgos y desafíos	24

VIII. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	27
8.1. Conclusiones	27
8.2. Recomendaciones	28
REFERENCIAS	29

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Tipos de nanofertilizantes con su respectiva descripción, datos relevantes y uso en algunos cultivos agrícolas.	9
Tabla 2. Ventajas y desventajas de cada tipo de nanofertilizante.	12
Tabla 3. Comparación de los materiales y costos utilizados en diferentes tecnologías de fertilizantes, clasificados en categorías.	14
Tabla 4. Tabla comparativa de los tres métodos principales de aplicación de nanofertilizantes:.....	16
Tabla 5. Tabla comparativa de los tres métodos principales de aplicación de nanofertilizantes en relación a su eficacia.	17
Tabla 6. Comparación del uso de nanofertilizantes frente a los fertilizantes convencionales.	18
Tabla 7. Efectos de la aplicación foliar de nanofertilizantes en diferentes cultivos	21
Tabla 8. Información de los nanofertilizantes y algunas de sus limitaciones en Ecuador.	25

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Flujograma o PRISMA de selección de literatura.....	8
Figura 2. Mecanismo de acción de nanofertilizantes de liberación controlada (FLC) de nutrientes en campo.	15

RESUMEN

Los nanofertilizantes son herramientas importantes en la agricultura para mejorar el crecimiento de los cultivos, el rendimiento y los parámetros de calidad, por tal motivo el presente estudio tuvo como objetivo describir el uso de nano fertilizantes y sus efectos en suelo y cultivo. La metodología del presente trabajo fue cualitativa con la recopilación de información de revistas científicas de los últimos 5 años. Los resultados indicaron que los nanofertilizantes ofrecen un gran potencial en la agricultura al mejorar la entrega de nutrientes a las plantas, estimular su crecimiento y conservar agua y nutrientes en el suelo, se clasifican en cuatro tipos principales: de liberación controlada, para entrega selectiva, estimulantes del crecimiento vegetal y que controlan la pérdida de agua y nutrientes, además entre los métodos de aplicación incluyen foliar, nanocebado de semillas y tratamiento del suelo, con el nanocebado de semillas destacando por su eficacia en diferentes criterios. Cabe mencionar que, en el presente estudio, los nanofertilizantes superan a los fertilizantes convencionales en eficiencia de absorción, modos de liberación de control y tasa de fertilizante necesaria. Se concluye que los nanofertilizantes representan una innovadora herramienta agrícola con múltiples beneficios, aunque presentan desafíos como costos elevados y preocupaciones sobre seguridad y regulación, su potencial para mejorar la sostenibilidad agrícola en Ecuador y más allá es prometedor, requiriendo una colaboración integral entre diversos actores para maximizar su impacto positivo.

Palabras clave: Nanofertilizantes, suelo, cultivos, efecto.

ABSTRACT

Nanofertilizers are important tools in agriculture to improve crop growth, yield and quality parameters, for this reason the present study aimed to describe the use of nano fertilizers and their effects on soil and crops. The methodology of this study was qualitative with the collection of information from scientific journals of the last 5 years. The results indicated that nanofertilizers offer great potential in agriculture by improving the delivery of nutrients to plants, stimulating their growth and conserving water and nutrients in the soil, they are classified into four main types: controlled-release, for selective delivery, plant growth stimulants and controlling water and nutrient loss, In addition, application methods include foliar, seed nanoprimering and soil treatment, with seed nanoprimering standing out for its effectiveness in different criteria. It is worth mentioning that, in the present study, nanofertilizers outperform conventional fertilizers in absorption efficiency, control release modes, and fertilizer rate needed. It is concluded that nanofertilizers represent an innovative agricultural tool with multiple benefits, although they present challenges such as high costs and concerns about safety and regulation, their potential to improve agricultural sustainability in Ecuador and beyond is promising, requiring comprehensive collaboration between various actors to maximize their positive impact.

Keywords: Nanofertilizers, soil, crops, effect.

I. ANTECEDENTES Y ESTADO ACTUAL DEL TEMA

En los últimos años, la nanotecnología ha emergido como una solución prometedora en la agricultura, especialmente en la formulación de nanofertilizantes, que permiten mejorar la eficiencia en la absorción de nutrientes esenciales por parte de las plantas. Gade et al. (2023) señalan que los nanofertilizantes pueden regular de manera controlada la liberación de nutrientes en el suelo, lo que maximiza su disponibilidad para los cultivos y reduce las pérdidas de nutrientes por lixiviación o volatilización.

A nivel global, investigaciones también han demostrado que la implementación de nanofertilizantes no solo contribuye a una agricultura más sostenible, sino que también ayuda a reducir la dependencia de fertilizantes convencionales que alteran la ecología química del suelo y afectan negativamente los ecosistemas circundantes (Vázquez, 2023). En Ecuador, esta tecnología podría representar un avance hacia la sostenibilidad agrícola, con un enfoque en cultivos hortícolas de alto valor. Sin embargo, aún existen desafíos técnicos y económicos que limitan su aplicación a gran escala, entre ellos la necesidad de evaluar su efectividad en condiciones locales y su impacto a largo plazo sobre la salud del suelo y la biodiversidad.

No obstante, la nanotecnología que es la ciencia que se ocupa de objetos que varían en tamaño de 1 a 100 nanómetros (Lira et al. 2018) ha demostrado grandes alcances en la agricultura, enfatizando sus numerosas aplicaciones en los sectores agrícolas principalmente en Norte América y Asia (Nazari et al. 2023, Husted et al. 2023, Martez 2022, Brar et al. 2023), desarrollando herramientas para mejorar la capacidad de las plantas para absorber nutrientes y acelerar el crecimiento, como la producción de nano fertilizantes para aumentar el rendimiento de los cultivos (Pandey et al. 2023).

La Universidad Industrial, de Santander (2023) en Colombia mediante su iniciativa "Nanofertilizantes en el suelo y emisiones de óxido nitroso", desarrollada por investigadores de la Universidad Industrial de Santander y la

Universidad Técnica de Manabí (UTM) en Portoviejo (Ecuador), fue escogida entre los 18 proyectos que impulsa Fontagro en el encuentro de la Misión de Innovación Agrícola para el Clima, para hacer frente al cambio climático y al hambre en el mundo, llevándose a cabo primero en EE.UU y en Emiratos Árabes.

En Ecuador, esta tecnología aún está en fase experimental, pero estudios recientes destacan su potencial para incrementar la productividad de cultivos hortícolas mediante la mejora de la eficiencia en el uso de fertilizantes y la mitigación de impactos ambientales negativos, tales como la contaminación de suelos y cuerpos de agua por exceso de nutrientes (Glotra & Singh, 2023).

II. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Actualmente en todo el mundo los fertilizantes son una necesidad para la producción de alimentos, pues alrededor del 40 y 60% de alimentos en el mundo dependen de su uso (TFI 2012), pues de los productos que se benefician de su uso no sólo se obtienen alimentos, también forraje, vestimenta, y otros (Morales *et al.* 2019). A nivel mundial, los mayores exportadores de agroquímicos a Ecuador son Asia y Europa (Jaime *et al.* 2020), de tal manera que existe una alta dependencia de las importaciones de fertilizantes en nuestro país, principalmente de N, P y K (Llive *et al.* 2015), de hecho para 2018 se utilizaron más de 200 millones de ton de fertilizantes (FAO 2019).

Las evaluaciones de estudios a largo plazo muestran que la contribución promedio de los fertilizantes químicos a los rendimientos de los cultivos suele oscilar entre el 40% y el 60% en climas templados y tiende a ser mucho mayor en las regiones tropicales (Husted *et al.* 2023). Dada la nueva tierra cultivable limitada en el mundo y la escasez de recursos hídricos, el uso de fertilizantes agrícolas tendrá que aumentar drásticamente para lograr el aumento necesario en la producción de alimentos.

Además, se han observado mejoras en la aplicación de nitrógeno así como de otros nutrientes, debido que generalmente cerca del 60 o 70 % es absorbido por

las plantas y la cantidad restante se pierde, acarreado problemas de acumulación de sustancias en el suelo que posteriormente se pueden lixiviar y contaminar otros ecosistemas o transformar en gases de efecto invernadero como el óxido nitroso (Universidad Industrial de Santander 2023), y su uso excesivo altera irreversiblemente la ecología química del suelo, reduciendo aún más el área disponible para la producción de cultivos (Jaime et al. 2020).

En Ecuador, la dependencia de agroquímicos junto con la gestión inadecuada de los mismos, sumado a esta era de cambio climático, ha provocado que el sistema agrícola se enfrente a varios desafíos impredecibles en el país y, por otro lado, que la población continua en aumento constante, siendo un problema serio con la seguridad alimentaria en todo el mundo (FAO 2016).

Con base a lo presentado anteriormente, se propuso la siguiente pregunta de investigación ¿De qué manera la aplicación de nanofertilizantes mejora la eficiencia de suelo y cultivos?

III. JUSTIFICACIÓN

Entonces, la situación actual es que la agricultura moderna enfrenta varios desafíos para satisfacer la creciente demanda de producción de alimentos que sea eficiente, eficaz, sostenible y suficiente, pues dichos desafíos incluyen el bajo rendimiento del suelo, la disminución de la materia orgánica y la salud general del suelo (Rodríguez et al. 2019).

La nanotecnología puede ser una herramienta prometedora para impulsar la producción de cultivos y revolucionar el sistema agrícola, debido que ayuda a mejorar la calidad y la seguridad de los alimentos, facilita la absorción de nutrientes a nano escala del suelo y provoca la reducción de los insumos agrícolas, pues tiene el potencial de aumentar la productividad de los cultivos y mejorar la calidad del suelo (Nazari et al. 2023).

Desde el punto de vista teórico, este estudio aporta al campo de la agronomía y la nanotecnología, proporcionando una base conceptual para comprender cómo los nanofertilizantes interactúan con el suelo y los cultivos. Al analizar los mecanismos de acción y los beneficios específicos que ofrecen estos fertilizantes a nivel molecular, se enriquece el conocimiento sobre su potencial y sus limitaciones, lo que puede abrir la puerta a futuras investigaciones que exploren nuevos tipos de nanomateriales adaptados a las necesidades del suelo ecuatoriano y sus características específicas.

A nivel metodológico, esta investigación presenta un enfoque analítico-comparativo que permite evaluar el uso de nanofertilizantes frente a los fertilizantes convencionales, destacando sus ventajas, desventajas y costos. Esta metodología no solo facilita una evaluación exhaustiva de las alternativas disponibles, sino que también ofrece un marco replicable para futuros estudios en otros contextos agrícolas. Además, puede servir como referencia para evaluar el impacto de tecnologías similares en diferentes regiones y tipos de cultivo, promoviendo una aplicación más amplia y contextualizada de la nanotecnología en la agricultura.

Cabe mencionar que los beneficios de la realización de esta investigación a nivel académico, es que los resultados pueden guiar a los expertos en la toma de decisiones sobre el uso de nanofertilizantes y fomentar nuevas investigaciones en el ámbito agrícola, contribuyendo al desarrollo de tecnologías innovadoras para el sector agroalimentario en diferentes localidades del Ecuador y América Latina.

V. METODOLOGÍA

La presente revisión comprendió una búsqueda exhaustiva de publicaciones técnicas y científicas utilizando herramientas de búsqueda y bases de datos, como PubMed, Scielo, Elsevier, MDPI y Google Scholar, disponibles en Internet. La búsqueda se realizó hasta diciembre de 2023 utilizando varias combinaciones de términos relacionados con el uso de nanotecnología (nanofertilizantes), el uso en cultivos agrícolas y suelo. Esta revisión incluyó toda la información de los últimos 5 años (2019-2023), reforzando la presente búsqueda con algunos estudios internacionales.

Se realizó la búsqueda y selección de información bibliográfica exhaustiva en base a su análisis aplicando la técnica de investigación determinada, para dar a conocer el proceso de la investigación y estudios utilizados, tal como indica Codina (2020), empleando un estudio descriptivo y cualitativo donde se recopiló, procesó y analizará la información resultante del estudio, con la finalidad de que se resalten las características más importantes y significativas para la investigación. En la figura 1 se presenta en 3 fases (identificación, evaluación e inclusión), mediante un flujograma de la selección de información.

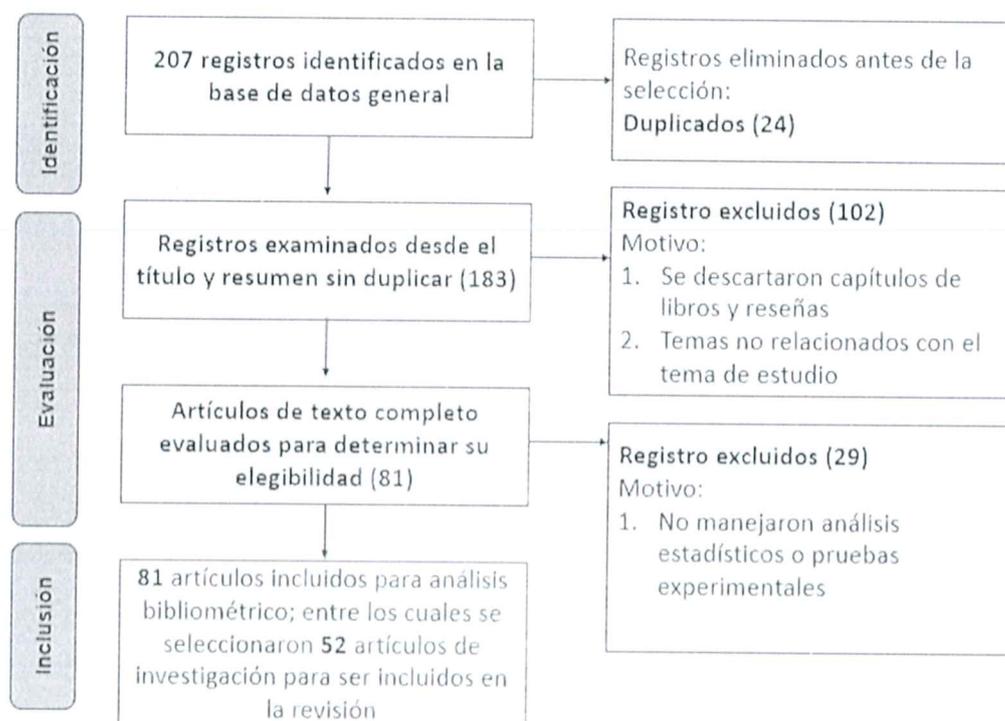


Figura 1. Flujograma o PRISMA de selección de literatura.

VI. MARCO TEÓRICO

6.1. Nanofertilizantes

Los nanofertilizantes contienen partículas nanométricas que las plantas pueden absorber y mejorar el rendimiento de los cultivos, siendo un producto de una nueva tecnología con potenciales aplicaciones en agricultura (Shang et al. 2019). Garg et al. (2023) clasifica a los nanofertilizantes como un subconjunto de la nanotecnología y también como un tipo de fertilizante.

Los nanofertilizantes también se pueden clasificar según el material utilizado, pues cada tipo de nanofertilizante tiene propiedades diferentes y puede tener diferentes efectos en las plantas, y comprender la naturaleza de los nanofertilizantes es esencial para encontrar el mejor método de aplicación (Verma et al. 2022).

6.1.1 Tipos de nanofertilizante

Los nanofertilizantes se pueden aplicar a las plantas mediante aplicación foliar, agua y suelo, a continuación, en la tabla 1 se muestran algunos tipos de nanofertilizantes:

Tabla 1. Tipos de nanofertilizantes con su respectiva descripción, datos relevantes y uso en algunos cultivos agrícolas.

Tipo	Descripción	Datos Relevantes	Uso en Cultivos Agrícolas	Ref.
Nanofertilizantes de Liberación Controlada (CRNF)	Estos nanofertilizantes están diseñados para liberar gradualmente los nutrientes en el suelo, proporcionando un suministro continuo a las	-Utilizan matrices nanoestructuradas que controlan la liberación de nutrientes. -Pueden mejorar la	Nanopartículas de óxido de zinc encapsuladas con fertilizantes convencionales en cultivos de maíz, que liberan nutrientes gradualmente durante todo el	(Bratovcic et al. 2021)

IV. OBJETIVOS

4.1. Objetivo general

- Describir el uso de nanofertilizantes, sus efectos en suelo y cultivos hortícolas mediante una revisión de literatura.

4.2. Objetivos específicos

1. Analizar las base teóricas de la aplicación de nanofertilizantes en la agricultura, enfocándose en la descripción de los tipos de nanofertilizantes y sus mecanismos de acción en el suelo y en los cultivos hortícolas.
2. Describir las ventajas y desventajas de los diferentes tipos de nanofertilizantes en comparación con los fertilizantes convencionales, resaltando sus modos de aplicación y la eficiencia en la absorción de nutrientes en cultivos hortícolas.
3. Comparar los materiales y costos asociados a las tecnologías de fertilización, incluyendo los nanofertilizantes y fertilizantes convencionales, clasificándolos en categorías para identificar las alternativas más sostenibles y accesibles para la agricultura en Ecuador.
4. Describir el uso y el potencial de los nanofertilizantes en la agricultura ecuatoriana, considerando sus beneficios, riesgos y desafíos, así como su impacto en la productividad agrícola y el medio ambiente.

	plantas durante un período prolongado.	eficiencia de uso de nutrientes y reducir la lixiviación.	ciclo de crecimiento.	
Nanofertilizantes para Entrega Selectiva	Son nanofertilizantes diseñados para entregar nutrientes específicos a ciertos órganos o tejidos de las plantas, como las raíces o las hojas, en respuesta a las necesidades de la planta.	-Pueden aumentar la eficiencia en la absorción de nutrientes al dirigirlos a los sitios de mayor demanda. -Reducen la pérdida de nutrientes al evitar su dispersión en el suelo.	Nanopartículas de hierro que entregan hierro directamente a las hojas de las plantas para corregir la clorosis férrica en cultivos de vid, aumentando la producción de uvas y mejorando la calidad del vino.	(Gangu et al. 2022)
Nanofertilizantes Estimulantes del Crecimiento Vegetal (PGSNF)	Estos nanofertilizantes están formulados para promover el crecimiento y desarrollo saludable de las plantas, además de proporcionar nutrientes esenciales.	-Contienen compuestos bioactivos que estimulan procesos fisiológicos como la división celular y la elongación de las raíces. -Pueden mejorar la resistencia a	Nanopartículas de sílice funcionalizadas con ácido salicílico que mejoran el crecimiento de las plantas de tomate al aumentar la actividad enzimática y la resistencia a patógenos.	(Sachan et al. 2021)

		condiciones de estrés.		
Fertilizantes que Controlan la Pérdida de Agua y Nutrientes	Son fertilizantes que incorporan nanomateriales para reducir la evaporación del agua y la lixiviación de nutrientes en el suelo, manteniendo una mayor disponibilidad de agua y nutrientes para las plantas.	-Utilizan nanopartículas para formar películas protectoras en la superficie del suelo, reduciendo la evaporación. -Ayudan a retener los nutrientes en la zona radicular de las plantas.	Nanopartículas de arcilla modificadas que se mezclan con fertilizantes convencionales para formar hidrogeles en el suelo, reduciendo la pérdida de agua por evaporación y aumentando la eficiencia del uso del agua en cultivos de arroz.	(Mandal 2021)

Estos ejemplos ilustran cómo los nanofertilizantes pueden ser aplicados en diversos cultivos agrícolas para mejorar la eficiencia en la entrega de nutrientes, estimular el crecimiento vegetal y conservar agua y nutrientes en el suelo.

6.1.2. Ventajas y Desventajas de cada tipo de nanofertilizante

Los nanofertilizantes ofrecen una serie de ventajas potenciales en la agricultura, incluida una mayor eficiencia en la entrega de nutrientes a las plantas, lo que puede resultar en un mejor rendimiento de los cultivos y una reducción en la cantidad de fertilizante necesario. Sin embargo, estas tecnologías también presentan desafíos.

Por tal motivo en la tabla 2 se señalan algunas ventajas y desventajas de cada tipo de nanofertilizante.

Tabla 2. Ventajas y desventajas de cada tipo de nanofertilizante.

Tipo	Ventaja	Ref.	Desventajas	Ref.
Nanofertilizantes de liberación controlada (CRNF)	Liberación gradual de nutrientes, reduciendo la lixiviación de nutrientes y las pérdidas al medio ambiente.	(Gade et al. 2023)	Los procesos de fabricación más complejos aumentan potencialmente los costes de producción.	(Vázquez 2023)
	Mejora de la eficiencia en el uso de nutrientes, lo que resulta en mayores rendimientos de los cultivos.	(Olarte et al. 2022)	La disponibilidad limitada y el alto costo pueden obstaculizar la adopción generalizada	(Zahra et al. 2022)
Nanofertilizantes para una entrega selectiva	Entrega precisa de nutrientes a tejidos vegetales específicos, mejorando la absorción de nutrientes.	(Kumar et al. 2023)	Riesgos potenciales para organismos no objetivo debido a la alta especificidad	(Bhaskar et al. 2023)
	Tasas de aplicación reducidas, impacto medioambiental minimizado y conservación de recursos	(Bairwa et al. 2023)	Se necesita más investigación para comprender completamente los efectos a largo plazo sobre la salud del suelo y los ecosistemas.	(Ramos et al. 2021)

Nanofertilizantes estimulantes del	Crecimiento mejorado de las plantas, lo que conduce a mayores rendimientos de los cultivos.	(Shesh et al. 2022)	Posibles efectos no deseados sobre la fisiología de las plantas y la expresión genética.	(Omara et al. 2023)
crecimiento vegetal (PGSNF)	Reducción de la dependencia de fertilizantes químicos, menor contaminación ambiental	(Heinisch et al. 2019)	Los impactos a largo plazo sobre la salud de las plantas y los ecosistemas del suelo no se comprenden completamente	(Ojeda et al. 2020)
Fertilizantes que controlan la pérdida de agua y nutrientes	Mejora de la eficiencia en el uso del agua, reduciendo los requisitos de riego.	(Shang et al. 2019)	Investigación limitada sobre los impactos a largo plazo de los WNLCF en la salud del suelo	(Verma et al. 2022)
	Prevención de la lixiviación de nutrientes, minimización de la contaminación ambiental.	(Mejías et al. 2021)	Potencial de aumento de los costos de producción debido a formulaciones más complejas	(Bratovcic et al. 2021)

A continuación, se detalla en la tabla 3 los materiales utilizados en cada tipo de nanofertilizante y costos utilizados en diferentes tecnologías de fertilizantes, clasificados en categorías de bajo (-), moderado (±) y alto (+):

Tabla 3. Comparación de los materiales y costos utilizados en diferentes tecnologías de fertilizantes, clasificados en categorías.

Tipo	Materiales Utilizados	Costo por Ha	Duración desde Aplicación en Cultivo	Ref.
Nanofertilizantes de Liberación Controlada (CRNF)	Nanoarcillas, nanopartículas de óxido de hierro, polímeros nanoporosos	Alto (+), \$500 - \$1000	Larga duración, 3-6 meses	(Lira et al. 2018)
Nanofertilizantes para Entrega Selectiva	Nanopartículas de sílice funcionalizadas, nanotubos de carbono, polímeros nanoporosos	Moderado (\pm), \$200 - \$500	Duración media, 2-4 meses	(Mandal 2021)
Nanofertilizantes Estimulantes del Crecimiento Vegetal (PGSNF)	Nanopartículas de sílice, extractos vegetales, polímeros nanoporosos	Moderado (\pm), \$200 - \$500	Duración media, 2-4 meses	(Salama et al. 2021)
Fertilizantes que Controlan la Pérdida de Agua y Nutrientes	Hidrogeles de nanopartículas de arcilla, polímeros hidrofílicos	Moderado (\pm), \$200 - \$500	Duración media, 2-4 meses	(Nazari et al. 2023)
Fertilizantes Convencionales	Nitrógeno, Fósforo, Potasio, Micronutrientes, Urea, Sulfato de Amonio	Bajo (-), \$100 - \$200	Duración corta, 1-2 meses	(Pandey et al. 2023)

Nota. Costos y duración pueden variar según la región, el proveedor, la cantidad de producto utilizado y otros factores específicos

Esta tabla proporciona una visión general de los materiales utilizados y los costos asociados con diferentes tecnologías de fertilizantes, desde los convencionales hasta los nanofertilizantes. Estas cifras proporcionan un estimado de los costos

por hectárea de aplicación, donde CRNF presenta más alta duración, pero mayores costos de inversión.

6.2. Mecanismo de acción de los nanofertilizantes

Los nanomateriales tienen propiedades únicas que los hacen ideales para aplicaciones (Humbal y Pathak 2023). Su pequeño tamaño, su gran relación superficie-volumen y su capacidad de recubrirse con diversos materiales para controlar la tasa de liberación mejoran la eficiencia de la entrega de nutrientes (Salama et al. 2021), tal como se observa en la figura 2.

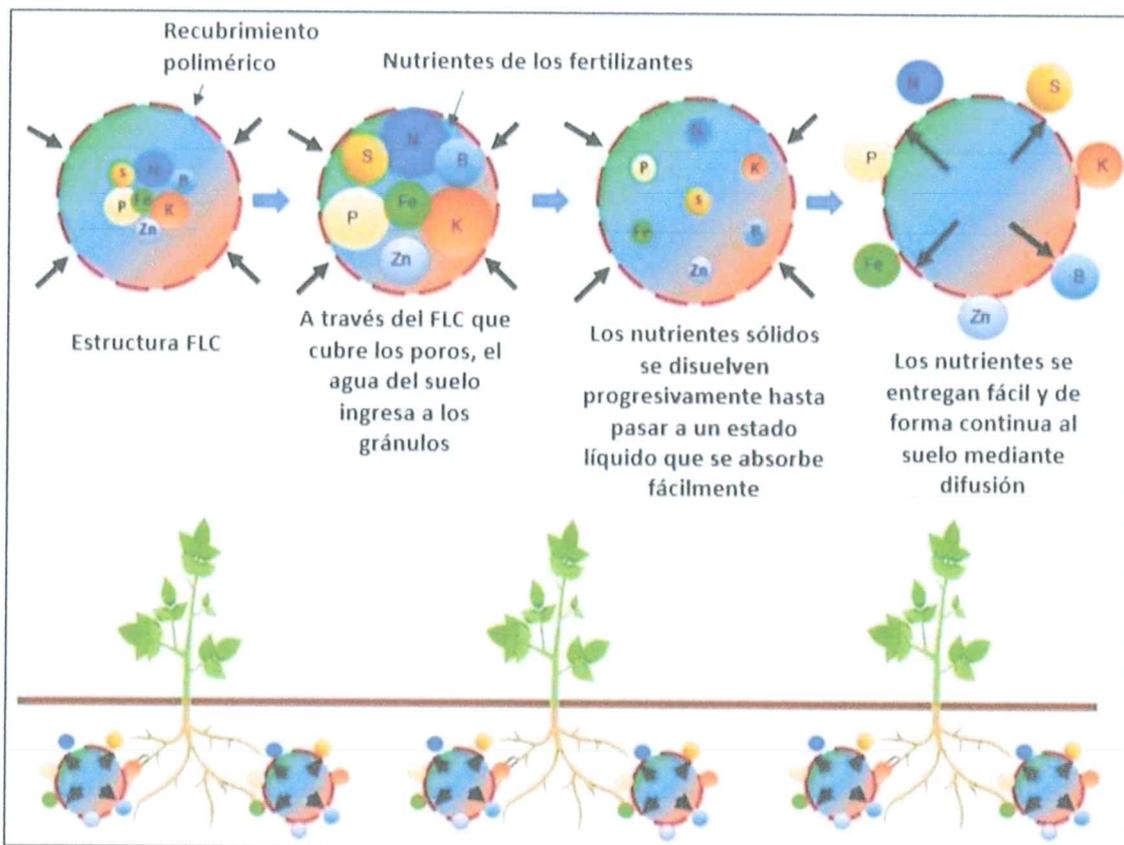


Figura 2. Mecanismo de acción de nanofertilizantes de liberación controlada (FLC) de nutrientes en campo.

6.3. Modos de aplicación de nanofertilizantes

El método apropiado de aplicación de nanofertilizantes es crucial para el crecimiento óptimo de las plantas, ya que varía según el suelo y el tipo de clima (Martez 2022). La elección depende de la calidad del suelo, la disponibilidad de nutrientes y el clima, que afectan la absorción y utilización de nutrientes (Gade et al. 2023). Comprender estos factores y seleccionar el método apropiado

puede mejorar el rendimiento de los cultivos, reducir el impacto ambiental y crear prácticas agrícolas más sostenibles.

Existen tres métodos principales de aplicación de nanofertilizantes: foliar, nanocebado de semillas y tratamiento del suelo, que se mencionan en la tabla 4. Las investigaciones de los autores Ramos et al. (2021), Shesh et al. (2022), Zulfiqara et al. (2019), Rehman et al. (2023), Vázquez (2023) y Mejías et al. (2021) permitieron organizar la siguiente tabla comparativa:

Tabla 4. Tabla comparativa de los tres métodos principales de aplicación de nanofertilizantes:

Método	Descripción	Ventajas	Desventajas
Aplicación Foliar	Rociar nanofertilizantes directamente sobre las hojas de las plantas para una rápida absorción de nutrientes.	<ul style="list-style-type: none"> - Rápida absorción de nutrientes. - Eficaz en regiones con baja fertilidad del suelo. 	<ul style="list-style-type: none"> - Sensible a factores ambientales como temperatura, humedad y viento. - Eficiencia de absorción afectada por dichos factores.
Nanocebado de Semillas	Recubrir o remojar las semillas en una solución que contiene nanofertilizantes antes de plantarlas para promover una germinación rápida y una mejor absorción de nutrientes.	<ul style="list-style-type: none"> - Promueve una germinación rápida. - Mejora la absorción de nutrientes a lo largo de la vida de la planta. 	<ul style="list-style-type: none"> - Necesidad de determinar la concentración óptima para evitar fitotoxicidad. - Requiere cuidado en la manipulación de semillas.
Tratamiento del Suelo	Incorporación directa de nanofertilizantes en el suelo mediante difusión, bandas o colocación localizada para una liberación lenta y controlada de nutrientes.	<ul style="list-style-type: none"> - Liberación lenta y controlada de nutrientes. - Reduce la pérdida de nutrientes por lixiviación o volatilización. 	<ul style="list-style-type: none"> - Más adecuado para regiones con alta capacidad de retención de nutrientes. - Menos eficiente en climas con patrones

de precipitación
inconsistentes.

En base a los resultados previos, se puede señalar en la tabla 5 el método que puede considerarse más eficaz en función de ciertos criterios de eficiencia. Los cuales se muestran a continuación:

Tabla 5. Tabla comparativa de los tres métodos principales de aplicación de nanofertilizantes en relación a su eficacia.

Criterios de Eficiencia	Aplicación Foliar	Nanocebado de Semillas	Tratamiento del Suelo
Rapidez de Absorción	Alta	Alta	Moderada
Eficacia en Suelos Pobres	Alta	Alta	Moderada
Sensibilidad Ambiental	Alta	Moderada	Baja
Necesidad de Concentración Óptima	Baja	Alta	Baja
Eficiencia en la Retención de Nutrientes	Baja	Moderada	Alta

En base a estos criterios, se observa que no hay un método único que sea el más eficaz en todos los aspectos. Sin embargo, en general, el método de Nanocebado de Semillas parece ofrecer una combinación favorable de rapidez de absorción, eficacia en suelos pobres y sensibilidad ambiental moderada. Sin embargo, la elección del método más adecuado dependerá de las condiciones específicas de cada cultivo y los objetivos de fertilización.

6.4. Ventajas de los nanofertilizantes frente a los fertilizantes químicos convencionales

Los nanofertilizantes demuestran varias ventajas en comparación con los fertilizantes tradicionales, incluida una mayor eficiencia debido al suministro directo de nutrientes esenciales a las plantas y menores impactos ambientales a

través de menores cantidades de fertilizante requeridas. Esta tecnología tiene el potencial no sólo de maximizar el rendimiento de los cultivos sino también de disminuir los efectos ambientales de los fertilizantes.

Las ventajas de los nanofertilizantes incluyen su alta concentración de nutrientes, su lenta liberación y una mejor absorción por las plantas. Los nanofertilizantes también pueden mejorar las propiedades físicas y químicas de los suelos, y su uso puede ayudar a reducir el uso de fertilizantes y los impactos ambientales de la agricultura. Los nanofertilizantes cuentan con altas concentraciones de nutrientes, lo que permite tasas de aplicación más bajas que sus homólogos tradicionales. Como resultado, se pueden reducir los costos de los fertilizantes y se mitigan los impactos ambientales asociados a la producción y el transporte. Los nanofertilizantes de liberación lenta pueden proporcionar un suministro constante de nutrientes a las plantas durante un período prolongado, mejorando el crecimiento y el rendimiento de las plantas. Estos nanofertilizantes también pueden ayudar a reducir la lixiviación de nutrientes al medio ambiente y la necesidad de una reaplicación frecuente de fertilizantes. Una mejor absorción de nutrientes por parte de las plantas puede conducir a un mayor crecimiento y rendimiento y a una reducción de las pérdidas de nutrientes al medio ambiente. Los nanofertilizantes pueden ayudar a mejorar la eficiencia de los fertilizantes y su uso puede reducir el impacto ambiental general.

Tabla 6. Comparación del uso de nanofertilizantes frente a los fertilizantes convencionales.

Propiedades	Nanofertilizantes	Fertilizantes convencionales
Eficiencia de absorción de nutrientes	Aumenta la eficiencia de utilización de fertilizantes y la proporción de absorción de nutrientes de las plantas mientras ahorra fertilizantes.	Menos eficaz ya que las plantas absorben mal sus compuestos a granel.

Modos de liberación de control	La encapsulación, junto con una cubierta de resina polimérica, ceras y azufre, permite un control preciso sobre la liberación de nutrientes.	La liberación excesiva produce toxicidad y socava el equilibrio ecológico.
Solubilidad y dispersión de nutrientes.	Aumenta la solubilidad y dispersión de los componentes minerales insolubles en el suelo, haciéndolos más biodisponibles para las plantas.	Menos disponible para las plantas debido a una menor solubilidad y un mayor tamaño de partícula.
Duración efectiva de la liberación	Mejora y prolonga la tasa de adquisición de nutrientes de la planta.	Los nutrientes que necesitan las plantas se pierden en forma de sales insolubles.
Baja tasa de fertilizante necesaria	Reduce las pérdidas de nutrientes resultantes de la lixiviación, la escorrentía y la deriva.	Se pierden altos niveles de fertilizante debido a la lixiviación, la escorrentía y la deriva.

VII. RESULTADOS

7.1. Resultados generales

La presente revisión cubrió 81 artículos publicados en los últimos 5 años (2019-2023) que informaban sobre uso de nanofertilizantes en la agricultura, no obstante, se descartaron 29 por probabilidad de sesgo alto, leyendo minuciosamente 52 artículos para resultados. De estos, 22 artículos registraron su uso en suelo (42,31%), 18 en cultivos (34,62%), mientras los artículos que presentaron reportes de uso de nanofertilizantes en Ecuador fueron 4 (7,69%), por último, se utilizaron 9 (17,31%) artículos se utilizaron para reforzar las discusiones de la información existente.

El número de artículos alcanzó su punto máximo en 2022 con 28 estudios (53,85%), mientras 2021 y 2023 manifiesta un aproximado de 13 estudios publicados. Cabe mencionar que entre 2019 a 2020 se publicaron 11 artículos referente al tema.

Los países que destacan la publicación de estudios relacionados con el uso de nanofertilizantes en agricultura incluyen Estados Unidos, China, varios países europeos, como Alemania, Francia y el Reino Unido, India y Brasil, siendo estudios publicados en revistas científicas de renombre internacional, reflejando su liderazgo en la búsqueda de soluciones innovadoras para mejorar la productividad y la sostenibilidad en el sector agrícola a nivel mundial.

7.2. Uso de nanofertilizantes y su efecto sobre cultivos agrícolas

La aplicación foliar de nanofertilizantes en diversos cultivos agrícolas ofrece una solución eficiente para la entrega rápida de nutrientes, mejorando así el crecimiento, rendimiento y calidad de los cultivos (Estrada et al. 2023). Este enfoque permite una absorción directa de nutrientes a través de las hojas, optimizando su eficacia en condiciones de suelo desfavorables o cuando se requiere una respuesta rápida (Saraiva et al. 2023).

A continuación, se presenta una tabla que resume los efectos de la aplicación foliar de nanofertilizantes en una variedad de cultivos agrícolas.

Tabla 7. Efectos de la aplicación foliar de nanofertilizantes en diferentes cultivos

Nanomaterial	Especie	Concentración	Aplicación	Respuesta agronómica	Ref.
CuO	Tomate	150-340 µg/ml	Foliar por 11 días	Eliminó la propagación de enfermedades	(Ding et al. 2023)
	<i>Solanum lycopersicum</i>				
Zn, Fe y NPK	Garbanzo	20 L/parcela en cada etapa	Primera pulverización en la etapa de 4 a 6 hojas, segunda pulverización a los 30 días y tercera pulverización durante el llenado de vainas.	Hubo un aumento significativo tanto en la producción biológica como en la de semillas	(Yadav et al. 2023)
	<i>Cicer arietinum</i>				
NP de Zn y B	Granada	0, 60 y 120 mg de ZnL ⁻¹	Foliar, Una vez por temporada y una semana antes de la primera floración	Aumento del rendimiento del fruto de la granada	(Nongbet et al. 2022)
	<i>Púnica granatum</i>				
Al ₂ O ₃ NP	Tomate	400 mg/L	foliar cada 20 días	Contrarresta eficazmente el Fusarium como agente de biocontrol	(Omara et al. 2023)
	<i>Solanum lycopersicum</i>				
NPK NP	Trigo	500, 60 y 400 ppm	Foliar, después de los 21 días de la fecha de siembra	Aumento significativo del contenido total de sacáridos en los granos de trigo	(Lira et al. 2019)
	<i>Triticum spp.</i>				

ZnO	Café Café arábica	15mg/L	Foliar cada 40 días	Aceleración de la fotosíntesis neta y aumento de la producción de biomasa. Inhibición del crecimiento de X. axonopodis pv. malvacearum y otras bacterias dañinas	(Franco et al. 2023) (Olarte et al. 2022)
Ag NP	Frejol caupí Vigna unguiculata	30–90 µg/ml	Foliar cada 7 días		
TiO ₂ y SiO ₂	Arroz Oryza sativa	20 y 30 mg/L	Foliar cada 55 días	Mejor desarrollo e inhibición de la translocación de Cd.	(Salamá et al. 2022)
Nanopartículas de óxido de hierro	Maíz Zea mays	0.1 g/L	al suelo cada 3 meses	Mejora en la disponibilidad de hierro y aumento en la producción	(Glotra y Singh 2023)
Nanoarcillas	Trigo Triticum spp.	0.2 g/kg de suelo	Al suelo cada 4 meses	Aumento en la retención de agua y mejora en la absorción de nutrientes	(Ojeda et al. 2020)
Nanopartículas de zinc	Soja Glycine max	0.05 g/L	Al suelo cada 2 meses	Incremento en la concentración de zinc en el suelo y mejora en el crecimiento de las plantas	(Bala et al. 2023)
Nanopartículas de óxido de hierro	Maíz Zea mays	0.1 g/kg de suelo	Al suelo cada 3 meses	Aumento en la disponibilidad de hierro, mejora en el crecimiento	(Husted et al. 2023)

Nanotubos de carbono	Soja <i>Glycine max</i>	0.05 g/kg de suelo	Difusión en el suelo cada 2 meses	Incremento en la resistencia al estrés, mejora en la producción	(Bratovic et al. 2021)
Nanoarcillas	Trigo <i>Triticum spp.</i>	0.2 g/kg de suelo	Colocación localizada cada 4 meses	Mejora en la retención de agua, aumento en la biomasa	(Mandal 2021)
Nanopartículas de sílice	Maíz <i>Zea mays</i>	0.1 g/kg de semillas	Recubrimiento de semillas, 1 día antes de la siembra	Mejora en la germinación, desarrollo de raíces más fuertes	(Ramos et al. 2021)
Nanotubos de carbono	Soja <i>Glycine max</i>	0.05 g/kg de semillas	Remojo de semillas 12 horas antes de la siembra	Aumento en la velocidad de germinación, plantas más vigorosas	(Basavegowda y Baek 2021)
Nanoarcillas	Trigo <i>Triticum spp.</i>	0.2 g/kg de semillas	Tratamiento de semillas 24 h antes de siembra	Mejora en la tolerancia al estrés hídrico, aumento en la biomasa	(Shang et al. 2019)
Nanopartículas de zinc	Arroz <i>Oryza sativa</i>	0.15 g/kg de semillas	Inmersión de semillas 48 horas antes de la siembra	Incremento en el rendimiento, aumento en la concentración de zinc en los granos	(Glotra y Singh 2023)

Basado en la respuesta en el cultivo, se puede observar que los nanomateriales CuO, Zn, Fe y NPK, NP de Zn y B, Al₂O₃ NP, ZnO, AgNP, y Nanopartículas de óxido de hierro han mostrado resultados prometedores en la mejora del crecimiento, rendimiento o calidad de los cultivos en las condiciones específicas descritas en las referencias. Sin embargo, es importante considerar que la eficiencia de los nanomateriales puede variar dependiendo de factores como el tipo de cultivo, las condiciones del suelo y el método de aplicación.

7.3. Alcance del uso de nanofertilizantes en Ecuador, riesgos y desafíos

El potencial de los nanofertilizantes en Ecuador radica en su capacidad para mejorar la eficiencia de los recursos agrícolas al ofrecer una liberación controlada de nutrientes, reducir la contaminación del suelo y del agua, mejorar la calidad del suelo y promover prácticas agrícolas sostenibles (Martez 2022). Su adaptabilidad a diferentes cultivos y condiciones ambientales, junto con su capacidad para aumentar la productividad agrícola mientras se reduce la dependencia de fertilizantes químicos convencionales, los convierte en una herramienta prometedora para impulsar la seguridad alimentaria y la sostenibilidad ambiental en el país (Lira et al. 2018). Su uso se promueve en la Sierra Ecuatoriana, en provincias como Tungurahua, Chimborazo y Bolívar, de acuerdo a la investigación de Franco et al. (2023) y Olarte et al. (2022).

Si bien los nanofertilizantes ofrecen un gran potencial para mejorar la productividad agrícola y la sostenibilidad en Ecuador, también enfrentan algunas limitaciones que deben ser consideradas, las cuales se observan en la tabla 8.

Tabla 8. Información de los nanofertilizantes y algunas de sus limitaciones en Ecuador.

Limitación	Descripción
Costo	Los nanofertilizantes son más costosos que los fertilizantes convencionales debido a los procesos de producción y los materiales avanzados utilizados en su fabricación. Esto puede representar una barrera económica para muchos agricultores.
Investigación y desarrollo	El desarrollo de nanofertilizantes específicamente adaptados a las condiciones agrícolas y los cultivos de Ecuador puede ser limitado. Se necesita más investigación y desarrollo local para adaptar y optimizar estas tecnologías a las necesidades agrícolas específicas del país.
Regulación y seguridad	Se requieren regulaciones claras y rigurosas para garantizar la seguridad tanto para los agricultores como para el medio ambiente. Ecuador puede enfrentar desafíos en la implementación y aplicación efectiva de regulaciones para el uso responsable de nanomateriales en la agricultura.
Riesgos para la salud humana	Los nanofertilizantes pueden tener impactos adversos en la salud humana, como daños al tracto gastrointestinal, hígado y riñones, así como posibles efectos neurológicos a largo plazo. Se necesitan más investigaciones para comprender completamente estos efectos.
Riesgos ambientales	La liberación de nanopartículas al medio ambiente puede provocar contaminación del suelo, agua y aire, afectando negativamente a los ecosistemas y la biodiversidad. Se requieren más investigaciones para minimizar estos riesgos.
Riesgos ecológicos	Los nanofertilizantes pueden tener efectos adversos en organismos no objetivo, como insectos, peces y aves, y también pueden afectar a microorganismos beneficiosos. Se necesita más investigación para evaluar completamente estos riesgos.

Conocimiento y capacitación	La adopción exitosa de nanofertilizantes requiere un entendimiento profundo y capacitación adecuada por parte de los agricultores para maximizar sus beneficios.
Percepción pública	La aceptación pública de los nanofertilizantes puede ser un desafío debido a preocupaciones sobre seguridad y impacto ambiental. Es importante educar a la población y abordar sus inquietudes.

Fuente: Martez (2022), Universidad Industrial de Santander (2023), Lira et al. (2018).

Superar estas limitaciones requerirá una colaboración activa entre el gobierno, la industria, la academia y los agricultores para impulsar la investigación, garantizar la seguridad y promover la adopción responsable de los nanofertilizantes en la agricultura ecuatoriana.

VIII. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

8.1. Conclusiones

Los nanofertilizantes se clasifican en tipos como de liberación controlada, de entrega selectiva, estimulantes del crecimiento vegetal y controladores de pérdida de agua y nutrientes. Estos fertilizantes actúan optimizando la liberación y absorción de nutrientes, lo que resulta en una mayor eficiencia en los cultivos hortícolas y en una mejora en la salud del suelo. Sus mecanismos de acción se basan en su capacidad para liberar nutrientes de forma gradual y específica, maximizando su disponibilidad para las plantas.

Los nanofertilizantes ofrecen ventajas significativas sobre los fertilizantes convencionales, como una mayor eficiencia en la absorción de nutrientes, una liberación más controlada y una reducción en el impacto ambiental. Sin embargo, presentan desventajas como costos elevados de producción, disponibilidad limitada y la necesidad de más investigación sobre sus efectos a largo plazo en los ecosistemas.

En términos de costos, los nanofertilizantes presentan una inversión inicial más alta que los fertilizantes convencionales, pero ofrecen beneficios a largo plazo debido a su mayor duración y eficacia. Materiales como nanopartículas de óxido de zinc, sílice y nanotubos de carbono son comunes en su formulación, destacándose por su capacidad para optimizar los recursos en la agricultura. Estos aspectos los posicionan como una opción más sostenible en contextos donde la eficiencia es prioritaria.

En Ecuador, los nanofertilizantes se encuentran en una etapa experimental, pero muestran un gran potencial para incrementar la productividad agrícola y mejorar la sostenibilidad. Los principales desafíos incluyen la falta de regulación, los altos costos y la necesidad de investigación adaptada a las condiciones locales. A pesar de esto, su aplicación puede contribuir significativamente a prácticas

agrícolas más responsables y sostenibles, promoviendo un equilibrio entre productividad y cuidado ambiental.

8.2. Recomendaciones

Es necesario que se realicen investigaciones en Ecuador, donde se monitoree y evalúe continuamente los impactos de los nanofertilizantes en el rendimiento de los cultivos, la salud del suelo y el medio ambiente para tomar decisiones basadas en datos y realizar ajustes a medida que avanza la tecnología, lo que garantizará que los beneficios de los nanofertilizantes se maximicen y al mismo tiempo se minimicen las consecuencias negativas.

Las investigaciones futuras deberían centrarse en perfeccionar los mecanismos de administración, explorar nuevos materiales y estrategias para la liberación controlada y evaluar los efectos a largo plazo sobre la salud humana y el medio ambiente. En última instancia, la integración exitosa de nanofertilizantes en las prácticas agrícolas modernas puede revolucionar la forma en que abordamos la agricultura sostenible, garantizando la seguridad alimentaria global.

Cabe añadir que la investigación sobre este tema en Ecuador es limitada e incompleta, con brechas significativas en la comprensión de sus beneficios, así como riesgos potenciales para los humanos y el medio ambiente, pues la producción y aplicación de estas tecnologías carecen de una regulación adecuada.

REFERENCIAS

- Abdel, H; Hasaneen, M; Omer, A. 2018. El fertilizante nanoquitosano-NPK mejora el crecimiento y la productividad de las plantas de trigo cultivadas en suelos arenosos (en línea). *Revista Española de Investigaciones Agrarias* 14(1):9. Disponible en <https://sjar.revistas.csic.es/index.php/sjar/article/view/8205/2726>.
- Bairwa, P; Kumar, N; Devra, V; Abd-Elsalam, K. 2023. Síntesis y aplicaciones de nanobiofertilizantes en agroecosistemas (en línea). *Agroquímicos* 2(1):118-134. DOI: <https://doi.org/10.3390/agrochemicals2010009>.
- Bala, M; Kumar Bansal, S; Fatima, F. 2023. Nanotechnology: A boon for agriculture (en línea) (En *vasudhev kutumbkam-3: third international conference on entrepreneurship, research, and innovations for environmental sustainability and planetary health (vk3 2022)*). *Materials Today: Proceedings* 73:267-270. DOI: <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.09.498>.
- Basavegowda, N; Baek, K. 2021. Perspectivas actuales y futuras sobre el uso de nanofertilizantes para la agricultura sustentable: el caso del nanofertilizante de fósforo (en línea). *3 Biotecnología* 11(7):357. DOI: <https://doi.org/10.1007/s13205-021-02907-4>.
- Bhaskar, M; Kumar, A; Rani, R. 2023. Aplicación de nanoformulaciones en agricultura (en línea). *Biocatálisis y Biotecnología Agrícola* 54:10. DOI: <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.bcab.2023.102934>.
- Brar, PS; Bhardwaj, G; Chauhan, A. 2023. A review on understanding the efficient source of balanced crop nutrition through nanotechnology in agriculture (en línea). *Journal of Plant Nutrition* 5:1-11. DOI: <https://doi.org/10.1080/01904167.2023.2179923>.
- Bratovcic, A; Hikal, W; Said, H; Tkachenko, K; Baeshen, R; Sabra, A; Sany, H. 2021. Nanopesticidas y Nanofertilizantes y Desarrollo Agrícola: Alcances, Avances y Aplicaciones (en línea). *Revista Abierta de Ecología* 11(4):12. Disponible en <https://www.scirp.org/journal/paperinformation?paperid=107906>.

- Codina, L. 2020. Cómo hacer revisiones bibliográficas tradicionales o sistemáticas utilizando bases de datos académicas (en línea). *Revista ORL* 11(2):139. Disponible en <https://scielo.isciii.es/pdf/orl/v11n2/2444-7986-orl-11-02-139.pdf>.
- Ding, Y; Zhao, W; Zhu, G; Wang, Q; Zhang, P; Rui, Y. 2023. Tendencias recientes en nanofertilizantes foliares: una revisión (en línea). *Nanomateriales* 13(21):17. DOI: <https://doi.org/10.3390/nano13212906>.
- Estrada, K; Vázquez, C; Betancourt, R; Muy, M; Valenzuela, L; García, J; Gallegos, M. 2023. Fertilización foliar con nanopartículas de ZnO y su efecto en la producción, calidad biofísica y nutraceútica en frutos de nogal pecanero (*Carya illinoensis*) (en línea). *Terra Latinoamericana* 41:15. Disponible en <https://www.redalyc.org/journal/573/57375131039/html/>.
- FAO (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura). 2016. Datos sobre alimentación y agricultura (en línea, sitio web). Consultado 10 may 2022. Disponible en <https://www.fao.org/faostat/es/#data/QI>.
- Franco, C; Sánchez, E; Palacio, A; Pérez, S; Terrazas, M; Villalobos, O; Ramírez, C. 2023. Eficacia de la aplicación de nanofertilizantes de boro sobre biomasa, rendimiento, asimilación de nitrógeno y actividad fotosintética en judía verde. (en línea). *Notulae Botanicae Horti Agrobotanici Cluj-Napoca* 5(1):12. Disponible en <https://www.notulaebotanicae.ro/index.php/nbha/article/view/12795>.
- Gade, A; Ingle, P; Nimbalkar, U; Rai, M; Raut, R; Vedpathak, M; Jagtap, P; Abd-Elsalam, K. 2023. Nanofertilizantes: la próxima generación de agroquímicos para lograr un impacto a largo plazo en la sostenibilidad de los sistemas agrícolas (en línea). *Agroquímicos* 2(2):257-278. DOI: <https://doi.org/10.3390/agrochemicals2020017>.
- Gade, A; Ingle, P; Nimbalkar, U; Rai, M; Raut, R; Vedpathak, M; Jagtap, P; Abd-Elsalam, KA. 2023. Nanoagricultura: soluciones prometedoras para el futuro de la industria agrícola mundial (en línea). *Agronomía* 2(2):257-278. DOI: <https://doi.org/10.3390/agrochemicals2020017>.

- Gangu, C; Srinivasa, Y; Vasudha, D; Prasada, K. 2022. Avances recientes en fertilizantes basados en nanotecnología hacia una agricultura y un medio ambiente sostenibles: una mini revisión (en línea). *In Pham, P V (ed.)*. Rijeka, IntechOpen. p. 232-240 DOI: <https://doi.org/10.5772/intechopen.103053>.
- Garg, D; Sridhar, K; Inbaraj, B; Chawla, P; Tripathi, M; Sharma, M. 2023. Formulaciones de nanobiofertilizantes para la agricultura: una revisión sistemática de avances recientes y aplicaciones prospectivas (en línea). *Bioingeniería* 10(9):10. Disponible en <https://www.mdpi.com/2306-5354/10/9/1010>.
- Glotra, A; Singh, M. 2023. Nanofertilizantes: una revisión de la tecnología futurista de gestión de nutrientes en la agricultura (en línea). *Reseñas Agrícolas* 44(2):238-244. Disponible en <https://arccjournals.com/journal/agricultural-reviews/R-2469>.
- Heinisch, M; Jácome, J; Miricescu, D. 2019. Experiencia actual con la aplicación de nanofertilizantes a base de metales (en línea). *Agronomía* 22:7. Disponible en https://www.matec-conferences.org/articles/matecconf/pdf/2019/39/matecconf_mse2019_03006.pdf.
- Helal, M; El-Mogy, M; Khater, H; Fathy, M; Ibrahim, F; Li, Y; Tong, Z; Abdelgawad, K. 2023. Un nanofertilizante de liberación controlada mejora el crecimiento del tomate y minimiza el consumo de nitrógeno (en línea). *Plantas* 12(10):15. DOI: <https://doi.org/10.3390/plants12101978>.
- Humbal, A; Pathak, B. 2023. Application of Nanotechnology in Plant Growth and Diseases Management: Tool for Sustainable Agriculture (en línea). *In Fernandez-Luqueno, F; Patra, JK (eds.)*. Singapore, Springer Nature Singapore. p. 145-168 DOI: https://doi.org/10.1007/978-981-19-5454-2_6.
- Husted, S; Minutello, F; Pinna, A; Tougaard, S Le; Møs, P; Kopittke, PM. 2023. What is missing to advance foliar fertilization using nanotechnology? (en línea). *Trends in Plant Science* 28(1):90-105. DOI: <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.tplants.2022.08.017>.

- Jaime, F; Castro, J; Orlando, D. 2020. Impacto ambiental provocado por el inadecuado uso de fertilizantes químicos en cultivos e maíz. UNESUM-Ciencias. Revista Científica Multidisciplinaria. ISSN 2602-8166 3(1):61-72. DOI: <https://doi.org/10.47230/unesum-ciencias.v3.n1.2019.128>.
- Kumar, P; Kumar, V; Rajanna, GA; Swaroop, B; Dey, A; Kumar, R; Singh, S; Shekhawat, K; Babu, S; Singh, T; Kumar, Y; Singh, C; Rangot, M; Kumar, A; Sarkar, S; Dash, S. 2023. Revelando el efecto combinado de los nanofertilizantes y los fertilizantes convencionales sobre la productividad, la rentabilidad y el bienestar del suelo de los cultivos (en línea). Frente. Sostener. Food Syst. 7:15. Disponible en <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fsufs.2023.1260178/full>.
- Lira, R; Méndez, B; De los Santos, G; Vera, I. 2019. Potencial de la nanotecnología en la agricultura (en línea). Acta universitaria 28(2):9-24. Disponible en <https://www.scielo.org.mx/pdf/au/v28n2/2007-9621-au-28-02-9.pdf>.
- Lira, RH; Argüello, BM; Villarreal, GD los S; Reyes, IV. 2018. Potencial de la nanotecnología en la agricultura. Acta Universitaria 28(2):9-24. DOI: <https://doi.org/10.15174/au.2018.1575>.
- Llive, F; Cadillo, J; Liger, B; Rosero, G; Fraga, E; Ramos, J. 2015. Vulnerabilidad y dependencia internacional de fertilizantes en el Ecuador CEPROEC Documento de Trabajo 2015_04 VULNERABILIDAD ... OF 1 28 (en línea). Vulnerabilidad (c):3-25. Disponible en http://ceproec.iaen.edu.ec/wps/2015_04.pdf.
- Mandal, D. 2021. Nanofertilizante y su aplicación en horticultura (en línea). Revista de horticultura aplicada 23(1):70-77. Disponible en https://horticultureresearch.net/jah/2021_23_1_70_77.pdf.
- Martez, L. 2022. Uso de la nanotecnología En el desarrollo de fertilizantes orgánicos y pesticidas. International Journal of Science and Society 4(4):547-556. DOI: <https://doi.org/10.54783/ijssoc.v4i4.604>.
- Mejías, J; Salazar, F; Pérez, L; Hube, S; Rodríguez, M; Alfaro, M. 2021. Nanofertilizantes: un enfoque de vanguardia para aumentar la eficiencia

- del uso de nitrógeno en los pastizales (en línea). *Frente. Reinar. Sci.* 9:11. Disponible en <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fenvs.2021.635114/full>.
- Morales, J; Arriaga, M; López, J; Martínez, R; Morales, J. 2019. Urea (NBPT) una alternativa en la fertilización nitrogenada de cultivos anuales. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas* 10(8):1875-1886.
- Nazari, M; Kordrostami, M; Ghasemi-Soloklui, AA; Al-Khayri, JM. 2023. Role of Nanomaterials in Improving the Nutritional Value of Crops (en línea). *In Al-Khayri, JM; Alnaddaf, LM; Jain, SM (eds.)*. Cham, Springer International Publishing. p. 399-422 DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-031-20878-2_15.
- Nongbet, A; Mishra, AK; Mohanta, YK; Mahanta, S; Kumar, R; Khan, M; Baek, K-H; Chakrabartty, I. 2022. Nanofertilizantes: un atributo inteligente y sostenible de la agricultura moderna (en línea). *Plantas (Basilea)* 11(19):11. DOI: <https://doi.org/10.3390/plants11192587>.
- Ojeda, D; Morales, I; Juárez, A; Sandoval, A; Fuentes, L; Benavides, A. 2020. Importancia de los nanofertilizantes en la nutrición de frutas (en línea). *Cultivos frutales* 4(2):497-508. Disponible en <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/B9780128187326000356>.
- Olarte, S; González, J; Soto, J; Carranza, M. 2022. Factores de adopción de nanotecnología en cultivo de quinua (en línea). *Información Tecnológica* 33(6):83-92. Disponible en <https://www.scielo.cl/pdf/infotec/v33n6/0718-0764-infotec-33-06-83.pdf>.
- Omara, A; Elbehiry, F; El-Ramady, H; Áron, B; Prokisch, J; Brevik, E; Solberg, S. 2023. Nanofertilizantes biológicos para mejorar el potencial de crecimiento de las plántulas de fresa al aumentar los pigmentos fotosintéticos, los antioxidantes enzimáticos de las plantas y el estado nutricional (en línea). *Plantas* 12(2):8. DOI: <https://doi.org/10.3390/plants12020302>.
- Pandey, G; Tripathi, S; Bajpai, S; Kamboj, M. 2023. Approaches, Challenges, and Prospects of Nanotechnology for Sustainable Agriculture (en línea).

In Fernandez-Luqueno, F; Patra, JK (eds.). Singapore, Springer Nature Singapore. p. 83-103 DOI: https://doi.org/10.1007/978-981-19-5454-2_3.

Ramos, C; Pérez, S; Guerrero, S; Palacios, A. 2021. Biofertilización y nanotecnología en la alfalfa (*Medicago sativa* L.) como alternativas para un cultivo sustentable (en línea). *Cultivos Tropicales* 42(2):15. Disponible en <http://scielo.sld.cu/pdf/ctr/v42n2/1819-4087-ctr-42-02-e10.pdf>.

Rehman, A; Noreen, I; Raza, H; Javed, Z; Rahman, K; Ali, M. 2023. Nanotecnología para mejorar la producción de cultivos: una breve reseña (en línea). *Revista de la Universidad Xi'an Shiyou* 19(11):12. Disponible en https://www.researchgate.net/publication/376357677_Nanotechnology_for_Enhanced_Crop_Production_A_Brief_Review.

Rodríguez, B; Rodríguez, M; Consuelo, L. 2019. Agroquímicos y riesgo para la salud y ambiente : problemática en la vereda El Valle , municipio de Junín , Cundinamarca Resumen. *Biociencias* 3 Núm. 1:23.

Sachan, R; Verma, H; Yadav, A; Nisha, S. 2021. Nanofertilizantes: aplicaciones y perspectivas de futuro (en línea). *Agricultura justa multidisciplinaria* 1(11):5. Disponible en <https://justagriculture.in/files/newsletter/2021/july/52>.

Salamá, D; El-Aziz, A; Shaaban, E; Osmán, S; Abd, M. 2022. El impacto de los nanofertilizantes en los criterios agromorfológicos, el rendimiento y la estabilidad genómica del frijol común (*Phaseolus vulgaris* L.) (en línea). *Informes Científicos* 12:15. Disponible en <https://www.nature.com/articles/s41598-022-21834-9>.

Salama, DM; Abd El-Aziz, ME; Rizk, FA; Abd Elwahed, MSA. 2021. Applications of nanotechnology on vegetable crops (en línea). *Chemosphere* 266:129026. DOI: <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2020.129026>.

Saraiva, R; Ferreira, Q; Rodrigues, GC; Oliveira, M. 2023. Uso de nanofertilizantes para la adaptación y mitigación de los efectos de la dicotomía agricultura/cambio climático (en línea). *Clima* 11(6):12. DOI:

<https://doi.org/10.3390/cli11060129>.

Shang, Y; Hasan, K; Ahammed, G; Li, M; Yin, H; Zhou, J. 2019. Aplicaciones de la nanotecnología en el crecimiento vegetal y la protección de cultivos: una revisión (en línea). *Moléculas* 24(14):11. DOI: <https://doi.org/10.3390/molecules24142558>.

Shebl, A; Hassan, A; Salama, D; Abd El-Aziz, M; Abd, M. 2019. Síntesis Verde de Nanofertilizantes y su Aplicación Foliar para Cucurbita pepo L (en línea). *Revista de nanomateriales* 2019:34. DOI: <https://doi.org/10.1155/2019/3476347>.

Shesh, K; Ajay, G; Bochalya, R. 2022. Revista de investigación sobre economía agrícola (en línea). *Revista de investigación sobre economía agrícola* 35:212. Disponible en <https://www.indianjournals.com/ijor.aspx?target=ijor:aerr&volume=35&issue=conf&article=098>.

TFI (The Fertilizer Institute). 2012. ¿Cuál es el papel de los fertilizantes en la sociedad actual? (en línea, sitio web). Consultado 10 abr. 2023. Disponible en <https://www.tfi.org/the-feed/what-role-fertilizer-today's-society>.

Universidad Industrial de Santander. 2023. Investigadores UIS llevarán propuesta sobre uso de nanofertilizantes en prácticas agronómicas a evento internacional (en línea, sitio web). Consultado 1 may 2023. Disponible en <https://uis.edu.co/investigadores-uis-llevaran-propuesta-sobre-uso-de-nanofertilizantes-en-practicas-agronomicas-a-evento-internacional/>.

Vázquez, E. 2023. Uso de nanomateriales en la agricultura y sus implicaciones ecológicas y ambientales (en línea). *Mundo nano. Revista interdisciplinaria en nanociencias y nanotecnología* 16(30):1-25. Disponible en <https://www.scielo.org.mx/pdf/mn/v16n30/2448-5691-mn-16-30-e00061.pdf>.

Verma, K; Song, X-P; Joshi, A; Tian, D-D; Rajput, V; Singh, M; Arora, J; Minkina, T; Li, Y-R. 2022. Tendencias recientes en nanofertilizantes para la

agricultura sostenible en el contexto del cambio climático para la seguridad alimentaria mundial (en línea). *Nanomateriales* 12(1):17. DOI: <https://doi.org/10.3390/nano12010173>.

Yadav, A; Yadav, K; Abd, K. 2023. Nanofertilizantes: tipos, entrega y ventajas en la sostenibilidad agrícola (en línea). *Agroquímicos* 2(2):296-336. DOI: <https://doi.org/10.3390/agrochemicals2020019>.

Zahra, Z; Habib, Z; Hyun, H; Shahzad, H. 2022. Descripción general de los avances recientes en el diseño, la aplicación y los impactos de los nanofertilizantes en la agricultura (en línea). *Sostenibilidad* 14(15):12. DOI: <https://doi.org/10.3390/su14159397>.

Zulfiqara, F; Navarro, M; Ashrafd, M; Aisha, N; Munné, S. 2019. Uso de nanofertilizantes para la agricultura sostenible: ventajas y limitaciones (en línea). *Ciencia de las plantas* 289:11. Disponible en <https://labin.net/wp-content/uploads/2021/05/Nanofertilizer-use-for-sustainable-agriculture-Advantages-and-limitations.pdf>.