



UTMACH

FACULTAD DE CIENCIAS AGROPECUARIAS

CARRERA DE AGRONOMÍA

EFFECTO DE DISTINTAS FUENTES DE NITROGENO CON Y SIN
INHIBIDORES
SOBRE LAS PROPIEDADES QUÍMICAS DEL SUELO Y PARÁMETROS
AGRONÓMICOS EN EL CULTIVO DE BANANO

TEJEDOR PAMBE SEBASTIAN IVAN
INGENIERO AGRONOMO

DIAZ MOROCHO JORDAN ADRIAN
INGENIERO AGRONOMO

MACHALA
2025



UTMACH

FACULTAD DE CIENCIAS AGROPECUARIAS

CARRERA DE AGRONOMÍA

**EFFECTO DE DISTINTAS FUENTES DE NITROGENO CON Y SIN
INHIBIDORES
SOBRE LAS PROPIEDADES QUÍMICAS DEL SUELO Y
PARÁMETROS**

**TEJEDOR PAMBE SEBASTIAN IVAN
INGENIERO AGRONOMO**

**DIAZ MOROCHO JORDAN ADRIAN
INGENIERO AGRONOMO**

**MACHALA
2025**



UTMACH

FACULTAD DE CIENCIAS AGROPECUARIAS

CARRERA DE AGRONOMÍA

TRABAJOS EXPERIMENTALES

**EFFECTO DE DISTINTAS FUENTES DE NITROGENO CON Y
SIN INHIBIDORES
SOBRE LAS PROPIEDADES QUÍMICAS DEL SUELO Y
PARÁMETROS**

**TEJEDOR PAMBE SEBASTIAN IVAN
INGENIERO AGRONOMO**

**DIAZ MOROCHO JORDAN ADRIAN
INGENIERO AGRONOMO**

VILLASEÑOR ORTIZ DIEGO RICARDO

**MACHALA
2025**



Tesis_B

2%
Textos sospechosos



< 1% Similitudes
0% similitudes entre comillas
0% entre las fuentes mencionadas
2% Idiomas no reconocidos

Nombre del documento: Tesis_B.pdf	Depositante: FLOR YELENA VEGA JARAMILLO	Número de palabras: 15.911
ID del documento: 2d32c3f3004d2e6173388f78800e65b1977248ab	Fecha de depósito: 31/7/2025	Número de caracteres: 114.136
Tamaño del documento original: 1,11 MB	Tipo de carga: interface	
	fecha de fin de análisis: 31/7/2025	

Ubicación de las similitudes en el documento:



Fuentes con similitudes fortuitas

Nº	Descripciones	Similitudes	Ubicaciones	Datos adicionales
1	repositorio.utmachala.edu.ec https://repositorio.utmachala.edu.ec/bitstream/48000/17479/1/TTUACA-2021-IA-DE00061.pdf	< 1%		Palabras idénticas: < 1% (25 palabras)
2	exa-comprimido.pdf exa-comprimido #106fb0 Viene de de mi grupo	< 1%		Palabras idénticas: < 1% (11 palabras)
3	blogagricultura.com Fertilizantes para aplicar nitrógeno a los cultivos https://blogagricultura.com/fertilizantes-nitrogeno-suelo/	< 1%		Palabras idénticas: < 1% (10 palabras)

CLÁUSULA DE CESIÓN DE DERECHO DE PUBLICACIÓN EN EL REPOSITORIO DIGITAL INSTITUCIONAL

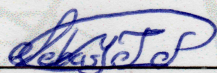
Los que suscriben, TEJEDOR PAMBE SEBASTIAN IVAN y DIAZ MOROCHO JORDAN ADRIAN, en calidad de autores del siguiente trabajo escrito titulado EFECTO DE DISTINTAS FUENTES DE NITROGENO CON Y SIN INHIBIDORES SOBRE LAS PROPIEDADES QUÍMICAS DEL SUELO Y PARÁMETROS AGRONÓMICOS EN EL CULTIVO DE BANANO, otorgan a la Universidad Técnica de Machala, de forma gratuita y no exclusiva, los derechos de reproducción, distribución y comunicación pública de la obra, que constituye un trabajo de autoría propia, sobre la cual tienen potestad para otorgar los derechos contenidos en esta licencia.

Los autores declaran que el contenido que se publicará es de carácter académico y se enmarca en las disposiciones definidas por la Universidad Técnica de Machala.

Se autoriza a transformar la obra, únicamente cuando sea necesario, y a realizar las adaptaciones pertinentes para permitir su preservación, distribución y publicación en el Repositorio Digital Institucional de la Universidad Técnica de Machala.

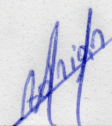
Los autores como garantes de la autoría de la obra y en relación a la misma, declaran que la universidad se encuentra libre de todo tipo de responsabilidad sobre el contenido de la obra y que asumen la responsabilidad frente a cualquier reclamo o demanda por parte de terceros de manera exclusiva.

Aceptando esta licencia, se cede a la Universidad Técnica de Machala el derecho exclusivo de archivar, reproducir, convertir, comunicar y/o distribuir la obra mundialmente en formato electrónico y digital a través de su Repositorio Digital Institucional, siempre y cuando no se lo haga para obtener beneficio económico.



TEJEDOR PAMBE SEBASTIAN IVAN

0750504045



DIAZ MOROCHO JORDAN ADRIAN

0706019353

DEDICATORIA

A la memoria de mis abuelos Elías Morocho y Cristina Machuca, cuya presencia espiritual me ha acompañado a lo largo de este camino. Aunque ya no estén físicamente, su amor, sus enseñanzas y su ejemplo de vida siguen vivos en mi corazón. Este logro es también para ustedes, con todo mi cariño y gratitud.

A mis padres, Cesar Díaz y Rebeca Morocho, por ser mi mayor soporte, por su amor incondicional, sus sacrificios silenciosos y por creer en mí en cada etapa de esta travesía. Y a mis demás familiares, quienes con su apoyo y cariño me han motivado a seguir adelante.

A mis amigos del alma: Josselyn Ajila, Alisson Echeverría, Jorge Rentería, Miguel Zambrano, Cristhian León, Leiver Pineda y Sebastián Tejedor, por su amistad sincera, por acompañarme con su alegría, palabras de aliento y confianza en los momentos más importantes de esta etapa. Su presencia ha sido fundamental para llegar hasta aquí.

A todos ustedes, les dedico con amor, respeto y gratitud este trabajo, fruto de esfuerzo, perseverancia y sueños compartidos.

Jordan Adrian Díaz Morocho

DEDICATORIA

Primero que todo, agradezco a Dios, fuente infinita de vida, amor y sabiduría, por acompañarme en cada paso, sostenerme en los momentos difíciles y bendecirme con personas valiosas en mi camino.

A mi familia, Vicente Tejedor y Mariana Pambe, gracias por su amor incondicional, esfuerzo y ejemplo. Me enseñaron el valor de la familia, la humildad y la perseverancia; son mi raíz, mi fuerza y mi inspiración. A mis hermanos, Jonh y Ashley Tejedor Pambe, gracias por ser un apoyo constante y recordarme lo valioso de crecer unidos. Ashley, la más pequeña, con tu ternura y alegría llenas nuestro hogar de esperanza. Verte crecer es un regalo que guardo en el corazón.

A mi compañera y amor presente, Mayerly Ramos Sisalima, gracias por estar a mi lado con paciencia, comprensión y amor. Eres parte esencial de mi presente y de los sueños que aún están por venir.

A mis amigos del alma, Kelyn I., Jamileht M., Alexander M., Erick C., Ebert L., y Jordán D., gracias por su lealtad, por las risas compartidas y el apoyo incondicional. Son familia elegida y por eso los valoro profundamente.

A mis abuelitos, que ya no están físicamente, pero viven en mi corazón, gracias por el legado de sabiduría, amor y lucha que dejaron. Sus enseñanzas siguen guiando mis pasos y fortaleciendo mi espíritu.

A todos ustedes, gracias por ser parte del plan de Dios en mi vida.

Sebastián Iván Tejedor Pambe

AGRADECIMIENTOS

Agradecemos primeramente a Dios, por ser nuestra guía constante, dándonos sabiduría, fortaleza y esperanza en cada paso de este proceso académico. Su presencia fue luz en los momentos de dificultad y motor de nuestras decisiones.

A nuestros familiares, por su amor incondicional, comprensión y apoyo en todo momento. Gracias por creer en nosotros incluso cuando dudamos, por alentarnos a seguir adelante y por ser la base de este logro.

A nuestros amigos, por estar presentes en los buenos y malos momentos, por brindar su compañía, apoyo y alegría en el camino universitario. Gracias por compartir risas, desvelos, estudios y aprendizajes que siempre llevaremos con nosotros.

Agradecemos de manera especial al Dr. Diego Villaseñor, por confiar en nosotros, brindarnos su guía, conocimientos y apoyo durante la formación profesional. Su orientación y compromiso han sido fundamentales en nuestro crecimiento académico y personal.

Queremos expresar nuestro más sincero agradecimiento a la compañía privada de Yara Ecuador por el apoyo financiero brindado a nuestro proyecto de tesis. Gracias a su respaldo y compromiso con la investigación agronómica, fue posible llevar a cabo este estudio con insumos adecuados y condiciones óptimas, contribuyendo al desarrollo científico y sostenible de la agricultura. Valoramos profundamente la confianza depositada en nosotros y la oportunidad de contribuir, desde el ámbito académico, a la mejora continua de la agricultura en nuestro país.

A cada uno de nuestros docentes, asesores y personal administrativo de la universidad, quienes con su vocación y dedicación nos formaron no solo como profesionales, sino como seres humanos críticos y responsables.

Finalmente, extendemos nuestro agradecimiento a todas las personas que, de una u otra forma, nos brindaron una palabra, un gesto o su tiempo en este camino. Cada uno ha sido parte de esta meta alcanzada.

RESUMEN

El presente estudio tuvo como objetivo evaluar el efecto de distintas fuentes de nitrógeno, con y sin inhibidores, sobre las propiedades químicas del suelo y parámetros agronómicos en el cultivo de banano (*Musa AAA*) en condiciones tropicales del litoral ecuatoriano. El banano, principal producto de exportación agrícola del Ecuador, requiere un manejo eficiente del nitrógeno para optimizar el rendimiento y minimizar el impacto ambiental, debido a su alta demanda nutricional. En sistemas intensivos, la sobreaplicación de nitrógeno suele generar pérdidas por lixiviación, acidificación del suelo y emisión de gases contaminantes, por lo que se analizaron tecnologías como fertilizantes estabilizados e inhibidores de ureasa y nitrificación.

La investigación se realizó en la finca Sarahí, bajo un diseño experimental de bloques completamente al azar (DBCA) con seis tratamientos y cuatro repeticiones. Se evaluaron variables agronómicas (masa de raíces, hojas, altura y fuste), químicas (pH, CE, NO_3^- , NH_4^+), productivas (masa de racimo, calibre, longitud de dedos) y económicas (ingreso neto y relación beneficio/costo). Los resultados indicaron que, aunque no todas las variables mostraron diferencias estadísticas, las fuentes con inhibidores de nitrificación (DMPP) y urea recubierta con azufre (SCU) presentaron mejoras agronómicas y mayores rendimientos (hasta 73,3 lb por planta), además de un uso más eficiente del nitrógeno.

Desde el punto de vista económico, los tratamientos con tecnologías de liberación controlada mostraron relaciones B/C superiores a 13, superando ampliamente a la urea convencional. Además, redujeron la lixiviación de nitratos y estabilizaron el pH edáfico, destacando su impacto positivo en la sostenibilidad del cultivo.

Se recomienda incorporar estas fuentes mejoradas en zonas con alta vulnerabilidad a la pérdida de nutrientes, monitorear periódicamente el contenido de nitrógeno en el suelo y continuar

con investigaciones a largo plazo sobre su efecto en el microbiota edáfico y el rendimiento sostenido. El uso racional de fertilizantes estabilizados representa una alternativa viable para elevar la productividad del banano, garantizar la salud del suelo y reducir el impacto ambiental en sistemas agrícolas intensivos.

Palabras clave: Fertilización nitrogenada, inhibidores de nitrificación, eficiencia del uso del nitrógeno, rendimiento productivo, lixiviación de nitratos.

ABSTRACT

This study aimed to evaluate the effect of different nitrogen sources, with and without inhibitors, on soil chemical properties and agronomic parameters in banana (*Musa AAA*) cultivation under tropical conditions of Ecuador's coastal region. As the country's leading agricultural export, bananas require efficient nitrogen management to optimize yield and minimize environmental impacts due to their high nutritional demand. In intensive systems, nitrogen overapplication often leads to leaching losses, soil acidification, and greenhouse gas emissions. Therefore, technologies such as stabilized fertilizers and urease and nitrification inhibitors were analyzed.

The research was conducted at the Sarahí farm, using a randomized complete block design (RCBD) with six treatments and four replications. Evaluated variables included agronomic traits (root mass, leaf count, height, and stem diameter), soil chemical properties (pH, EC, NO_3^- , NH_4^+), productive indicators (bunch weight, fruit diameter, finger length), and economic parameters (net income and benefit/cost ratio). Results showed that, although not all variables presented statistical significance, treatments with nitrification inhibitors (DMPP) and sulfur-coated urea (SCU) showed improved agronomic performance and higher yields (up to 73.3 lb per plant), as well as more efficient nitrogen use.

Economically, controlled-release technologies achieved B/C ratios above 13, significantly outperforming conventional urea. They also reduced nitrate leaching and helped stabilize soil pH, underscoring their contribution to sustainable banana production.

It is recommended to incorporate enhanced nitrogen sources in areas vulnerable to nutrient loss, regularly monitor soil nitrogen forms, and conduct long-term studies on their effects on soil

microbiota and sustained yield. The rational use of stabilized fertilizers offers a viable path toward increasing banana productivity, preserving soil health, and minimizing environmental impact in intensive farming systems.

Keywords: Nitrogen fertilization, nitrification inhibitors, nitrogen use efficiency, productive yield, nitrate leaching.

ÍNDICE

1. INTRODUCCIÓN.....	14
1.1. Objetivo General.....	16
1.2. Objetivos Específicos	16
2. MARCO TEÓRICO	17
2.1. Contexto nacional económico y social del cultivo de banano en Ecuador.	17
2.2. Descripción botánica del cultivo.....	18
2.2.1. Rizoma	18
2.2.2. Sistema radical	19
2.2.3. Hojas	19
2.2.4. Pseudotallo	20
2.2.5. Inflorescencia	21
2.2.6. Racimo	21
2.3. Requerimientos edafoclimáticos	22
2.3.1. Clima.....	22
2.3.2. Suelo	22
2.3.3. Humedad relativa	23
2.3.4. Viento	23
2.3.5. Radiación	23
2.3.6. Presión de vapor	23
2.3.7. pH del suelo.....	24
2.3.8. Salinidad.....	24
2.4. Requerimientos nutricionales del cultivo de banano	24
2.4.1. Nitrógeno	24
2.4.2. Fósforo	25
2.4.3. Potasio.....	26
2.4.4. Magnesio	27
2.4.5. Calcio	28
2.4.6. Azufre	29
2.4.7. Zinc	29
2.4.8. Boro.....	29
2.5. Fisiología del crecimiento y desarrollo	30
2.6. Relación entre fertilización nitrogenada y el cultivo de banano.....	31
2.7. Fuentes de nitrógeno en la nutrición vegetal.....	31
2.7.1. Urea.....	31

2.7.2.	Nitrato de amonio.....	32
2.7.3.	Sulfato de amonio.....	33
2.8.	Inhibidores de nitrificación y de ureasa	33
2.8.1.	Mecanismo de acción de los fertilizantes con inhibidores de nitrificación y ureasa	34
2.8.2.	Inhibidores de la nitrificación 3,4-dimetilpirazol fosfato.....	34
2.8.3.	Inhibidores de la ureasa N-(n-butil) triamida de ácido tiofosfórica	35
2.8.4.	Recubrimiento de azufre.....	35
2.9.	Efecto del uso de fertilizantes simples y de los fertilizantes con inhibidor sobre las propiedades químicas del suelo.....	36
2.10.	Parámetros agronómicos en el cultivo de banano	36
2.10.1.	Dinámica del crecimiento y desarrollo del banano	36
2.10.2.	Masa del racimo como variable cuantitativa como evaluación de rendimiento	38
2.11.	Gestión ambiental del uso responsable del nitrógeno en la producción de banano	39
2.11.1.	Contaminación por lixiviación de nitratos.....	40
3.	MATERIALES Y MÉTODOS	41
3.1.	Ubicación del ensayo	41
3.2.	Material genético vegetal utilizado en el ensayo.....	42
3.3.	Diseño experimental	43
3.4.	Caracterización inicial del suelo	44
3.5.	Tratamientos	47
3.6.	Preparación y aplicación de los ciclos de fertilización.....	48
3.7.	Toma de datos de las variables evaluadas	49
3.7.1.	Variables de desarrollo agronómico.....	50
3.7.2.	Variables químicas de suelo.....	53
3.7.3.	Variable de rendimiento productivo.....	55
3.7.4.	Variables de eficiencia del uso de fertilizantes	57
3.8.	Procedimiento estadístico	58
4.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN	59
4.1.	Variables de desarrollo agronómico	59
4.2.	Variables químicas del suelo	62
4.2.1.	pH del suelo.....	62
4.2.2.	Conductividad eléctrica (C.E.)	64
4.2.3.	Nitrato del suelo	66
4.2.4.	Amonio del suelo	67
4.3.	Variables de rendimiento productivo	69

4.4.	Variables de eficiencia del uso del fertilizante	73
5.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	77
5.1.	Conclusiones.....	77
5.2.	Recomendaciones	78
6.	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	80
7.	ANEXOS	88

ÍNDICE DE TABLA

Tabla 1 Caracterización química inicial del suelo del área experimental antes de la aplicación de tratamientos	46
Tabla 2 Dosis de fertilizantes por tratamientos	48
Tabla 3 Resumen de resultados estadísticos en variables de crecimiento evaluadas.	61
Tabla 4 Resumen de resultados estadísticos en variables de rendimiento productivo evaluadas.	70
Tabla 5 Resumen de resultados estadísticos en variables de uso eficiente del fertilizante evaluadas.	73

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 Planta de banano en la finca agrícola de producción comercial.....	18
Figura 2 Rizoma de una planta de banano y las respectivas partes que lo componen, Adaptado de Simmonds, N. W. (1973).	19
Figura 3 Distribución y morfología de las hojas de la planta de banano	20
Figura 4 Pseudotallo de una planta de banano.....	20
Figura 5 Estructura compleja que se desarrolla en la parte superior de la planta.....	21
Figura 6 Racimos cosechados en la finca agrícola de producción comercial.....	22
Figura 7 Finca agrícola, localizada en el sitio El Vergel, en el cantón El Guabo, provincia de El Oro.	42
Figura 8 Diseño de bloques completamente al azar (DBCA 6x4), con 6 tratamientos distribuidos aleatoriamente en 4 bloques y 24 unidades experimentales	44
Figura 9 Preparación de los tratamientos correspondientes.....	49
Figura 10 Aplicación de los fertilizantes en campo.....	49
Figura 11 Prueba de Kruskal-Wallis	62
Figura 12 Medias de pH por tratamiento	64
Figura 13 Media de CE por tratamiento	65
Figura 14 Media de NO_3^- por tratamiento	67
Figura 15 Media de NH_4^+ por tratamiento	69
Figura 16 Media de Calibre de mano apical	71
Figura 17 Media de masa del racimo	72
Figura 18 Pruebas de Kruskal - Wallis	73
Figura 19 Media de Beneficio/Costo por Fuentes de N.....	75

1. INTRODUCCIÓN

El banano (*Musa* spp.) es un cultivo estratégico a nivel global, con más de 115 millones de toneladas métricas producidas anualmente y un valor comercial estimado en 8,9 mil millones de dólares. Es la fruta fresca más exportada del mundo y el cuarto cultivo agrícola en volumen, tras el arroz, trigo y maíz. Su carácter perenne y cosecha continua lo hacen clave para la seguridad alimentaria y la economía de países tropicales (Iriarte et al., 2014; Vaca et al., 2020).

En este contexto, la competitividad del banano en el mercado internacional se explica por su alta productividad, eficiencia logística y cumplimiento de estándares de calidad. Ecuador, Filipinas y Costa Rica lideran las exportaciones, mientras que Estados Unidos, Alemania y Bélgica concentran gran parte de la demanda. Asimismo, la producción a gran escala en los países exportadores permite reducir costos y ofrecer precios competitivos (Guerrero, 2017; León et al., 2023).

Por lo tanto, el manejo nutricional del banano exige estrategias específicas debido a su fisiología, alto consumo de nutrientes y variabilidad en la absorción según la etapa fenológica. La eficiencia de la fertilización depende tanto de las propiedades físico-químicas del suelo como de la dinámica fisiológica de la planta (García-Guzmán et al., 2021). En sistemas de exportación intensivos, la fertilización puede representar hasta el 40 % del costo total de producción (Stoorvogel y Mena, 2018).

Ahora bien, la fertilización en sistemas intensivos de banano suele exceder las necesidades fisiológicas del cultivo, lo que disminuye su eficiencia agronómica y provoca efectos negativos como la acidificación del suelo y la lixiviación de nitratos. La respuesta del banano al nitrógeno

depende de múltiples factores, incluyendo la dosis, la fuente, el momento de aplicación y las características físico-químicas del suelo. (Gouda, et al., 2021).

Por otro lado, el exceso de N puede inducir alteraciones metabólicas, inhibir la actividad de enzimas clave (nitrato reductasa, glutamina sintetasa, sacarosa sintasa y sacarosa fosfato sintasa) y limitar la translocación de fotoasimilados hacia órganos de reserva. Así mismo, se han reportado efectos negativos sobre propiedades edáficas críticas como la materia orgánica, la estabilidad estructural, la capacidad de retención hídrica y la actividad enzimática del suelo (ureasa, fosfatasa, invertasa), que regulan la disponibilidad y ciclado de nutrientes (Stoorvogel et al., 2018).

En vista de ello, los inhibidores de nitrificación y ureasa, como la diciandiamida (DCD) y el fosfato de 3,4-dimetilpirazol (DMPP), mitigar pérdidas por lixiviación o desnitrificación en sistemas agrícolas intensivos. Al retrasar la conversión de amonio (NH_4^+) a nitrato (NO_3^-), estos inhibidores mantienen el nitrógeno disponible por más tiempo en la zona radicular, optimizando su absorción por las plantas. En plantaciones de banano, su uso mejora el rendimiento de los cultivos, reduce impactos negativos sobre el suelo y disminuye la contaminación ambiental, contribuyendo a un manejo más sostenible del nitrógeno (Kim et al., 2012; Verhulst et al., 2015).

En este sentido, la presente investigación tiene como objetivo evaluar el efecto de diferentes fuentes de nitrógeno, con y sin el uso de inhibidores, sobre las propiedades químicas del suelo y los parámetros agronómicos del cultivo de banano en condiciones tropicales. La hipótesis central se basa en que el uso de inhibidores puede mejorar la eficiencia del nitrógeno aplicado, reduciendo pérdidas por lixiviación y volatilización, y atenuando el impacto negativo sobre la fertilidad edáfica.

1.1.Objetivo General

Evaluar el efecto de distintas fuentes de nitrógeno con y sin inhibidores sobre las propiedades químicas del suelo y parámetros agronómicos en el cultivo de banano.

1.2.Objetivos Específicos

- Evaluar el efecto de distintas fuentes de nitrógeno, con y sin inhibidores, sobre las propiedades químicas del suelo.
- Analizar el efecto de las distintas fuentes de nitrógeno, con y sin inhibidores, en los parámetros agronómicos del cultivo de banano.
- Determinar la rentabilidad económica de las variables de eficiencia del uso de fertilizantes nitrogenados.

2. MARCO TEÓRICO

2.1. Contexto nacional económico y social del cultivo de banano en Ecuador.

El cultivo de banano en Ecuador ha sido históricamente uno de los principales motores de la economía nacional, no solo por su peso en las exportaciones —convirtiendo al país en el mayor exportador mundial desde 1954, sino también por sus profundas repercusiones sociales y regionales. Durante el auge bananero entre 1948 y 1965, el sector contribuyó significativamente al producto interno bruto, generando empleo masivo, propiciando la migración del campo a la ciudad y consolidando una burguesía exportadora nacional, especialmente en torno a empresas como Exportadora Bananera Noboa (Larrea et al., 1987).

La articulación de este modelo agroexportador con economías campesinas y formas no capitalistas de producción permitió mantener bajos los salarios, mientras que las grandes empresas en particular las transnacionales se beneficiaban de la estructura oligopsónica del mercado, apropiándose de gran parte del excedente generado (Jadán et al., 2024).

Sin embargo, el desarrollo del sector también ha estado marcado por una creciente concentración económica, precarización laboral y pérdida de la capacidad redistributiva del Estado. Aunque el banano continúa siendo el cultivo agrícola con mayor capacidad de empleo directo e indirecto, la tecnificación reciente y las estrategias empresariales han reducido la demanda de mano de obra y debilitado los vínculos con las comunidades campesinas, particularmente en la región Costa (Larrea et al., 1987).

Las proyecciones a 2025 muestran una posible recuperación del sector, aunque esta dependerá de políticas que promuevan la innovación tecnológica, la articulación productiva, la equidad en la

distribución del excedente y la sostenibilidad ambiental, aspectos urgentes frente a los desafíos del mercado global y los efectos del cambio climático (Jadán et al., 2024).

2.2.Descripción botánica del cultivo

El banano es una planta herbácea de gran tamaño, típica en regiones tropicales, especialmente en América Latina, es una monocotiledónea perenne sin tallo leñoso (Figura 1). Su estructura está compuesta por un rizoma subterráneo, hojas grandes y alargadas que forman un pseudotallo, y una inflorescencia que da origen al racimo de frutos (Galan et al., 2018).



Figura 1 Planta de banano en la finca agrícola de producción comercial.

2.2.1. Rizoma

El rizoma es el verdadero tallo del banano: un órgano subterráneo corto, grueso y rico en almidón que actúa como depósito de reservas energéticas (Figura 2). De él emergen las raíces adventicias y los brotes o “hijuelos”, mientras sus yemas laterales permiten la formación de nuevas

plantas, asegurando la perpetuidad del cultivo (Galan et al., 2018). Aunque en ocasiones se le ha comparado con un bulbo o un cormo, su denominación correcta es rizoma (Simmonds, 1962).

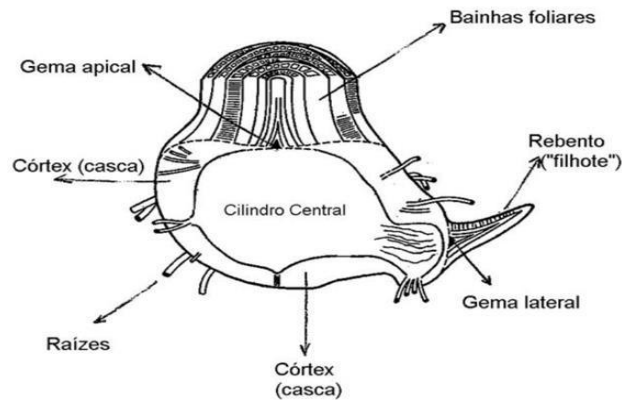


Figura 2 Rizoma de una planta de banano y las respectivas partes que lo componen, Adaptado de Simmonds, N. W. (1973).

2.2.2. Sistema radical

El banano desarrolla un sistema radicular adventicio que brota del rizoma, en lugar de provenir de una raíz primaria. Estas raíces pueden alcanzar entre tres y cinco metros de longitud, extendiéndose vertical y horizontalmente para optimizar la captación de agua y nutrientes (Galan et al., 2018). Sin embargo, Soto (1985), menciona que entre el 60 y 70 % de las raíces se concentran en los primeros 30 cm del suelo, y apenas el 17 % están activas al mismo tiempo.

2.2.3. Hojas

Las hojas son grandes, de forma ovalada y dispuestas en espiral alrededor del centro de la planta (Figura 3). Emergen en forma de espada, el cual poco a poco se desarrollan completamente con una lámina ancha, un pecíolo y una vaina, estas vainas se superponen constituyendo el pseudotallo (Galan et al., 2018). Una planta puede llegar a producir hasta cuarenta hojas antes de que emerja la inflorescencia (Simmonds, 1962).



Figura 3 Distribución y morfología de las hojas de la planta de banano

2.2.4. Pseudotallo

El pseudotallo, a menudo es confundido con el tronco, se forma por la sucesión de vainas foliares rígidas que aportan soporte al conjunto aéreo (Figura 4). Además de sostener las hojas y el racimo, actúa como reserva de agua y almidón. (Arteaga, 2015). Su altura depende del cultivar y de las condiciones de cultivo (Galan et al., 2018).



Figura 4 Pseudotallo de una planta de banano

2.2.5. Inflorescencia

Cuando la planta ha completado su fase vegetativa, desde el centro del pseudotallo emerge la inflorescencia. Esta es una estructura alargada que cuelga hacia abajo y contiene flores organizadas en grupos bajo brácteas rojizas (Figura 5). Las flores femeninas se encuentran en la parte superior, seguidas por las hermafroditas y, finalmente, por las masculinas (Arteaga, 2015). Cada grupo floral dará lugar a una “mano” de frutos; pueden llegar a tener doce manos por racimo (Barrera et al., 2009).



Figura 5 Estructura compleja que se desarrolla en la parte superior de la planta

2.2.6. Racimo

El racimo es el conjunto de todas las manos producidas por inflorescencia. Cada mano está formada por varios frutos o “dedos”, cuyo número y tamaño del racimo depende del cultivar y del manejo agronómico (Figura 6). En promedio, se pueden formar entre diez y catorce manos por racimo (Arteaga, 2015). El fruto, cambia de color verde a amarillo a medida que madura. Las características del racimo, como su peso y la forma de los frutos, influyen en la calidad comercial del banano (Barrera et al., 2009).



Figura 6 Racimos cosechados en la finca agrícola de producción comercial

2.3.Requerimientos edafoclimáticos

2.3.1. Clima

El banano requiere un clima tropical húmedo, con temperaturas óptimas entre 21 °C y 29 °C y una precipitación anual mínima de 1.200 mm distribuida uniformemente durante todo el año (Santos et al., 2019; Uwimana et al., 2021). Es sensible a temperaturas extremas y a la escasez prolongada de agua, lo cual puede afectar su crecimiento y la formación de los racimos (Monge-Freile et al., 2022).

2.3.2. Suelo

El banano se desarrolla mejor en suelos bien drenados y profundos ($\geq 1,2$ metros de suelo que esté sin capas duras, piedras grandes, compactaciones ni encharcamientos), con buena estructura y ricos en materia orgánica (Quiñónez, 2020).

2.3.3. Humedad relativa

La humedad relativa ideal debe estar por encima del 80 %, esto favorece a que las plantas mantengan una buena transpiración y absorban agua sin estrés. Sin embargo, si el suelo se encharca por más de 48 horas, las raíces pueden asfixiarse y morir, afectando gravemente el desarrollo del cultivo (Dumaguila, 2024).

2.3.4. Viento

Debido que el banano tiene un pseudotallo alto y un sistema radical poco profundo, con vientos superiores a los 30 km h⁻¹ pueden provocar que las plantas se caigan o se desgaren las hojas, disminuyendo la producción de alimento por fotosíntesis (Vargas et al., 2017).

2.3.5. Radiación

Necesita entre 1.000 y 1.500 horas de luz al año para garantizar un óptimo desempeño fotosintético, lo que se traduce en racimos más grandes y mejor calidad de fruta. Por eso, las zonas muy nubladas o con sombra prolongada no son las más recomendadas para este cultivo (Jaramillo, 2020).

2.3.6. Presión de vapor

Aunque no siempre se menciona explícitamente, la presión de vapor refleja la disponibilidad de humedad atmosférica. Un déficit en este indicador provoca marchitez foliar, clorosis y reducción del desarrollo vegetativo, por lo que es esencial mantener una adecuada humedad ambiental, sobre todo en la estación seca (Monge-Freile et al., 2022).

2.3.7. pH del suelo

El pH ideal del suelo oscila entre 5,5 y 6,5, rango que optimiza la solubilidad de los nutrientes y facilita su absorción radicular. Valores fuera de estos límites pueden desencadenar deficiencias nutricionales y comprometer la calidad del cultivo (Quiñónez, 2020).

2.3.8. Salinidad

La salinidad debe ser baja ($\leq 1 \text{ dS}\cdot\text{m}^{-1}$), y es indispensable contar con sistemas de riego y drenaje adecuados, especialmente en zonas de alta humedad o sequía (Domingues et al., 2021).

2.4.Requerimientos nutricionales del cultivo de banano

2.4.1. Nitrógeno

El nitrógeno (N) es uno de los nutrientes esenciales para el desarrollo del cultivo de banano, debido a su papel fundamental en la síntesis de proteínas, clorofila y compuestos enzimáticos que permiten una adecuada fotosíntesis y un crecimiento vegetativo vigoroso. Este nutriente participa directamente en procesos fisiológicos clave, como la emisión foliar y el desarrollo del pseudotallo, aspectos determinantes para la productividad del cultivo (Soto y Coto, 2021).

Durante el ciclo del banano, existen etapas fenológicas donde la demanda de nitrógeno es particularmente elevada, especialmente en el crecimiento activo del pseudotallo y hojas, así como en la formación del racimo. En estas fases críticas, un suministro adecuado de nitrógeno contribuye significativamente a mejorar parámetros productivos como el número de manos por racimo, el tamaño del fruto y la velocidad de emisión de hojas, lo que finalmente se refleja en mayores rendimientos por hectárea (Turner y Lahav, 2020).

En sistemas de producción intensiva, como aquellos orientados a la exportación, se recomienda aplicar entre 250 y 350 kg N ha⁻¹ año⁻¹, fraccionados a lo largo del ciclo del cultivo. Esta estrategia busca maximizar la eficiencia del nutriente y minimizar las pérdidas por lixiviación o volatilización, fenómenos comunes en suelos tropicales con alta precipitación o riego excesivo (Soto y Coto, 2021).

Para estimar la eficiencia nutricional del nitrógeno en el cultivo de banano, se ha comparado la cantidad total extraída por hectárea con el rendimiento en toneladas. Por ejemplo, en Costa Rica se estima una extracción promedio de 5,9 kg N por tonelada de fruta, mientras que en Martinica este valor se eleva a 6,82 kg N t⁻¹, lo que podría indicar una menor eficiencia de absorción o un sistema productivo más exigente en términos nutricionales. En contraste, Colombia reporta una extracción de 5,07 kg N t⁻¹, posiblemente asociada a menores rendimientos o a una estructura de racimo distinta (Tavares y Falquez, 1997; Soto et al., 1997).

En el caso del clon ‘Gran Enano’, ampliamente cultivado en Latinoamérica, se ha determinado que para alcanzar un rendimiento de 60 toneladas por hectárea se requiere una extracción aproximada de 102 kg N ha⁻¹. Este valor reafirma la necesidad de una fertilización racional y adaptada a las condiciones locales, considerando tanto la etapa fenológica del cultivo como la eficiencia del sistema radicular para aprovechar el nutriente (Tavares y Falquez, 1997; Soto et al., 1997).

2.4.2. Fósforo

Es clave para la formación de raíces vigorosas y la maduración del fruto. Además, interviene en la transferencia de energía a través de compuestos como el ATP (adenosín trifosfato), que almacena y transporta energía dentro de la planta y ADP (adenosín difosfato), que es la forma

descargada del ATP que puede recargarse para volver a transportar energía. Su deficiencia se manifiesta con un desarrollo lento, retraso en la floración y baja eficiencia en el aprovechamiento de otros nutrientes, afectando la formación del racimo y su uniformidad (Pineda, 2021). Según Tavares y Soto et al. (1997), Martinica destaca por una extracción por tonelada significativamente mayor ($2,05 \text{ kg t}^{-1}$), lo que podría asociarse con suelos de baja disponibilidad natural o prácticas de fertilización intensiva. Costa Rica y Colombia presentan necesidades mucho menores por tonelada ($0,47$ y $0,61 \text{ kg t}^{-1}$, respectivamente). La extracción de fósforo es de 12 kg ha^{-1} , necesario para el desarrollo radicular y procesos energéticos como la floración y el cuajado del fruto (Tavares y Falquez, 1997).

2.4.3. Potasio

Es el nutriente que más se acumula en los tejidos del banano, especialmente en el fruto. Está relacionado con el transporte de azúcares, el equilibrio osmótico, la apertura y cierre estomático, y la síntesis de almidón, lo que lo convierte en esencial para la calidad del fruto. Además, mejora la resistencia a enfermedades y al estrés hídrico. La carencia de potasio provoca necrosis marginal en las hojas, menor peso de los racimos y frutos deformes (Pineda, 2021). Según Tavares y Soto et al. (1997), Colombia tiene una altísima demanda relativa ($54,11 \text{ kg t}^{-1}$), lo que puede deberse a suelos deficientes o pérdidas elevadas. Martinica también presenta un requerimiento elevado ($26,52 \text{ kg t}^{-1}$), mientras que Costa Rica muestra una eficiencia relativamente buena con $12,73 \text{ kg t}^{-1}$. El potasio es el nutriente más demandado, con una extracción de 242 kg ha^{-1} , clave para el llenado del fruto, la calidad del racimo y la resistencia al estrés (Soto et al., 1997).

2.4.4. Magnesio

Se requiere en menor proporción comparado con otros macronutrientes, no puede ser descuidado, ya que cumple funciones esenciales en el metabolismo vegetal. Es el átomo central de la molécula de clorofila, por lo tanto, resulta vital para el proceso de fotosíntesis. Su deficiencia reduce el crecimiento de la planta, provoca clorosis internerval en hojas viejas y disminuye el llenado del fruto, afectando negativamente la producción final (Valencia, 2018).

La extracción de magnesio por tonelada de fruta refleja diferencias importantes en la eficiencia nutricional entre países productores. Según Tavares y Soto et al. (1997), Martinica presenta la mayor extracción con $3,56 \text{ kg Mg t}^{-1}$, lo que podría indicar una mayor exigencia del cultivo o una baja disponibilidad del nutriente en el suelo. En contraste, Costa Rica muestra una extracción intermedia de $1,68 \text{ kg Mg t}^{-1}$, lo que sugiere un uso más eficiente del nutriente, posiblemente asociado a un manejo agronómico más equilibrado y suelos con mejor disponibilidad de magnesio.

Por su parte, Colombia registra la menor extracción, con $1,46 \text{ kg Mg t}^{-1}$. Sin embargo, este valor también está vinculado a menores rendimientos, lo que podría señalar deficiencias en la absorción o disponibilidad del magnesio. En conjunto, Costa Rica evidencia un mejor equilibrio entre absorción del nutriente y productividad, mientras que los sistemas de cultivo en Martinica y Colombia podrían beneficiarse de ajustes en la fertilización con magnesio.

En términos absolutos, se estima que, para una producción de 60 toneladas por hectárea, el cultivo de banano extrae aproximadamente 6 kg Mg ha^{-1} . Esta cantidad, aunque modesta, es indispensable para mantener una fotosíntesis eficiente y asegurar el desarrollo saludable del cultivo (Soto et al., 1997).

2.4.5. Calcio

El calcio (Ca) es un nutriente esencial para el cultivo de banano debido a su papel fundamental en el fortalecimiento de las paredes celulares, la división celular y la integridad estructural del pseudotallo. Además, interviene en la firmeza de la fruta y en el correcto funcionamiento de las membranas celulares, lo cual influye directamente en la calidad del producto final. Su deficiencia se asocia a diversos trastornos fisiológicos como la pudrición apical, una menor vida útil postcosecha y una mayor susceptibilidad a enfermedades, especialmente la pudrición de corona (Valencia, 2018).

La eficiencia en la absorción de calcio varía significativamente entre países productores, lo cual puede estar influenciado por las condiciones del suelo, el manejo agronómico y el rendimiento del cultivo. Según Tavares y Soto et al. (1997), Colombia presenta la mayor extracción de calcio por tonelada, con $8,32 \text{ kg Ca t}^{-1}$. Este valor relativamente alto, a pesar de un rendimiento bajo, sugiere una baja eficiencia en la absorción del nutriente o una disponibilidad limitada en el suelo.

En Martinica, la extracción es intermedia, con $4,55 \text{ kg Ca t}^{-1}$, lo que podría explicarse por un manejo más intensivo o condiciones edáficas que requieren mayor suplementación de este nutriente. En cambio, Costa Rica, con un rendimiento elevado de aproximadamente 60 t ha^{-1} , muestra la extracción más baja, con solo $2,23 \text{ kg Ca t}^{-1}$. Esta relación sugiere una mayor eficiencia nutricional, posiblemente atribuida a suelos bien equilibrados y prácticas de fertilización más efectivas.

De forma general, se estima que el cultivo de banano requiere alrededor de 6 kg Ca ha^{-1} por ciclo productivo. Esta cantidad, aunque no es de las más elevadas entre los macronutrientes,

es crucial para garantizar la firmeza estructural de la planta y el desarrollo adecuado de sus órganos vegetativos y reproductivos (Tavares y Falquez, 1997).

2.4.6. Azufre

Cumple un rol importante en la formación de aminoácidos azufrados como la metionina y la cisteína, así como en la síntesis de coenzimas y vitaminas. Su déficit afecta el metabolismo proteico y genera síntomas similares a la deficiencia de nitrógeno, como clorosis y bajo crecimiento (Valencia, 2018). Según Tavares y Soto et al. (1997), Martinica nuevamente registra la mayor extracción relativa ($2,18 \text{ kg t}^{-1}$), lo cual podría indicar un manejo de fertilización más intensivo, o mayores pérdidas por lavado o volatilización. Costa Rica y Colombia están por debajo de 1 kg t^{-1} .

2.4.7. Zinc

Es un micronutriente indispensable para la síntesis de auxinas, la elongación celular y la formación de compuestos reguladores del crecimiento. En el banano, su deficiencia genera entrenudos cortos, menor número de manos por racimo y alteraciones en la brotación de hijuelos (Pineda, 2021).

2.4.8. Boro

Es vital para el desarrollo reproductivo de la planta. Participa en la formación del tubo polínico, la germinación del polen y la translocación de azúcares. En el banano, su deficiencia puede producir frutos deformes, fisuras en los dedos y racimos incompletos, lo que reduce significativamente su calidad comercial (Valencia, 2018).

2.5. Fisiología del crecimiento y desarrollo

El desarrollo del banano transcurre en etapas secuenciales, cada una sostenida por órganos y procesos específicos. Inicialmente, el rizoma tallo subterráneo engrosado acumula los carbohidratos y reservas energéticas que impulsan el crecimiento vegetativo (Martínez y Cayón, 2011). A medida que la planta madura, esas reservas se distribuyen entre las hojas y el pseudotallo el “falso tronco” para mantener la fotosíntesis y sostener la estructura. Durante la fase de fructificación, la energía se concentra en el racimo, de modo que, al momento de la cosecha, el fruto puede constituir hasta el 50 % de la materia seca total de la planta (Martínez y Cayón, 2011).

Detrás de este crecimiento ordenado están las fitohormonas, son sustancias naturales que la misma planta produce para regular su desarrollo. Las auxinas ayudan a que las raíces crezcan fuertes y que las células se alarguen, lo que permite que la planta se estire (Meléndez, 2021).

Las giberelinas estimulan el alargamiento del tallo y favorecen la floración y el crecimiento del fruto, mientras que las citoquininas promueven la división celular y el engrosamiento del tallo, lo cual es esencial para sostener el peso del racimo (Guato, 2021). Sin embargo, en épocas de estrés como sequías o lluvias excesivas la planta puede no producir las cantidades necesarias, afectando su desarrollo (Meléndez, 2021).

Estudios realizados en campo han demostrado que, al aplicar estas hormonas de forma externa, se puede mejorar notablemente el desarrollo de la planta. Se han visto aumentos en la cantidad de hojas activas, en el tamaño de las yemas y en la longitud del tallo. También se mejora la producción del racimo, tanto en número de dedos como en peso del fruto. Esto se debe a que las hormonas optimizan funciones internas clave como la fotosíntesis y la absorción de nutrientes, lo cual se traduce en un cultivo más vigoroso y productivo (Santana, 2021; Guato, 2021).

2.6. Relación entre fertilización nitrogenada y el cultivo de banano

La nutrición vegetal es un pilar fundamental para incrementar la producción agrícola y enfrentar la creciente demanda de alimentos. En el caso del cultivo de banano, la fertilización con nitrógeno cumple un rol clave, ya que este elemento es indispensable para la formación de proteínas, aminoácidos y ácidos nucleicos, compuestos que son esenciales para desarrollo vegetativo vigoroso y garantizan frutos de mayor tamaño y calidad. Un programa de fertilización balanceado no solo optimiza el crecimiento, sino que también refuerza la estabilidad del sistema de producción frente a las presiones del mercado y mejora las características organolépticas del producto final (Dumes, 2023).

Diversos estudios han evidenciado que el nitrógeno (N) influye directamente en aspectos importantes del rendimiento del banano, como el tamaño del racimo y el peso de los frutos. Además, una estrategia de fertilización que combine el nitrógeno con otros nutrientes esenciales, como el potasio, favorece el crecimiento vegetativo y aumenta la intensidad de clorofila en las hojas, lo que se traduce en plantas más saludables y cosechas más abundantes (Cervantes et al., 2020).

2.7. Fuentes de nitrógeno en la nutrición vegetal

2.7.1. Urea

La urea es el fertilizante nitrogenado más utilizado a nivel mundial debido a su alta concentración de nitrógeno (46 %) y bajo costo de producción. Se sintetiza mediante la reacción de amoníaco (NH_3) con dióxido de carbono (CO_2), generando gránulos altamente solubles en agua. Una vez aplicada al suelo, la urea se transforma rápidamente en amonio (NH_4^+) gracias a la acción de la enzima ureasa; sin embargo, si no se incorpora adecuadamente, puede generar pérdidas por

volatilización de amoníaco, especialmente en suelos con pH alto, baja humedad o temperaturas elevadas.

Para maximizar su eficiencia, se recomienda aplicarla antes de una lluvia o mediante incorporación mecánica. No debe mezclarse con fertilizantes alcalinos como el carbonato de calcio, ya que se intensifica la volatilización. También puede aplicarse por vía foliar en bajas concentraciones, ofreciendo versatilidad en su manejo agrícola (International Plant Nutrition Institute [IPNI], 2012).

2.7.2. Nitrato de amonio

El nitrato de amonio (NH_4NO_3) es un fertilizante nitrogenado altamente eficiente que combina nitrógeno en forma nítrica y amoniacal, lo cual permite una absorción rápida y sostenida por parte de las plantas, su contenido de nitrógeno varía entre 33% y 34%, y su alta solubilidad (1900 g L^{-1} a 20°C) Su alta solubilidad lo hace adecuado para sistemas de fertirrigación, pero también requiere cuidados en su manejo por su naturaleza higroscópica y su potencial riesgo si no se almacena adecuadamente (Alcántara-Nazario et al., 2023).

Su uso está estrictamente regulado en varios países por su potencial uso en la fabricación de explosivos, además, puede sufrir pérdidas por desnitrificación en suelos mal drenados y no debe mezclarse con fertilizantes poco solubles o altamente absorbentes de humedad. Para maximizar su eficacia, se recomienda aplicarlo en suelos con buena humedad y evitar condiciones anaeróbicas que aceleren su transformación gaseosa y posterior pérdida (International Plant Nutrition Institute [IPNI], 2012).

2.7.3. Sulfato de amonio

El sulfato de amonio $[\text{NH}_4]_2 \text{SO}_4$ es un fertilizante nitrogenado ampliamente utilizado por su doble aporte nutricional: contiene 21 % de nitrógeno en forma amoniacal y 24 % de azufre, un nutriente esencial para la síntesis de aminoácidos y proteínas en las plantas. Su forma amoniacal es estable en el suelo, especialmente en ambientes húmedos o inundados, como en el cultivo de arroz. Además, su capacidad acidificante lo hace ideal para suelos alcalinos o con pH elevado. El sulfato de amonio presenta buena solubilidad y puede mezclarse con otros fertilizantes sólidos, aunque se debe evitar su combinación con productos que contengan calcio o magnesio por posibles reacciones químicas indeseadas. También se emplea con frecuencia en mezcla con herbicidas, mejorando su eficacia al reducir el pH de la solución pulverizada. Su aplicación favorece cultivos que requieren nitrógeno y azufre simultáneamente, especialmente en sistemas intensivos y suelos con deficiencia de este último (International Plant Nutrition Institute [IPNI], 2012).

2.8. Inhibidores de nitrificación y de ureasa

Los inhibidores de ureasa N-(n-butil) triamida de ácido tiofosfórica (NBPT) y de nitrificación 3,4-dimetilpirazol fosfato (DMPP) y dicianidamida (DCD) son esenciales para reducir pérdidas en nitrógeno en la agricultura al disminuir la volatilización de amoníaco y las emisiones de óxido nitroso, respectivamente (Huang et al., 2025; Matse et al., 2025).

El uso combinado de estos compuestos no solo incrementa la eficiencia en el uso del nitrógeno (EUN) y los rendimientos de los cultivos, sino que también contribuye a reducir la huella ambiental de la fertilización nitrogenada (Antošovský et al., 2025). No obstante, es importante ajustar cuidadosamente las dosis: concentraciones excesivas de inhibidores pueden alterar la

fisiología radical y limitar el desarrollo del sistema de raíces, afectando la absorción de agua y nutrientes (Huang et al., 2025).

2.8.1. Mecanismo de acción de los fertilizantes con inhibidores de nitrificación y ureasa

Los fertilizantes formulados con inhibidores de nitrificación incorporan compuestos, que actúan sobre la enzima amoníaco monooxigenasa de las bacterias *Nitrosomonas* spp. Al bloquear esta ruta, se retrasa la conversión de amonio (NH_4^+) a nitrato (NO_3^-), lo que disminuye las emisiones de óxidos de nitrógeno (N_2O) y la lixiviación de nitratos (Papadopoulou et al., 2024).

Por otro lado, los fertilizantes con inhibidores de ureasa modulan la hidrólisis de la urea, al inhibir la enzima ureasa presente en el suelo. Esto minimiza la liberación rápida de amoníaco (NH_3) a la atmósfera, lo cual contribuye a una liberación más gradual de nitrógeno, sincronizándose mejor con las necesidades de la planta y mejorando la eficiencia de uso del fertilizante (Huang et al., 2025).

2.8.2. Inhibidores de la nitrificación 3,4-dimetilpirazol fosfato

El 3,4-dimetilpirazol fosfato (DMPP) ha consolidado como uno de los inhibidores de nitrificación más eficaces disponibles (Zhao et al., 2024). Diversas investigaciones han demostrado que la aplicación de DMPP puede reducir significativamente las emisiones de óxido nitroso (N_2O), hasta en un 77% en sistemas agrícolas convencionales al frenar la nitrificación en momentos críticos del ciclo agrícola, lo cual representa un beneficio ambiental importante, ya que se destaca la mitigación del cambio climático, dado que el N_2O posee un potencial de calentamiento global 273 veces más al CO_2 (Liu et al., 2023; Tariq et al., 2025).

2.8.3. Inhibidores de la ureasa N-(n-butil) triamida de ácido tiofosfórica

El N-(n-butil) triamida de ácido tiofosfórica es uno de los inhibidores de ureasa más utilizados. Su función principal es retardar la conversión de urea en amoníaco, reduciendo así las pérdidas por volatilización en condiciones de suelo seco o alcalino (Huang et al., 2025).

Estudios recientes revelan que la aplicación adecuada de NBPT puede disminuir las pérdidas de nitrógeno en forma de amoníaco hasta en un 45 %, favoreciendo la eficiencia del fertilizante sin afectar negativamente el crecimiento vegetal. Sin embargo, se ha observado que dosis excesivas de NBPT pueden inhibir el desarrollo radical, lo que destaca la importancia de una dosificación precisa para maximizar sus beneficios (Sunling et al., 2024).

2.8.4. Recubrimiento de azufre.

La urea recubierta con azufre, conocida como SCU (*Sulfur-Coated Urea*) se ha consolidado como una estrategia para prolongar la disponibilidad de nitrógeno en el suelo. Al en cubrir los gránulos de urea con una fina capa de azufre, lo que permite que el nitrógeno se libere lentamente y constante, a diferencia de la urea tradicional que se disuelve rápidamente en el suelo (Mustafa et al., 2022).

Este tipo de tecnología reduce pérdidas de nitrógeno, por lixiviación y volatilización, representando un ahorro económico al agricultor, también mejora el rendimiento y la calidad de los cultivos, especialmente en suelos con alta disponibilidad de agua, propensos al lavado de nutrientes (Myers, Russel, y Young, 1979).

Además de que el azufre actúa como barrera física; también actúa como nutriente secundario, participando en la formación de proteínas, enzimas y aminoácidos como cisteína y metionina, esenciales para el crecimiento y defensa de la planta. Esto mejora la eficiencia

fotosintética teniendo así plantas más vigorosas y productivas frente a condiciones adversas (Mustafa et al., 2022).

2.9. Efecto del uso de fertilizantes simples y de los fertilizantes con inhibidor sobre las propiedades químicas del suelo

El uso de diferentes fuentes de nitrógeno, tanto simples como aquellas con inhibidores, tiene un impacto significativo sobre las propiedades químicas del suelo. La aplicación excesiva de fertilizantes nitrogenados, especialmente los que contienen amonio, puede provocar una acidificación del suelo, reduciendo el pH, la conductividad eléctrica (CE), la materia orgánica (MO) y aumentando la acidez intercambiable y la disponibilidad de aluminio. Estos cambios afectan negativamente la disponibilidad de nutrientes esenciales para el desarrollo adecuado de las plantas (Tao et al., 2025).

2.10. Parámetros agronómicos en el cultivo de banano

Los parámetros agronómicos son indicadores que permiten evaluar el desarrollo y rendimiento del banano, ayudando a determinar su estado de salud y productividad. Estos incluyen características como la altura de la planta, número de hojas, circunferencia del pseudotallo, peso del racimo, entre otros. Medir estos aspectos es esencial para tomar decisiones sobre la fertilización y el manejo en general del cultivo (Roman et al., 2023).

2.10.1. Dinámica del crecimiento y desarrollo del banano

El crecimiento vegetativo en el banano se refiere al desarrollo de sus partes no reproductivas, como hojas, tallos, raíces que son vitales para la captación de luz, agua y nutrientes. Este crecimiento se ve fuertemente influenciado por la disponibilidad de nitrógeno (Torres-Bazurto et al., 2019). Su ritmo de crecimiento se rige por una curva sigmoidea: inicia con una fase

logarítmica de crecimiento lento, seguida de un período exponencial de acumulación rápida de materia seca y concluye con una meseta o senescencia al inicio de la fructificación (Martínez y Cayón, 2011).

Durante la fase vegetativa, el cultivo emite entre 35 y 36 hojas con una frecuencia cercana a una hoja por semana en periodo húmedo, lo que le permite mantener activas de 10 a 14 hojas fotosintéticas que sostienen el crecimiento (Martínez y Cayón, 2011). A medida que la planta transita de la etapa exponencial a la lineal, la velocidad de acumulación de materia seca aumenta de forma constante hasta la emergencia de la inflorescencia, marcando el inicio de la fase reproductiva.

En cuanto a la participación de fotoasimilados cambia a lo largo del ciclo: mientras el cormo funciona como principal órgano de reserva en la fase inicial, la formación del tallo floral y de los botones (“bacota”) convierte a las hojas y al pseudotallo en fuentes predominantes, redirigiendo sus reservas hacia el racimo en desarrollo (Martínez y Cayón, 2011). Este relevo coincide con la desaceleración de la acumulación de materia seca en tejidos vegetativos y el aumento sostenido en el fruto, que al momento de la cosecha representa cerca del 50 % de la materia seca total de la planta (Martínez y Cayón, 2011).

Aunque tanto el cultivar Gran Enano como Valery se ajustan a este mismo modelo sigmoideal, difieren en la duración de sus fases: Gran Enano completa la transición vegetativo-reproductiva en unos 57 días, mientras que Valery lo hace en aproximadamente 75 días, lo que retrasa proporcionalmente la senescencia y la cosecha. Ambos, sin embargo, requieren acumular un umbral cercano a 3000 g de materia seca para desencadenar la floración, subrayando la importancia de un nivel crítico de reservas como señal metabólica para la transición reproductiva (Martínez y Cayón, 2011).

2.10.2. Masa del racimo como variable cuantitativa como evaluación de rendimiento

La masa del racimo de banano es una variable cuantitativa fundamental en la evaluación del rendimiento del cultivo debido a su estrecha relación con el aprovechamiento fisiológico de los recursos y la eficiencia fotosintética de la planta. En términos fisiológicos, el racimo representa el principal sumidero de fotoasimilados después de la floración, siendo el órgano reproductivo de mayor demanda energética. Su masa está influenciada por múltiples factores como el tipo de semilla, el estado nutricional, las condiciones edafoclimáticas y el manejo agronómico (Bernal y Delgado, 2022).

En estudios recientes, se ha demostrado que materiales vegetativos como el corno + pseudotallo, al poseer mayores reservas nutricionales, permiten un desarrollo más vigoroso de la planta y un mayor peso del racimo (24,3 kg en promedio), lo que evidencia una correlación directa entre la biomasa acumulada y el potencial productivo (Bernal y Delgado, 2022).

Desde una perspectiva de gestión, medir la masa del racimo permite estimar con precisión el rendimiento en toneladas por hectárea y ajustar variables críticas como densidad de siembra, riego y momento de cosecha. Al incorporarse en modelos de predicción, esta variable facilita la toma de decisiones en función de escenarios de retorno, recobro y merma (Orozco y Pérez, 2006; Bernal y Delgado, 2022).

Además, investigaciones previas han demostrado que el peso del racimo puede ser significativamente afectado por la tensión hídrica del suelo y la fertilización nitrogenada, lo que refuerza su valor como indicador sensible a condiciones ambientales y de manejo (Orozco y Pérez, 2006). En definitiva, el peso del racimo de banano, al integrar respuestas fisiológicas, ambientales

y agronómicas, constituye una variable cuantitativa clave para diagnosticar, monitorear y optimizar el rendimiento de este cultivo tropical.

2.11. Gestión ambiental del uso responsable del nitrógeno en la producción de banano

La gestión cuidadosa del nitrógeno en el cultivo de banano es vital para proteger nuestro entorno. Cuando aplicamos más fertilizante del que la planta puede absorber, parte de ese nitrógeno se escapa al aire como óxido nitroso (N_2O) o se filtra hacia ríos y acuíferos, contribuyendo al cambio climático y a la eutrofización de cuerpos de agua (Rashid et al., 2025; Li et al., 2025). El N_2O , en particular, es un gas con un poder de calentamiento 273 veces mayor que el CO_2 , lo que explica por qué cada pérdida cuenta (Liu et al., 2023).

Para evitar estos problemas, existen métodos sencillos y efectivos. Por ejemplo, medir el contenido de nitrógeno en el suelo antes de fertilizar nos ayuda a suministrar justo lo que la planta necesita, ni más ni menos. También podemos recurrir a inhibidores de ureasa y de nitrificación, que moderan la conversión de fertilizantes en formas inestables y reducen tanto las emisiones como la lixiviación (Tariq et al., 2023). Complementar con sistemas de fertirriego permite ajustar la dosis y el momento de aplicación, sincronizando la liberación de nitrógeno con el ritmo de crecimiento del banano.

Más allá de la tecnología, prácticas como mantener cobertura vegetal o enriquecer el suelo con materia orgánica aumentan la capacidad del terreno para retener nutrientes y fomentan una vida microbiana saludable (Rashid et al., 2025). De esta forma, reducimos pérdidas de nitrógeno y mejoramos la productividad de forma natural (Li et al., 2025). Con estas medidas, el agricultor no solo ahorra en fertilizantes, sino que también cuida los ecosistemas y asegura una producción de banano más sostenible a largo plazo (Tariq et al., 2023; Liu et al., 2023).

2.11.1. Contaminación por lixiviación de nitratos

La lixiviación de nitratos es uno de los principales riesgos ambientales derivados del uso de fertilizantes nitrogenados. Este proceso ocurre cuando los nitratos, altamente solubles en agua, se filtran desde el suelo hacia las capas profundas o incluso alcanzan las aguas subterráneas (Chen et al., 2024). Factores como las lluvias intensas, el riego excesivo o un manejo inadecuado del fertilizante pueden agravar este fenómeno (Assa et al., 2024).

La contaminación por nitratos en aguas subterráneas representa un riesgo para la salud humana, ya que niveles elevados pueden provocar enfermedades como la metahemoglobinemia infantil, también conocida como "síndrome del bebé azul" y otros trastornos. Además, su acumulación en cuerpos de agua favorece la proliferación de algas nocivas, afectando los ecosistemas acuáticos (Murphy et al., 2024).

Es por ello es que se están implementando tecnologías como los inhibidores, que ayudan a reducir pérdidas y contaminaciones, al mantener más tiempo el nitrógeno en formas menos móviles (amoníaco o amonio), se reduce la formación de nitratos susceptibles de lixivarse, mejorando la eficiencia del fertilizante y, al mismo tiempo, disminuyendo las emisiones de óxido nítrico (Antošovský et al., 2025).

3. MATERIALES Y MÉTODOS

3.1.Ubicación del ensayo

El presente estudio se llevó a cabo en la finca agrícola Sarahí, ubicada en el sitio El Vergel, cantón El Guabo, provincia de El Oro, Ecuador, cuyas coordenadas geográficas son 3°15'04.03" de latitud sur y 79°49'01.07" de longitud oeste, bajo el datum WGS 84. Esta zona forma parte de la región Litoral ecuatoriana, caracterizada por un clima megatérmico tropical que oscila entre seco y semihúmedo, con dos estaciones marcadas: una seca (mayo a diciembre) y otra lluviosa (enero a abril). Las temperaturas durante la estación húmeda varían entre los 25 °C y 30 °C, influenciadas por factores como la Zona de Convergencia Intertropical, la corriente de Humboldt y el relieve andino (Pourrut et al., 1995; Bendix et al., 2008).

El clima de esta región, con una temperatura media anual cercana a los 27 °C y una precipitación promedio de 750 mm, proporciona condiciones agroclimáticas favorables para cultivos tropicales de importancia económica como el banano, cacao, arroz y maíz. La región costera del Ecuador cuenta con aproximadamente el 43 % de su superficie apta para cultivos, sustentada por suelos fértiles y condiciones climáticas estables (Winckell & Zebrowski, 1997).

En cuanto a sus características edáficas, el área experimental presenta suelos Inceptisoles e Inceptic Haplustalf, formados principalmente por sedimentos aluviales antiguos. Estos suelos poseen una evolución intermedia, buena fertilidad natural y un alto potencial agronómico si se manejan adecuadamente (IGM, 2019b; Soil Survey Staff, 2006). Además, la finca cuenta con un sistema de riego automatizado y prácticas de manejo convencional con control en el uso de insumos químicos, lo que favorece una producción eficiente y sostenida.

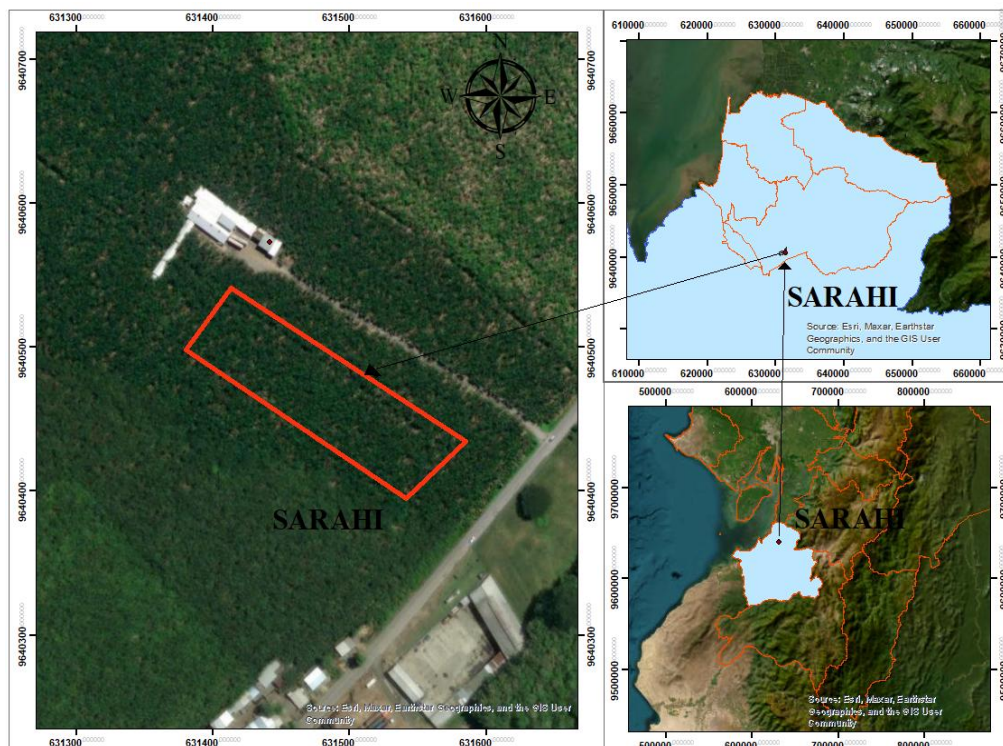


Figura 7 Finca agrícola, localizada en el sitio El Vergel, en el cantón El Guabo, provincia de El Oro.

3.2. Material genético vegetal utilizado en el ensayo

En el área de cultivo de la finca donde se llevó a cabo el ensayo, se encuentran establecidos dos tipos de clones comerciales de banano (*Musa* AAA grupo Cavendish): Valery y Williams, ambos ampliamente utilizados en Ecuador por su alta productividad, adaptabilidad a las condiciones tropicales y demanda en mercados internacionales. Sin embargo, para la presente investigación se seleccionó exclusivamente el clon Williams, debido a su reconocida estabilidad en producción, calidad de fruto y buena respuesta frente a condiciones de manejo intensivo (Sarmiento y Cadme, 2023).

Los materiales vegetales utilizados fueron adquiridos previamente por la empresa propietaria del terreno, la cual realizó la compra a un laboratorio ecuatoriano certificado y especializado en la propagación de clones de alta productividad mediante técnicas de

micropropagación in vitro. Este tipo de reproducción clonal garantiza la uniformidad genética, sanidad vegetal y óptimo desarrollo del cultivo, ya que permite obtener plantas libres de patógenos, con vigor genético comprobado y adaptadas a las condiciones edafoclimáticas del litoral ecuatoriano (Sarmiento y Cadme, 2023).

3.3.Diseño experimental

Se implementó un diseño de bloques completamente al azar (DBCA 6x4) con el objetivo de minimizar la variabilidad experimental atribuible a factores no controlados y garantizar una distribución equitativa de los tratamientos dentro del área de estudio (Figura 8). El experimento comprendió seis tratamientos distribuidos en cuatro repeticiones o bloques, sumando un total de veinticuatro unidades experimentales.

Cada unidad experimental estuvo conformada por un promedio de entre 80 y 120 plantas, establecidas en parcelas homogéneas de acuerdo con las condiciones del terreno. Para la recolección de datos, se seleccionaron un promedio de entre 30 a 50 plantas que se encontraban ubicadas en el área central de cada unidad experimental, excluyendo las plantas periféricas a fin de evitar el efecto de borde y asegurar una mayor representatividad y precisión en la evaluación de las variables agronómicas y fisiológicas del cultivo.

VIA DE ACCESO

BLOQUE 1			BLOQUE 2			BLOQUE 3			BLOQUE 4		
DOMO 2 DOMO 4 DOMO 6			DOMO 8 DOMO 10 DOMO 12			DOMO 14 DOMO 16 DOMO 18			DOMO 20 DOMO 22 DOMO 24		
T6	T4	T5	T2	T3	T4	T4	T6	T1	T2	T1	T3
T2	T1	T3	T5	T6	T1	T3	T5	T2	T6	T4	T5
DOMO 1 DOMO 3 DOMO 5			DOMO 7 DOMO 9 DOMO 11			DOMO 13 DOMO 15 DOMO 17			DOMO 19 DOMO 21 DOMO 23		

Canales

Entrada

Esta caracterización inicial permitió obtener una visión integral del estado nutricional del suelo en el área de estudio, lo que sirvió como base técnica para el cálculo preciso de las dosis de fertilización aplicadas en cada uno de los tratamientos experimentales. A continuación, se presenta la tabla de resultados del análisis químico del suelo (Tabla 1), que resume los niveles de macro y micronutrientes detectados previo al establecimiento del ensayo.

Tabla 1 Caracterización química inicial del suelo del área experimental antes de la aplicación de tratamientos

Análisis		Unidad	*Método Extracción	*Niveles Óptimos para Banano - Cultivo Intensivo	Resultados
Características del suelo	Materia Orgánica	%	-	3 - 12	3,2
	% de Saturación de Bases	%	-	> 65	72 % (Rico en base)
	Distribución de las Bases en el % de Saturación	%	-	-	Ca: 58 %, Mg: 11 %, K: 2 %, Na: 1 %
	** Capacidad de Intercambio Catiónico	meq 100 g ⁻¹	-	> 15	27,4
	Acidez Intercambiable	meq 100 g ⁻¹	-	< 0,5	0,30
	Aluminio Intercambiable	meq 100 g ⁻¹	-	< 0,3	< 0,05
	Conductividad (CE)	m S cm ⁻¹	Vol. 1:2	< 0,3 - 0,6	0,21
	pH (en H ₂ O)	-	Vol. 1:3	-	6,7
	pH (en KCl)	-	Vol. 1:4	5,5 - 7,0	5,7
Macronutrientes	Nitrato (NO ₃ -N)	mg kg ⁻¹	Extracto Agua	-	14,8
	Amonio (NH ₄ -N)	mg kg ⁻¹	NaCl 0.05 M	-	2,8
	(NO ₃ +NH ₄) -N	mg kg ⁻¹	-	35 - 60	17,6
	Fósforo (P)	mg kg ⁻¹	NaHCO ₃ 0.5 M	25 - 40	23,2
	Potasio (K)	mg kg ⁻¹	NaCl 0.05 M	140 - 320	150
	Magnesio (Mg)	mg kg ⁻¹	NaCl 0.05 M	60 - 135	174
	Calcio (Ca)	mg kg ⁻¹	NaCl 0.05 M	600 - 1200	1110
	Azufre (SO ₄ -S)	mg kg ⁻¹	Extracto Agua	15 - 25	8,1
Micronutrientes	Hierro (Fe)	mg kg ⁻¹	DTPA CaCl ₂	20 - 50	52,0
	Manganeso (Mn)	mg kg ⁻¹	DTPA CaCl ₂	6 - 30	34,7
	Cobre (Cu)	mg kg ⁻¹	DTPA CaCl ₂	1,0 - 4,0	2,7
	Zinc (Zn)	mg kg ⁻¹	DTPA CaCl ₂	1,2 - 6,0	3,3
	Boro (B)	mg kg ⁻¹	Extracto Agua	0,15 - 0,60	0,36
Peligro de Salinidad	Sodio (Na)	mg kg ⁻¹	Extracto Agua	< 140	22,5
	Cloruro (Cl ⁻)	mg kg ⁻¹	Extracto Agua	< 210	30,2
	Sales totales	mg kg ⁻¹	Extracto Agua	< 2000	173

3.5.Tratamientos

Los tratamientos establecidos en el ensayo se diseñaron con base en los requerimientos nutricionales del cultivo de banano y la composición química inicial del suelo, determinada a través del análisis de fertilidad efectuado antes de la implementación del experimento (Tabla 1). Cada tratamiento mantuvo constantes las dosis de todos los nutrientes esenciales, con excepción de la fuente de nitrógeno, que constituyó la única variable evaluada experimentalmente.

Las aplicaciones nutricionales se distribuyeron a lo largo del ciclo productivo en un total de 24 ciclos anuales, aplicados a razón de dos aplicaciones mensuales, es decir, una cada quince días. Para la formulación de los tratamientos, se utilizaron fertilizantes altamente solubles y de eficacia comprobada. El fósforo (P_2O_5) se aplicó en forma de fosfato diamónico (DAP); el potasio (K_2O) mediante una combinación de muriato de potasio (KCl) y sulfato de potasio (K_2SO_4); el calcio (CaO) y el azufre (S) a través de sulfato de calcio; el magnesio (MgO) en función del análisis edáfico; mientras que el zinc (Zn) se suministró como sulfato de zinc ($ZnSO_4$) y el boro (B) como borato sódico (Borax). Esta formulación uniforme en todos los tratamientos permitió evaluar de forma precisa el efecto diferencial de las fuentes nitrogenadas sobre el desarrollo y productividad del cultivo, eliminando la influencia de otras variables nutricionales (Tabla 2).

Tabla 2 Dosis de fertilizantes por tratamientos

Tratamientos	Dosis kg ciclo ⁻¹	N	P ₂ O ₅	K ₂ O	CaO	MgO	S	Zn	B
	24 ciclos	kg ha ⁻¹ año ⁻¹						g ha ⁻¹ año ⁻¹	
T1	185,00	348,4	34,5	526,6	74,4	49,6	27,5	758,8	844,8
T2	230,99	347,9	34,5	526,6	64,0	0,0	439,7	758,8	844,8
T3	168,36	349,9	34,5	526,6	64,0	0,0	104,5	758,8	844,8
T4	158,96	348,5	34,5	526,6	64,0	0,0	57,5	758,8	844,8
T5	160,05	347,1	34,5	526,6	64,0	0,0	57,5	758,8	844,8
T6	159,10	349,3	34,5	526,6	64,0	0,0	57,5	758,8	844,8

T1= CAN +Ca +Mg (27-0-0 +6 CaO +4 MgO); T2=Sulfato de amonio (21-0-0); T3= Urea + Recubrimiento de azufre (40-0-0 + 5,6S); T4= Urea (46 -0 -0); T5= Urea + Inh. Nitrificación (45-0-0 + 0.36 % inhibidor); T6= Urea + Inh. Ureasa (46-0-0 + inhibidor).

3.6.Preparación y aplicación de los ciclos de fertilización

La preparación de los fertilizantes se realizó antes de cada uno de los 24 ciclos de aplicación, con el objetivo de garantizar la exactitud en las dosis por planta conforme a lo establecido en el diseño experimental (Figura 9). Cada uno de los tratamientos fue formulado según las cantidades correspondientes a los nutrientes esenciales definidos para el estudio, calculados en función de las necesidades del cultivo y del contenido nutricional del suelo. La dosificación individual de los fertilizantes se efectuó utilizando una balanza digital, lo que permitió pesar con exactitud los gramos requeridos por planta para cada fuente nutricional.

Una vez pesadas, las mezclas de fertilizantes se organizaron en bolsas etiquetadas por tratamiento y por unidad experimental, lo cual permitió mantener un control estricto y evitar errores de aplicación en campo. La aplicación se realizó de forma manual y localizada, distribuyendo los fertilizantes de manera uniforme en el área de goteo de cada planta, a una distancia prudente del pseudotallo, para evitar fitotoxicidad y asegurar una adecuada absorción de los nutrientes (Figura 10). Esta labor fue realizada por los tesistas, siguiendo las normas de seguridad y buenas prácticas agrícolas.

El cronograma de fertilización contempló dos aplicaciones por mes, es decir, una cada quince días, replicando condiciones de manejo técnico intensivo en plantaciones comerciales de

banano. Este protocolo aseguró un suministro continuo y equilibrado de nutrientes durante todo el ciclo productivo, facilitando la evaluación precisa de la respuesta del cultivo frente a las distintas fuentes nitrogenadas, única variable experimental del ensayo.



Figura 9 Preparación de los tratamientos correspondientes



Figura 10 Aplicación de los fertilizantes en campo

3.7. Toma de datos de las variables evaluadas

Durante el desarrollo del ensayo se realizó la toma de datos correspondientes a cuatro grupos de variables: variables de desarrollo agronómico, variables químicas del suelo, variables de rendimiento productivo y variables económicas. En cuanto a las variables químicas del suelo, se efectuó un muestreo con el fin de evaluar los posibles cambios en la disponibilidad de nutrientes y otras propiedades edáficas en función de los tratamientos aplicados. Estos análisis permitieron determinar la dinámica del nitrógeno y de otros elementos esenciales a lo largo del ciclo productivo (MAG, 2020).

Por su parte, las variables de desarrollo agronómico y de rendimiento productivo se registraron al final del ensayo, en la etapa de cosecha, sobre plantas seleccionadas del centro de cada unidad experimental. Estas incluyeron parámetros como altura de planta, diámetro del

pseudotallo, número de hojas funcionales, peso del racimo, número de manos por racimo, número de dedos por mano, entre otros, con el objetivo de evaluar el efecto de las diferentes fuentes de nitrógeno sobre el crecimiento y la productividad del cultivo. Las mediciones fueron realizadas con instrumentos calibrados (cinta métrica, vernier, balanza digital) y registradas en fichas técnicas previamente diseñadas para el ensayo (FAO, 2019).

Finalmente, se incluyó un análisis de variables de eficiencia del uso del fertilizante, que comprendió la estimación del ingreso bruto, ingreso neto y la relación costo/beneficio por tratamiento, con el fin de determinar la viabilidad económica de cada alternativa de fertilización evaluada.

3.7.1. Variables de desarrollo agronómico

La evaluación se realizó al finalizar el ensayo, con el objetivo de determinar el efecto de las diferentes fuentes de nitrógeno sobre el desarrollo vegetativo. Para asegurar la representatividad de los datos y evitar el efecto de borde, se seleccionaron únicamente las plantas ubicadas en la parte central de cada unidad experimental, siguiendo criterios técnicos establecidos para ensayos de campo en cultivos perennes como el banano (Soto y Coto, 2021).

3.7.1.1. Masa de raíces por tratamiento

La evaluación de la masa radicular se realizó en el mes de junio de 2024, coincidiendo con la fase de floración del cultivo. Para ello, se seleccionaron cinco plantas por unidad experimental que presentaban inflorescencia visible y un hijo con al menos 1,50 metros de altura, lo que indicaba un estado de desarrollo vegetativo avanzado y uniforme. Frente a cada planta seleccionada, se excavó un hoyo de 15 cm de ancho, 30 cm de largo y 30 cm de profundidad para la extracción del

sistema radical, siguiendo los procedimientos de muestreo empleados en estudios sobre dinámica de raíces (Triviño et al., 2013).

Las raíces extraídas fueron clasificadas en vivas, muertas y enfermas, y posteriormente lavadas cuidadosamente con agua corriente para eliminar el suelo adherido. Luego, se dejaron escurrir durante aproximadamente 30 minutos, y se procedió a pesar el conjunto de raíces frescas, obteniendo así un valor representativo de la masa radicular por tratamiento, basado en la evaluación de las cinco plantas seleccionadas por unidad experimental.

3.7.1.2. Porcentaje de raíces funcionales por tratamiento

La evaluación de raíces funcionales se llevó a cabo en el mes de junio de 2024, coincidiendo con la fase de floración del cultivo. A partir de la masa total de raíces extraídas por tratamiento, se procedió a separar visualmente aquellas raíces sin signos de necrosis, pudrición o daño por nematodos, consideradas como funcionales. Este procedimiento, común en estudios fisiológicos, permite estimar la proporción activa del sistema radical (Cando, 2019).

Las raíces vivas fueron lavadas cuidadosamente para remover el suelo adherido, dejadas en reposo durante 30 minutos para escurrimiento, y posteriormente pesadas. El porcentaje de raíces funcionales se calculó con la siguiente fórmula:

$$\textit{Porcentaje de raíces vivas} = \frac{\textit{Masa raíces vivas}}{\textit{Masa total}} \times 100$$

Este valor sirve como indicador indirecto del estado fisiológico de la planta y su capacidad de absorción en función de los tratamientos evaluados (Cando, 2019).

3.7.1.3. Número de hojas funcionales a cosecha (madre y retorno)

La evaluación del número de hojas funcionales en la planta madre y en la planta de retorno se realizó al finalizar el ensayo, el mismo día en que se efectuó la cosecha. Esta variable se registró como indicador del estado fisiológico y fotosintético de las plantas, dado que el número de hojas activas influye directamente en el proceso de llenado del racimo y en el desarrollo del siguiente ciclo productivo (Robinson y Galán, 2010).

El conteo se realizó de forma manual, identificando en primer lugar la hoja más próxima al racimo considerada la hoja de referencia y a partir de ella se procedió a contar de manera descendente todas las hojas funcionales presentes, es decir, aquellas completamente desplegadas, verdes y sin signos de senescencia. Este procedimiento se aplicó tanto en la planta madre como en la planta de retorno, garantizando uniformidad en el criterio de evaluación (Robinson y Galán, 2010).

3.7.1.4. Evaluación morfológica de la planta de retorno

El día de la cosecha se registraron dos variables morfoestructurales clave en la planta de retorno: la altura total y diámetro del fuste. Estos parámetros permiten caracterizar el estado de desarrollo vegetativo y la arquitectura basal de la planta sucesora, aspectos que inciden directamente en el potencial productivo del siguiente ciclo.

La altura del retorno se midió utilizando un flexómetro, desde la base del suelo hasta la inserción del primer verticilo foliar, como referencia del crecimiento alcanzado al cierre del ciclo experimental (Turner, 2003).

Por otro lado, el diámetro del fuste se midió con una cinta métrica, tomando como punto de referencia una altura de aproximadamente 15 cm desde la base del suelo, con el fin de evaluar el grosor basal y la solidez estructural de la planta (Robinson y Galán, 2010).

3.7.2. Variables químicas de suelo

Para la evaluación de las propiedades químicas del suelo, se realizó un muestreo al finalizar el experimento, específicamente en el mes de diciembre de 2024. Las muestras fueron extraídas del centro de cada unidad experimental, a dos profundidades: 30 cm y 60 cm, con el fin de analizar la distribución vertical de los nutrientes en el perfil del suelo.

Posteriormente, las muestras fueron trasladadas al laboratorio de suelos de la Facultad de Ciencias Agropecuarias de la Universidad Técnica de Machala, donde se realizaron los análisis correspondientes a pH, conductividad eléctrica (CE), concentración de nitratos y amonio. Estas determinaciones se efectuaron utilizando un equipo multiparamétrico, previamente calibrado y sometido a un proceso de acondicionamiento de dos horas, de acuerdo con las especificaciones del fabricante, para garantizar la precisión y confiabilidad de las mediciones.

3.7.2.1. Reacción del suelo (pH y Conductividad eléctrica)

Al finalizar el ensayo, se procedió a evaluar la reacción del suelo mediante la determinación de pH y CE. Para ello, se realizó un muestreo en cada unidad experimental, la cual fue dividida en dos secciones. En cada sección se extrajeron cinco submuestras, que posteriormente fueron homogeneizadas para conformar dos muestras compuestas por unidad experimental.

La evaluación se realizó utilizando únicamente agua destilada como solución extractante, empleando una proporción de 10 gramos de suelo seco por 20 mililitros de agua, en una relación

1:2 (peso volumen⁻¹), conforme al método descrito por Thomas (1996). Las mezclas fueron homogenizadas y dejadas en reposo para estabilizar los valores antes de la lectura.

Tanto el pH como la CE fueron medidos utilizando un equipo multiparamétrico previamente calibrado, que permitió obtener de manera simultánea ambos parámetros a partir de la misma suspensión de suelo y agua destilada. Esta metodología resultó adecuada para caracterizar la acidez activa del suelo y estimar su nivel de salinidad inicial, parámetros relevantes para interpretar la disponibilidad y movilidad de nutrientes en el perfil edáfico (Horneck et al., 2011).

3.7.2.2. Identificación de Nitratos en suelo

La determinación del contenido de nitratos (NO_3^-) en el suelo se realizó utilizando un equipo multiparamétrico, el cual permite la medición directa de este ion en solución. Para este análisis se empleó la misma suspensión suelo agua destilada preparada previamente para la medición de pH, lo que permitió optimizar recursos sin comprometer la precisión de los datos. Una vez estabilizada la muestra, el equipo registró de forma automática los valores de concentración de nitratos presentes en la solución, siguiendo los parámetros de calibración establecidos por el fabricante. Esta metodología es adecuada para estudios de fertilidad edáfica, ya que permite una lectura rápida y confiable del nitrógeno en forma nítrica disponible en el perfil superficial del suelo (Horneck et al., 2011).

3.7.2.3. Identificación de Amonio en suelo

La determinación del contenido de amonio (NH_4^+) en el suelo se llevó a cabo utilizando el equipo multiparamétrico, bajo las mismas condiciones de análisis empleadas para la medición de nitratos. Para ello, se utilizó la misma solución de suelo y agua destilada previamente preparada para la medición de pH y nitratos, lo que permitió una evaluación integrada de los principales iones

nitrogenados disponibles en el suelo. Una vez estabilizada la muestra, el equipo registró de forma automática la concentración de amonio presente en la suspensión, permitiendo así una medición eficiente, rápida y confiable de esta forma de nitrógeno, fundamental para el diagnóstico nutricional del suelo y el seguimiento del comportamiento de las fuentes nitrogenadas aplicadas (Miller y Kotuby-Amacher, 1996).

3.7.3. Variable de rendimiento productivo

La evaluación de las variables de rendimiento productivo se llevó a cabo al finalizar el ensayo, el mismo día de la cosecha, en conjunto con el registro de las variables de desarrollo vegetativo. Estas mediciones se realizaron directamente sobre el racimo cosechado, considerando indicadores clave como la masa del racimo, el número de manos, el número de dedos por mano, el calibre y la longitud de los frutos, entre otros.

Estas variables fueron fundamentales para cuantificar el efecto de los tratamientos sobre el potencial productivo del cultivo, permitiendo establecer relaciones entre el tipo de fertilización nitrogenada utilizada y la respuesta del rendimiento del banano bajo condiciones experimentales controladas (Robinson y Galán, 2010).

3.7.3.1. Calibre mano apical

Se seleccionó un dedo central de la última mano del racimo (mano apical) y se midió su diámetro utilizando un calibrador, como parámetro de calidad de fruto (Martínez y Pérez, 2018).

3.7.3.2. Longitud del dedo de la mano apical

Se midió la longitud de un dedo central de la última mano del racimo utilizando una cinta métrica. Esta variable permite evaluar el desarrollo del fruto en la porción terminal del racimo, lo

cual es útil para analizar la uniformidad y el llenado de los dedos bajo diferentes condiciones de manejo nutricional (Martínez y Pérez, 2018).

3.7.3.3.Longitud del dedo de la segunda mano

Se midió la longitud de un dedo central de la segunda mano del racimo utilizando una cinta métrica. Esta medición permite comparar el desarrollo de los frutos ubicados en la parte basal del racimo respecto a los de la parte apical, lo cual es útil para evaluar la uniformidad de llenado y el efecto de los tratamientos sobre el crecimiento del fruto (Martínez y Pérez, 2018).

3.7.3.4.Número de manos del racimo

Se realizó el conteo manual del número total de manos presentes en cada racimo cosechado. Esta variable es uno de los indicadores más utilizados para estimar el rendimiento del banano, ya que refleja directamente la capacidad productiva de la planta bajo diferentes condiciones de manejo agronómico (Quijano y Arévalo, 2015).

3.7.3.5.Número de dedos de la segunda mano

Se realizó el conteo manual del número de dedos presentes en la segunda mano del racimo. Esta variable permite estimar el potencial de llenado del racimo en su zona basal y es útil para evaluar la uniformidad del desarrollo del fruto, especialmente en relación con la disponibilidad de nutrientes y prácticas de manejo (Quijano y Arévalo, 2015).

3.7.3.6.Masa del racimo

Una vez cosechados, los racimos fueron trasladados al área de empacadora, donde se determinó su masa total utilizando una balanza digital calibrada. La masa del racimo es una variable clave para evaluar el rendimiento del cultivo, ya que está directamente relacionada con el

efecto de los tratamientos nutricionales y las condiciones agroecológicas del sitio (Zambrano et al., 2022).

3.7.4. Variables de eficiencia del uso de fertilizantes

Para evaluar la eficiencia económica de cada tratamiento, se calcularon tres indicadores fundamentales: ingreso bruto, beneficio neto y relación beneficio/costo (B/C), a partir de los datos productivos y de costos por unidad experimental.

3.7.4.1.Ingreso Bruto

El ingreso bruto se obtuvo multiplicando la masa promedio del racimo por planta (en libras) por un precio estimado de venta por libra, el cual varió levemente según la calidad de la fruta producida en cada tratamiento.

3.7.4.2.Ingreso Neto

El beneficio neto se determinó restando al ingreso bruto el costo total del fertilizante aplicado por tratamiento. Este se calculó considerando la cantidad de fertilizante aplicado por hectárea, su costo por kilogramo y la concentración de nitrógeno disponible, siguiendo metodologías de evaluación de insumos agrícolas.

3.7.4.3.Beneficio Costo entre tratamientos

Se estimó la relación beneficio/costo (B/C) dividiendo el ingreso bruto entre el costo del fertilizante. Este indicador permite comparar la rentabilidad relativa de cada tratamiento; valores superiores a 1 reflejan un retorno económico favorable, y su aplicación es habitual en análisis de eficiencia agronómica y económica.

3.8.Procedimiento estadístico

Se efectuó un análisis de varianza (ANOVA) factorial intergrupos para determinar si se presentan o no diferencias estadísticas significativas entre las distintas fuentes de nitrógeno en función de las variables de Masa de raíces por planta, Porcentaje de raíces funcionales por tratamientos, Hojas de planta madre y de Retorno, Altura del retorno, Fuste del retorno, pH, CE, Nitratos, Amonio, Calibre de mano apical, Longitud de dedos de mano apical y segunda mano, Número de manos del racimo, Número de dedos de segunda mano, Masa del racimo, previo efectuada la verificación y cumplimiento de los supuestos de normalidad de datos, homogeneidad de varianzas y aditividad Tratamientos-Bloques (Montgomery, 2019). Para verificar la normalidad de datos se aplicó la prueba de Shapiro-Wilk y en el caso de la homogeneidad de varianzas se utilizó la prueba de Levene, adecuada para validar la suposición de igualdad de varianzas entre grupos (Field, 2018). En los casos que cumplieron con los criterios paramétricos, se emplearon pruebas de rangos múltiples post hoc mediante el método de Duncan para conocer donde existen las diferencias o similitudes entre las distintas fuentes de nitrógeno (Gómez & Gómez, 1984). Cuando los datos no cumplieron los supuestos del modelo, se recurrió al análisis no paramétrico mediante la prueba de Kruskal-Wallis, útil para comparar tres o más grupos independientes (Sheskin, 2020).

Los datos de las variables relacionadas con el uso de fertilizantes se organizaron y procesaron en Microsoft Excel. En el caso de las variables químicas del suelo, se agruparon según las dos profundidades en las que se tomaron las muestras, El procesamiento estadístico de los datos se realizó con el software SPSS Statistics versión 26 de prueba para Windows, desarrollado por IBM (1968). Se utilizó una confiabilidad estimada del 95 % ($\alpha=0,05$).

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. Variables de desarrollo agronómico

La variable de la masa de raíces por planta, no se evidenció una diferencia estadísticamente significativa entre tratamientos (p -valor = 0,750). Sin embargo, se observó las fuentes con urea + inhibidor de nitrificación (53,5 g) y urea recubierta con azufre (52,0 g) registraron los valores más altos de masa radicular, mientras que el sulfato de amonio (39,7 g) y CAN + Ca + Mg (40,6 g) presentaron los valores más bajos (Tabla 3).

Aunque no se identificaron diferencias estadísticas en la masa de raíces entre tratamientos, se observó una tendencia clara: las fuentes nitrogenadas de liberación lenta o formuladas con inhibidores propiciaron una mayor acumulación de biomasa radicular. Este comportamiento puede atribuirse a la retención prolongada de amonio (NH_4^+) en el suelo, lo que mejora la disponibilidad del nitrógeno sin generar toxicidad y favorece un desarrollo más vigoroso y funcional del sistema radical. Esta tendencia se alinea con lo reportado por Wu et al. (2005), quienes demostraron que el uso exclusivo de nitrógeno en forma de nitrato, suministrado en concentraciones moderadas, promueve significativamente la formación de raíces sanas en plántulas de banano. En su estudio, la modificación del medio de cultivo con nitrato de potasio permitió obtener raíces más robustas y homogéneas, incrementando notablemente la proporción de plántulas aptas para ser aclimatadas. En conjunto, estos resultados evidencian que la eficacia de la fertilización nitrogenada no depende únicamente de la dosis aplicada, sino también de la forma química del nitrógeno y su dinámica de liberación en el suelo, factores que influyen directamente en la arquitectura y funcionalidad del sistema radical.

Los tratamientos evidencian que con inhibidores como el DMPP promovieron una mayor masa de raíces funcionales, lo cual podría estar relacionado con una disponibilidad más sostenida de NH_4^+ en la rizosfera. Este hallazgo está respaldado por investigaciones de El-Salhy et al. (2019) y por Baral et al. (2023), quienes encontraron que el nitrógeno aplicado en formas estables promueve una arquitectura radicular más densa, lo que favorece la absorción de agua y nutrientes. Además, Chávez-Díaz et al. (2022) reportaron que la mayor biomasa radical se relaciona con una mejor relación C/N, lo cual es más fácil de lograr con dosis ajustadas de N en formas de liberación lenta.

Por otro lado, la variable raíces funcionales sí mostró diferencias estadísticas significativas (p -valor = 0,033). Las fuentes de urea + inhibidor de nitrificación (0,51) destacó frente a la fuente con CAN + Ca + Mg (0,30), el cual presentó el menor valor. Esta diferencia podría explicarse por la mayor disponibilidad de nitrógeno en forma amoniacal en la rizosfera, facilitada por el uso de inhibidores como el DMPP. Según Matse et al. (2025), estos compuestos reducen la transformación de NH_4^+ a NO_3^- , evitando pérdidas por lixiviación y manteniendo una fuente estable de nitrógeno, lo que favorece la absorción por las raíces jóvenes y mejora el desarrollo del sistema radicular funcional.

En el estudio de Wu et al. (2005), se observó que la modificación del medio basal para excluir el amonio (NH_4^+) y proveer exclusivamente nitrato (NO_3^-) también promovió un sistema radicular más vigoroso y homogéneo. No obstante, cuando las proporciones de $\text{NH}_4^+:\text{NO}_3^-$ fueron equilibradas en una proporción óptima, se alcanzaron mayores porcentajes de plántulas con raíces calificadas, lo que reafirma que una fuente de nitrógeno controlada (como ocurre al usar inhibidores) mejora significativamente el desarrollo radicular.

Del mismo modo, la variable hojas de planta madre también evidenció diferencias estadísticas significativas (p -valor = 0,049), destacándose las fuentes con CAN + Ca + Mg (10,4 hojas) y urea recubierta con azufre (10,5 hojas), frente a la urea convencional, que registró el menor número de hojas (9,8).

En cuanto a las variables altura de retorno y fuste de retorno, no se detectaron diferencias estadísticas significativas entre fuentes de nitrógeno (p valor = 0,696 y p valor = 0,926). Esto sugiere que la aplicación de urea ya sea con o sin inhibidores, no generó efectos diferenciados sobre estas variables morfoestructurales de la planta, por lo que cualquiera de estas opciones resulta agronómicamente equivalente en este parámetro.

Tabla 3 Resumen de resultados estadísticos en variables de crecimiento evaluadas.

Fuentes de N	Masa de raíces (g)	Raíces funcionales (%)	Hojas de la planta madre	Altura del retorno (cm)	Fuste del retorno (cm)
CAN +Ca +Mg	40,6 a	0,30 a	10,4 b	241,8 a	73,9 a
Sulfato de amonio	39,7 a	0,50 b	10,0 ab	243,3 a	75,7 a
Urea + Recubrimiento de azufre	52,0 a	0,47 b	10,5 b	237,3 a	74,4 a
Urea	41,3 a	0,37 ab	9,8 a	239,4 a	75,3 a
Urea + Inh. Nitrificación	53,5 a	0,51 b	10,0 ab	234,1 a	74,1 a
Urea + Inh. Ureasa	42,4 a	0,44 ab	10,1 ab	240,8 a	75,3 a
p-valor	0,750NS	0,033*	0,049*	0,696NS	0,926NS
Promedio	44,92	0,43	10,16	239,22	74,75
Cv (%)	34,89	38,24	11,57	11,63	12,10

Letras distintas lado de los valores indican diferencias estadísticamente significativas entre tratamientos ($p < 0.05$, análisis post hoc de Duncan). Tratamientos que comparten la misma letra no presentan diferencias significativas entre sí.

NS, *, = (NS) no significancia, (*) significancia al 95%.

Por otro lado, los resultados de la variable hojas de retorno, demuestra que no existen diferencias estadísticas significativas entre las distintas fuentes de nitrógeno evaluadas (p -valor

=,317), dado que la línea pasa dentro de la caja (Figura 11). Esto indica que el número de hojas emitidas por el retorno no varió de forma significativa entre las distintas fuentes de nitrógeno, lo cual sugiere que esta variable no responde diferencialmente a la fuente de nitrógeno aplicada bajo las condiciones del experimento.

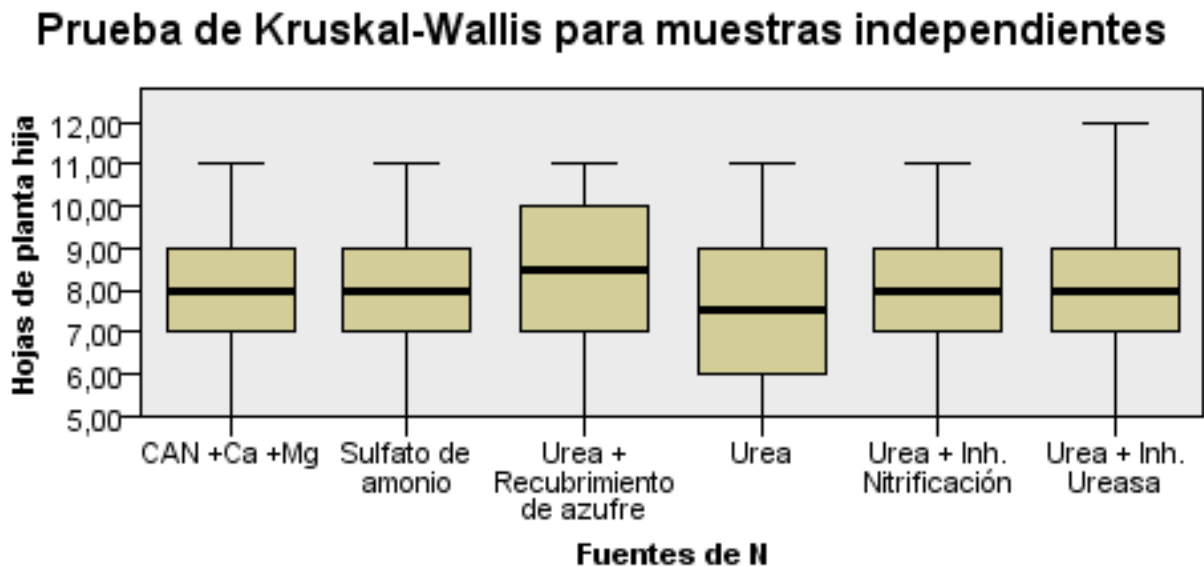


Figura 11 Prueba de Kruskal-Wallis

4.2. Variables químicas del suelo

4.2.1. pH del suelo

En la capa de 0–30 cm, se encontró diferencias estadísticamente significativas (p -valor = 0,043). Las mayores medias de pH se observaron con las fuentes de CAN + Ca + Mg (5,94) y urea + recubrimiento de azufre (5,94), mientras que la fuente con urea + inhibidor de ureasa presentó el valor más bajo (5,58) (Figura 12). Este comportamiento se explica por el efecto tamponante de las fuentes nitrogenadas que contienen calcio, magnesio o recubrimientos sulfurados, los cuales ayudan a moderar la acidez del suelo. Según Uzun et al. (2020), los fertilizantes estabilizados, como la urea con inhibidor de ureasa y las formulaciones con azufre, reducen la hidrólisis rápida

de la urea y controlan la liberación de protones, lo que contribuye a mantener un pH más estable en la rizosfera y mejora las condiciones para el desarrollo radical.

Por otro lado, a 30–60 cm de profundidad, el ANOVA no arrojó diferencias estadísticas significativas ($p\text{-valor} = 0,842$). Aun así, se identificaron diferencias numéricas entre distintas fuentes de nitrógeno, destacando urea + inhibidor de nitrificación (6,03), urea + recubrimiento de azufre (6,00) y CAN + Ca + Mg (5,91) con mayor valor de pH. El valor más bajo fue registrado por urea convencional (5,86). La tendencia observada en esta capa sugiere que los tratamientos con inhibidores de nitrificación y recubrimientos especiales contribuyen a mantener un pH más estable, incluso en profundidad. Esto se debe a que dichas formulaciones prolongan la permanencia del nitrógeno en forma amoniacal, lo que reduce la acidificación derivada de la conversión a nitrato. Uzun et al. (2020) explican que fertilizantes como el DMPP disminuyen la liberación de protones durante el proceso de nitrificación, estabilizando el pH del suelo y mejorando la eficiencia del uso del nitrógeno en condiciones edáficas más exigentes.

En el estudio, el pH del suelo disminuyó con el uso de urea convencional y sulfato de amonio, evidenciando un efecto acidificante, mientras que tratamientos como CAN + Ca + Mg y urea recubierta con azufre ayudaron a mantener un pH más estable. Esto se debe a que las fuentes amoniacales liberan protones durante la nitrificación, acidificando el suelo (Sun et al., 2020), mientras que el CAN aporta cationes básicos como Ca^{2+} y Mg^{2+} que neutralizan la acidez. Además, el uso de fertilizantes orgánicos o biofertilizantes mejora la capacidad tampón del suelo, reduciendo la variación del pH (Gouda et al., 2021).

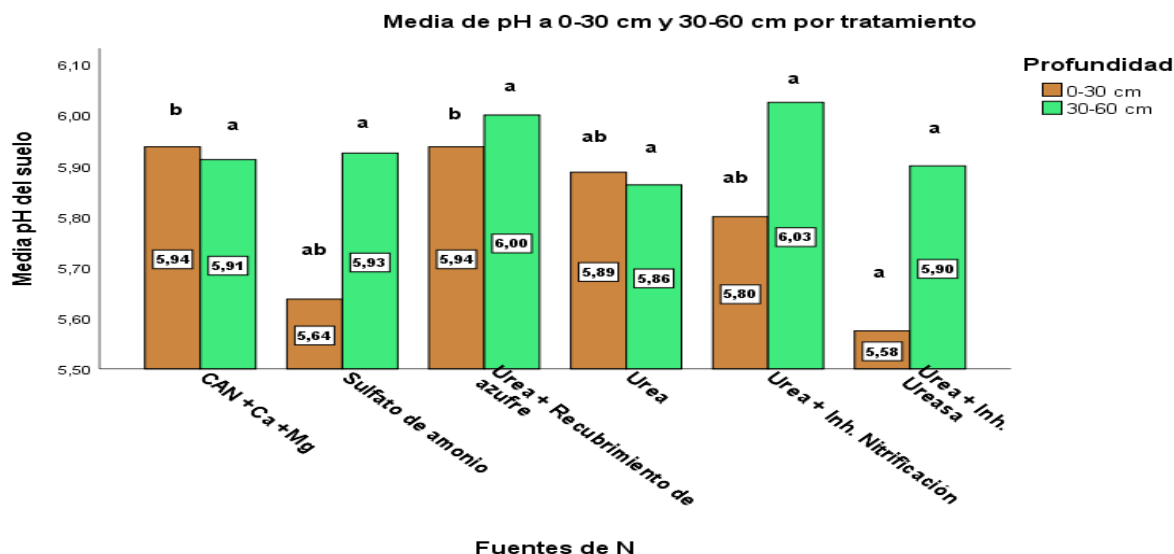


Figura 12 Medias de pH por tratamiento

Letras distintas sobre las barras indican diferencias estadísticamente significativas entre tratamientos ($p < 0.05$, análisis post hoc de Duncan). Tratamientos que comparten la misma letra no presentan diferencias significativas entre sí.

4.2.2. Conductividad eléctrica (C.E.)

Los resultados indican que entre 0-30 cm hay diferencia estadística significativa (p -valor = ,015). El sulfato de amonio mostró el valor más alto de CE ($0,65 \text{ mS cm}^{-1}$), mientras que CAN + Ca + Mg fue el más bajo ($0,39 \text{ mS cm}^{-1}$). La CE refleja la acumulación de sales solubles en el suelo (Figura 13). El incremento de la CE en la capa superficial se asocia al uso de fertilizantes con azufre y formas amoniales como el sulfato de amonio, debido a su alta solubilidad y liberación de iones en el suelo. Uzun et al. (2020) señalan que estas fuentes pueden modificar la química del suelo al aumentar la concentración de sales solubles, lo que explica los valores más elevados de CE observados en estos tratamientos.

Mientras que a profundidades entre 30-60 cm encontraron diferencias estadísticas significativas (p -valor = 0,002). En la Figura 13 se muestra que la CE más alta fue con sulfato de amonio ($0,39 \text{ mS cm}^{-1}$) y la más baja con CAN + Ca + Mg ($0,25 \text{ mS cm}^{-1}$). Esta distribución

sugiere lixiviación de sales a mayor profundidad, probablemente por la forma amoniacal del fertilizante y condiciones de riego.

La mayor CE en profundidad puede explicarse por la mayor movilidad del nitrógeno en forma amoniacal, que favorece la lixiviación de sales. Según Uzun et al. (2020), el uso de fertilizantes sin inhibidores intensifica estos procesos, mientras que las formulaciones estabilizadas reducen la movilidad de los iones, minimizando su impacto sobre la química del suelo.

Se observó un incremento en la conductividad eléctrica en tratamientos con sulfato de amonio, indicando una acumulación de sales. Este comportamiento ya fue documentado por Sun et al. (2020), quienes observaron que altas dosis de nitrógeno, especialmente en forma de sales amoniacales, inducen desequilibrios iónicos en el suelo, afectando su fertilidad. A pesar de no haberse detectado diferencias estadísticas significativas en algunos casos, el patrón observado sugiere que el uso prolongado de fuentes con alta carga salina puede representar un riesgo para la sostenibilidad del sistema productivo.

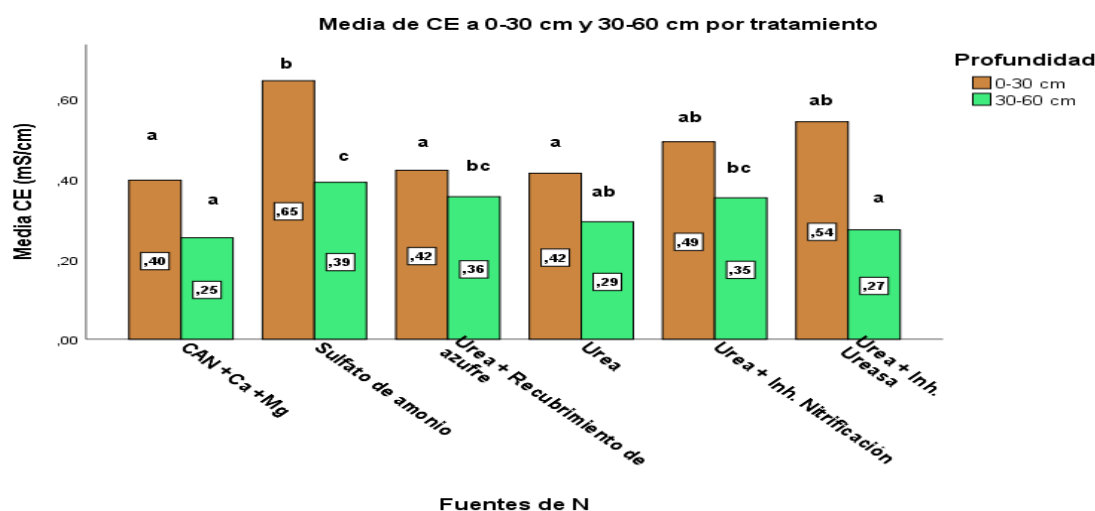


Figura 13 Media de CE por tratamiento

Letras distintas sobre las barras indican diferencias estadísticamente significativas entre tratamientos ($p < 0.05$, análisis post hoc de Duncan). Tratamientos que comparten la misma letra no presentan diferencias significativas entre sí.

4.2.3. Concentración de Nitrato del suelo

El análisis de varianza (ANOVA) aplicado al contenido de nitrato (NO_3^-) en el suelo no mostró diferencias estadísticas significativas entre las diferentes fuentes de nitrógeno (p -valor = 0,333 y p -valor = 0,492) en las dos profundidades evaluadas (0–30 cm y 30–60 cm).

Sin embargo, como se observa en la Figura 14, se identificaron diferencias prácticas relevantes en la concentración de NO_3^- entre tratamientos y profundidades. La urea recubierta con azufre y urea con inhibidores de nitrificación presentaron valores medios más elevados en ambas capas del suelo, lo que sugiere una liberación más sostenida del nitrógeno y menor volatilización o pérdida rápida.

Además, se evidenció una tendencia general de mayor acumulación de NO_3^- en la profundidad de 30–60 cm en comparación con los 0–30 cm. Esta distribución puede estar relacionada con procesos de lixiviación descendente de nitrato, particularmente en tratamientos con fuentes de nitrógeno más solubles como la urea convencional.

Las diferencias observadas en la concentración de nitratos en el perfil del suelo se relacionan estrechamente con el tipo de fuente nitrogenada utilizada y la presencia de inhibidores de nitrificación. Según Dhakar et al. (2015), los fertilizantes tratados con inhibidores como el DCD o meliaccinas reducen la velocidad de conversión del amonio a nitrato, lo que disminuye el riesgo de lixiviación de NO_3^- hacia capas profundas. En suelos tratados con fertilizantes sin inhibidores, se observa una rápida nitrificación, lo que incrementa la concentración de nitrato en la solución del suelo y facilita su movimiento vertical. En cambio, cuando se aplican inhibidores, el nitrato permanece más tiempo en la capa superficial (0–30 cm), mejorando la eficiencia del uso del nitrógeno y reduciendo pérdidas por lixiviación.

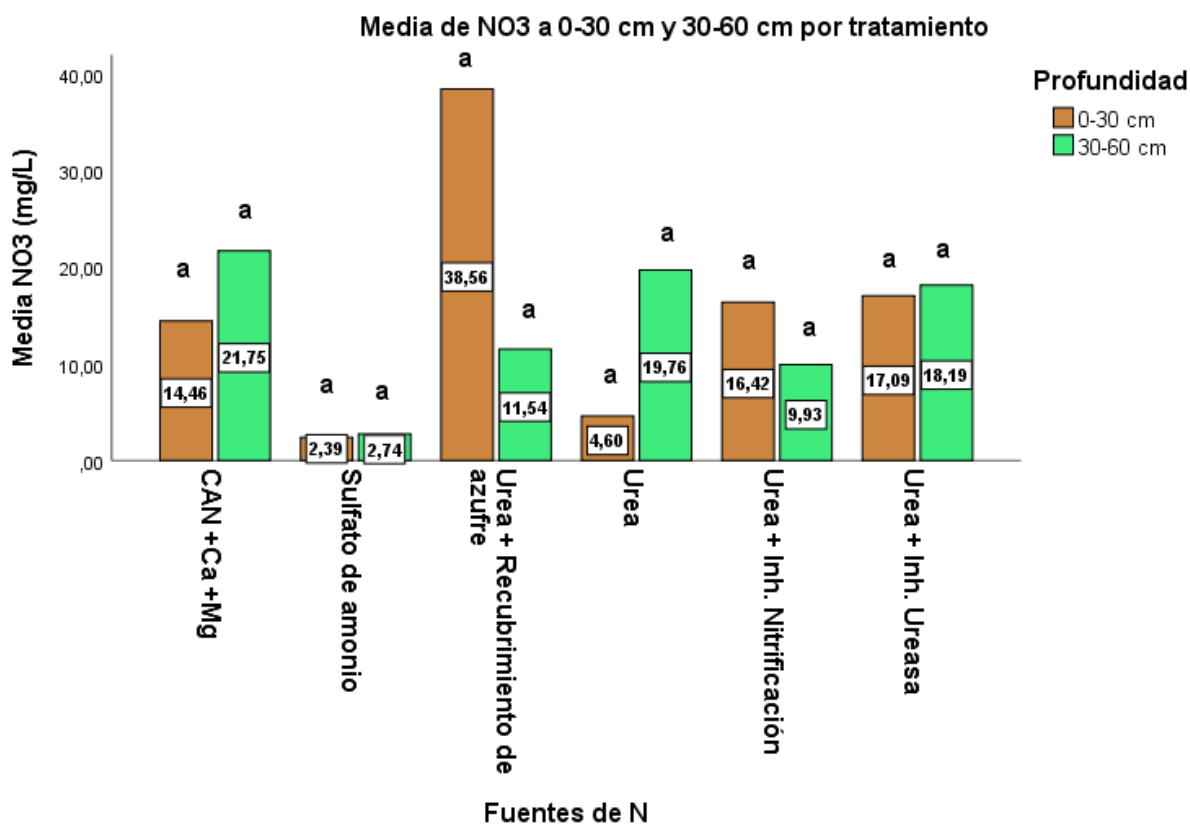


Figura 14 Media de NO₃⁻ por tratamiento

Letras distintas sobre las barras indican diferencias estadísticamente significativas entre tratamientos ($p < 0.05$, análisis post hoc de Duncan). Tratamientos que comparten la misma letra no presentan diferencias significativas entre sí.

4.2.4. Concentración de Amonio del suelo

Igual fue evaluado a dos profundidades y en ninguno de los casos se encontraron diferencias estadísticas significativas (p -valor = 0,364 y p -valor = 0,423 respectivamente), pero las medias ofrecen información útil para la interpretación agronómica.

En la Figura 15, se indica que a 0–30 cm, las mayores concentraciones de NH₄⁺ se encontraron en la fuente de sulfato de amonio (0,85 mg L⁻¹) y urea + inh. de ureasa (0,84 mg L⁻¹). Este comportamiento puede explicarse porque el sulfato de amonio suministra directamente

nitrógeno en forma amoniacal (NH_4^+), lo que incrementa su concentración en el suelo tras la aplicación. Por otro lado, el uso de inhibidores de ureasa, como NBPT, ralentiza la hidrólisis de la urea, retrasando su conversión a NH_4^+ y prolongando su disponibilidad en el tiempo. Este efecto contribuye a mantener niveles estables de amonio en el perfil superficial, mejorando su aprovechamiento por el cultivo (Uzun et al., 2020).

A 30–60 cm, aunque no hubo diferencias estadísticas, los valores de NH_4^+ fueron ligeramente menores en general. La mayor media se observó que el sulfato de amonio ($0,54 \text{ mg L}^{-1}$) y la menor con CAN + Ca + Mg ($0,25 \text{ mg L}^{-1}$). La menor presencia de amonio en profundidad se relaciona con su escasa movilidad en el perfil del suelo, ya que este ion tiende a ser retenido por adsorción en la fracción coloidal del suelo, especialmente en partículas arcillosas y materia orgánica. Esta característica limita su desplazamiento vertical, favoreciendo su acumulación en la capa superficial donde fue aplicado (Uzun et al., 2020).

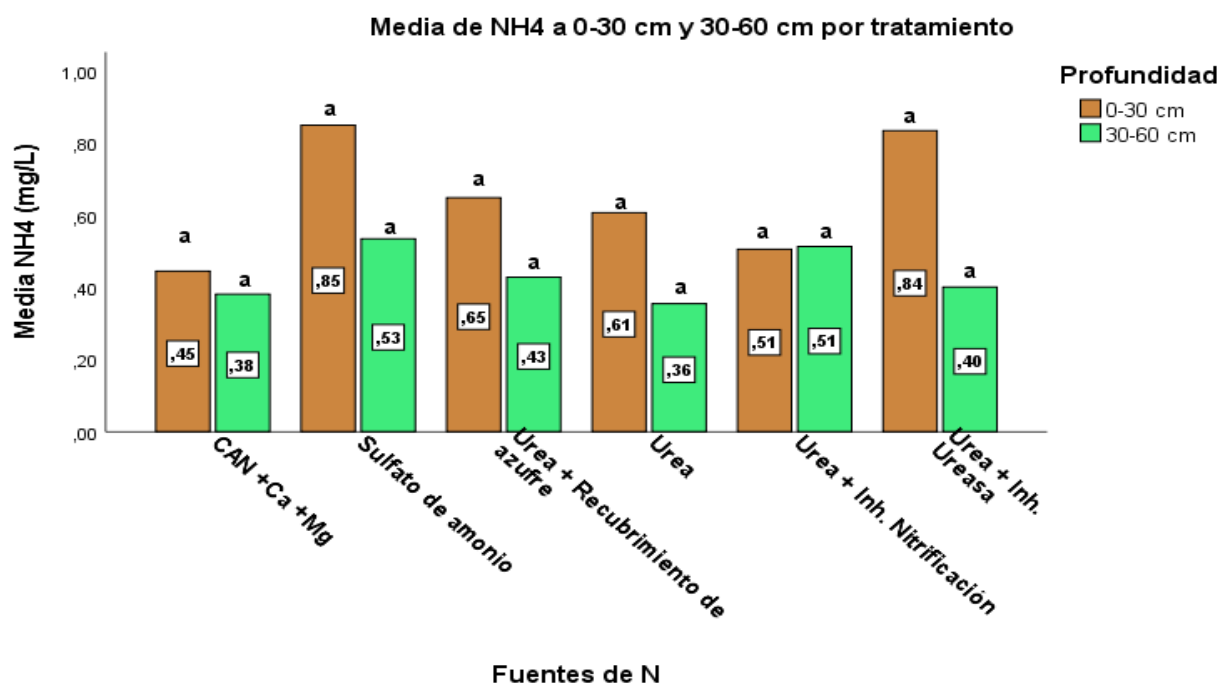


Figura 15 Media de NH₄⁺ por tratamiento

Letras distintas sobre las barras indican diferencias estadísticamente significativas entre tratamientos ($p < 0.05$, análisis post hoc de Duncan). Tratamientos que comparten la misma letra no presentan diferencias significativas entre sí.

4.3. Variables de rendimiento productivo

En la Tabla 4 se muestran que las variables longitud de segunda mano y dedos de segunda mano, no existió diferencia significativa (p -valor = 0,294 y p -valor = 0,996 respectivamente), sin embargo, en la longitud de mano apical, la fuente con CAN + Ca + Mg (27,35 cm) mostró la mayor longitud, mientras que urea + inhibidor de ureasa (26,73 cm) tuvo la menor. Por otro lado, en la variable de dedos de segunda mano, la fuente con mayor número de dedos fue urea + recubrimiento de azufre (19,58), mientras la urea (19,25) tuvo menor.

En la variable longitud de mano apical existe diferencia significativa (p -valor = 0,016), la mayor longitud se observó en urea + inhibidor de nitrificación (22,76 cm), seguido de CAN + Ca

+ Mg (22,68 cm), mientras que los menores valores correspondieron a urea recubierta con azufre (21,98 cm) y urea convencional (22,26 cm).

Tabla 4 Resumen de resultados estadísticos en variables de rendimiento productivo evaluadas.

Fuentes de N	Longitud de segunda mano (cm)	Longitud de mano apical (cm)	Dedos de segunda mano
CAN +Ca +Mg	27,35 a	22,68 b	19,50 a
Sulfato de amonio	27,02 a	22,55 b	19,41 a
Urea + Recubrimiento de azufre	26,87 a	21,98 a	19,58 a
Urea	27,06 a	22,26 ab	19,25 a
Urea + Inh. Nitrificación	27,18 a	22,76 b	19,27 a
Urea + Inh. Ureasa	26,73 a	22,45 ab	19,41 a
p-valor	0,294NS	0,016*	0,996NS
Promedio	27,04	22,45	19,40
CV (%)	0,81	1,28	0,66

Letras distintas lado de los valores barras indican diferencias estadísticamente significativas entre tratamientos ($p < 0.05$, análisis post hoc de Duncan). Tratamientos que comparten la misma letra no presentan diferencias significativas entre sí.

NS, *, = (NS) no significancia, (*) significancia al 95%.

Por otro lado, los resultados del ANOVA de calibre de mano apical mostraron que no existen diferencias estadísticas significativas entre las fuentes de nitrógeno utilizadas (p -valor = 0,331) para esta variable (Figura 16). No obstante, se identificaron diferencias numéricas entre las fuentes. La urea convencional presentó la mayor media de calibre (40,96 pulgadas), mientras que el CAN + Ca + Mg obtuvo la media más baja (40,05 pulgadas).

Aunque estas diferencias no son estadísticamente significativas, podrían tener cierta relevancia práctica en función del objetivo comercial del cultivo, especialmente en mercados que exigen tamaños uniformes o mayores calibres para mejorar la clasificación y valor del racimo.

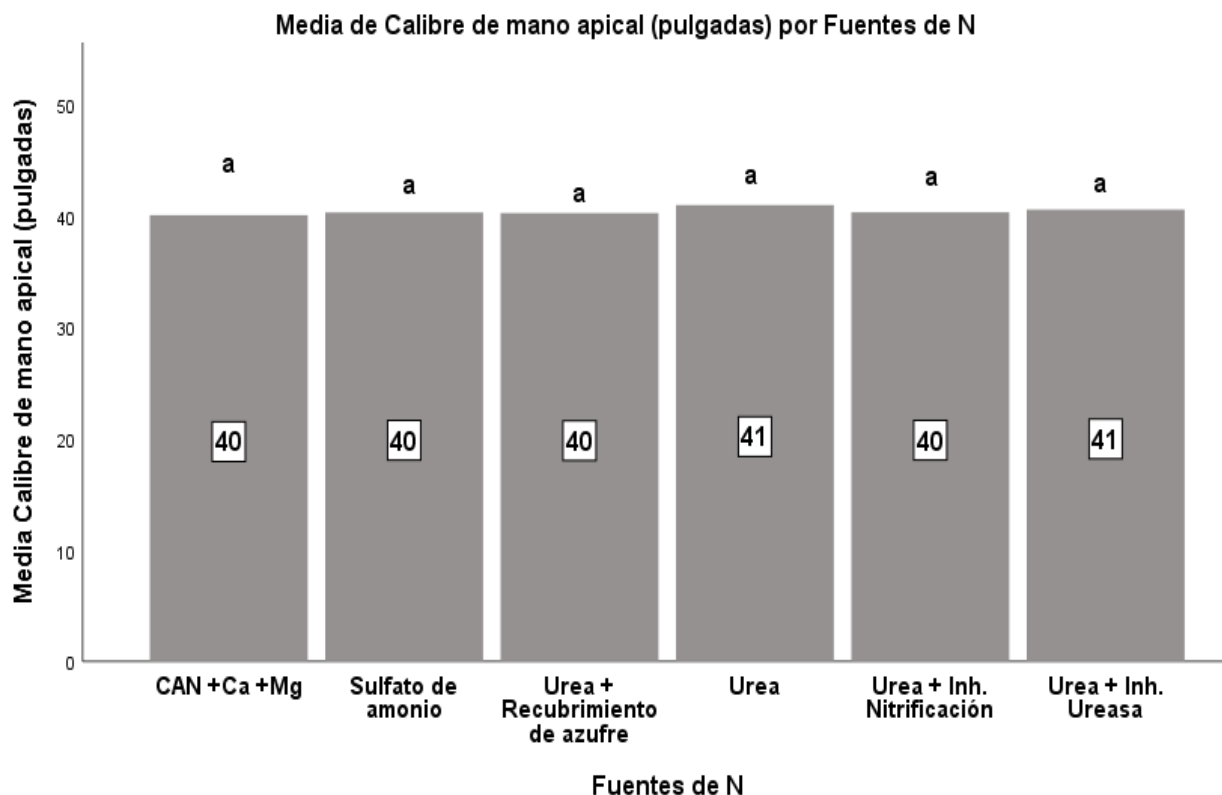


Figura 16 Media de Calibre de mano apical

Letras distintas sobre las barras indican diferencias estadísticamente significativas entre tratamientos ($p < 0.05$, análisis post hoc de Duncan). Tratamientos que comparten la misma letra no presentan diferencias significativas entre sí.

En la masa del racimo el análisis de varianza (ANOVA) mostró diferencias estadísticas significativas entre distintas fuentes de nitrógeno (p -valor = 0,001). La urea + inhibidor de nitrificación (73,04 lb) y urea recubierta con azufre (73,32 lb) presentaron las mayores masas de racimo, superando significativamente a la urea convencional (60,25 lb) y al sulfato de amonio (66,54 lb) (Figura 17).

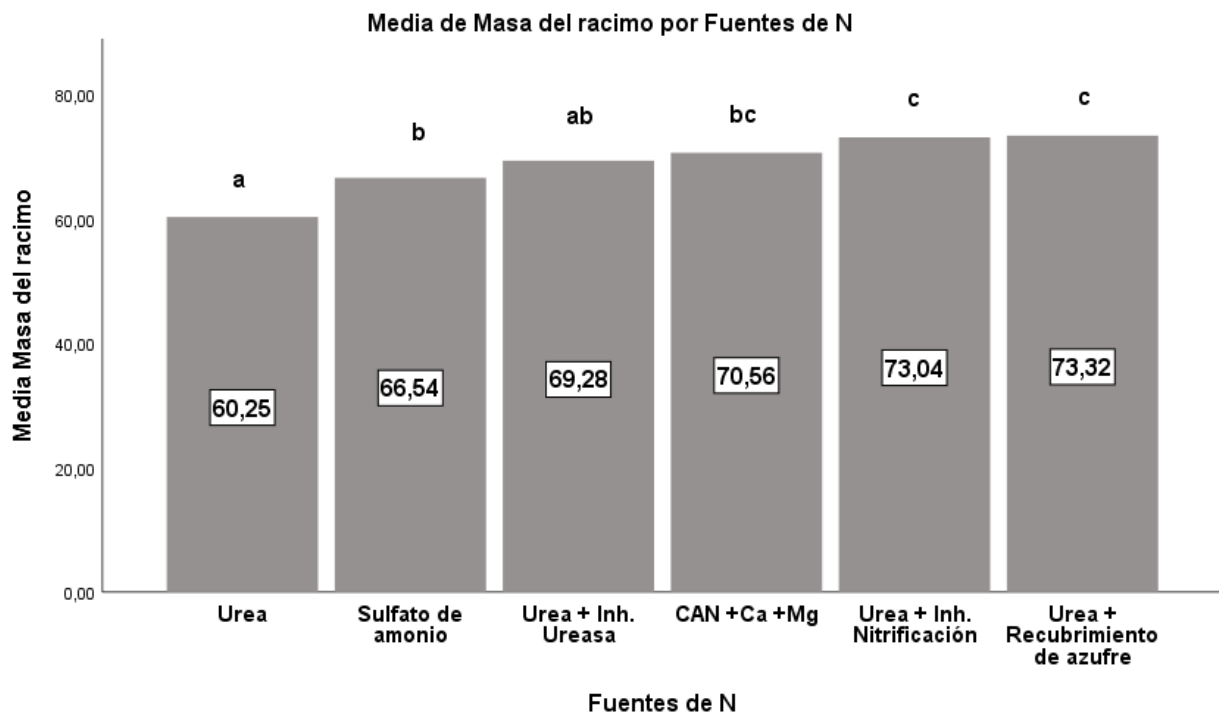


Figura 17 Media de masa del racimo

Letras distintas sobre las barras indican diferencias estadísticamente significativas entre tratamientos ($p < 0.05$, análisis post hoc de Duncan). Tratamientos que comparten la misma letra no presentan diferencias significativas entre sí.

En cuanto a la variable manos por racimos, los resultados obtenidos indicaron que no existen diferencias estadísticas significativas entre las fuentes de nitrógeno evaluadas (p -valor = 0,171), ya que, como se observa en la (Figura 18), la línea media pasa dentro de la caja. A pesar de la variabilidad observada en los diagramas de caja, especialmente en la urea recubierta con azufre, el análisis global no permitió establecer diferencias consistentes entre grupos.

Estos resultados sugieren que, bajo las condiciones del presente estudio, el tipo de fertilizante nitrogenado no tuvo un efecto significativo sobre el número de manos por racimo, al menos en términos estadísticos. No obstante, la dispersión de los datos observada visualmente podría ser objeto de mayor investigación si se incrementa el tamaño muestral o se segmenta el análisis por condiciones agronómicas específicas.

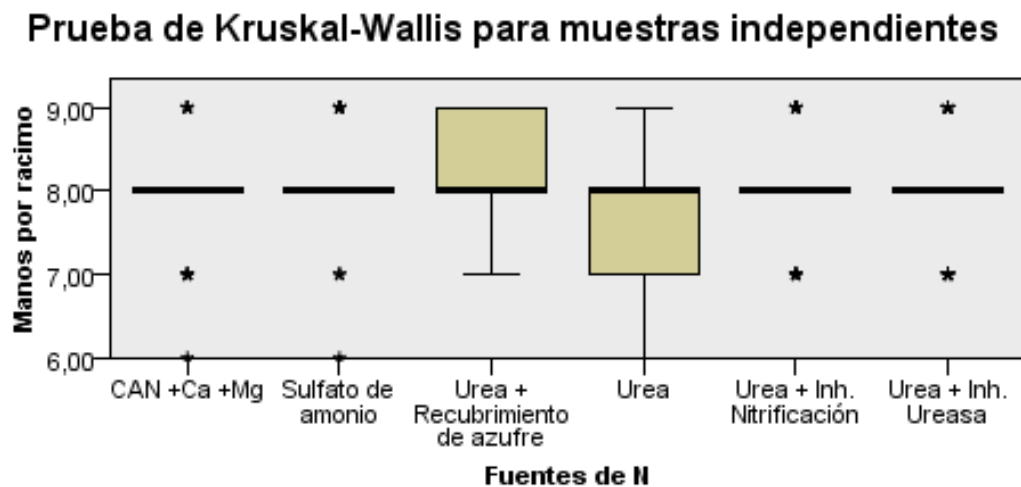


Figura 18 Pruebas de Kruskal - Wallis

4.4. Variables de eficiencia del uso del fertilizante

Se analizaron variables económicas como la producción promedio de racimo por planta (lb), ingreso bruto, costo del fertilizante, beneficio neto (Tabla 5) y la relación beneficio/costo (B/C) (Figura 19).

Tabla 5 Resumen de resultados estadísticos en variables de uso eficiente del fertilizante evaluadas.

Fuentes de N	Producción Promedio (lb)	Ingreso bruto promedio (\$)	Costo de fertilizante promedio (\$)	Ingreso neto promedio (\$)
CAN +Ca +Mg	70,55	2046,15	155,27	1890,88
Sulfato de amonio	66,53	1264,22	99,19	1165,03
Urea + Recubrimiento de azufre	73,31	2712,744	192,97	2519,77
Urea	60,24	1566,35	135,71	1430,64
Urea + Inh. Nitrificación	73,04	4820,64	343,95	4476,69
Urea + Inh. Ureasa	69,28	1801,30	135,97	1665,32

En el beneficio/costo se identificó diferencias estadísticas significativas (p valor = 0,0047). La fuente de Urea + Recubrimiento de azufre alcanzo mayor beneficio (13,06), superando significativamente a la urea convencional que obtuvo el menor beneficio (10,54). Estos resultados indican que, aunque la urea convencional tiene un menor costo unitario, no generó un beneficio económico competitivo. En contraste, la Urea + Recubrimiento de azufre, pese a su mayor precio, demostró ser más rentable al proporcionar un retorno económico superior para el cultivo.

Ambas variables mostraron una mejora consistente en los tratamientos con urea + DMPP y SCU. Esto puede explicarse por la mayor eficiencia de absorción de nitrógeno en momentos clave del desarrollo vegetativo. De acuerdo con Gouda et al. (2021), las fuentes nitrogenadas integradas (mineral + orgánico + biofertilizantes) promueven un crecimiento más equilibrado y sostenido de la biomasa aérea, incrementando la altura del pseudotallo y el diámetro del mismo. Esta mejora en la morfología estructural de la planta permite una mayor área fotosintética, lo que repercute positivamente en el rendimiento.

La aplicación de urea con inhibidor de nitrificación (DMPP) y SCU presentó las mejores relaciones B/C, lo cual es coherente con la tendencia reportada por Rashid et al. (2025), quienes argumentan que, a pesar del mayor costo inicial de los fertilizantes estabilizados, su efecto en la mejora de la eficiencia y el rendimiento justifica la inversión. Además, Gouda et al. (2021) demostraron que la integración de fuentes reduce los costos ambientales y mejora la calidad de los frutos, lo que representa un valor añadido para mercados más exigentes.

Los resultados de este estudio, se observó que el mayor peso promedio del racimo se alcanzó con la aplicación de urea recubierta con azufre y urea con DMPP, superando significativamente al tratamiento con urea convencional. Este resultado se alinea con lo reportado por Sun et al. (2020), quienes señalaron que tasas moderadas de N (352 g/planta) mejoran la

eficiencia del uso del nitrógeno (EUN) sin comprometer la productividad, debido a un mejor balance entre nitrógeno disponible y fisiología de la planta. Adicionalmente, Gouda et al. (2021) demostraron que la combinación de fuentes minerales, orgánicas y biofertilizantes incrementa significativamente el peso del racimo en banano Williams, resaltando la importancia de una fertilización integral y no exclusivamente química.

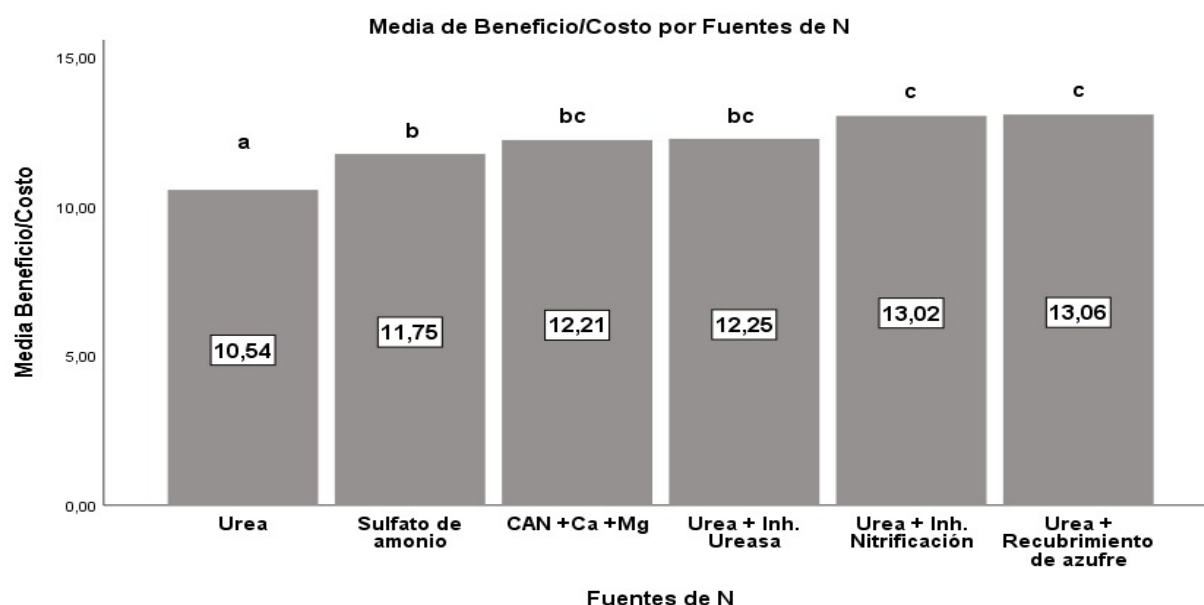


Figura 19 Media de Beneficio/Costo por Fuentes de N

Letras distintas sobre las barras indican diferencias estadísticamente significativas entre tratamientos ($p < 0.05$, análisis post hoc de Duncan). Tratamientos que comparten la misma letra no presentan diferencias significativas entre sí.

- **Fuente de CAN + Ca + Mg**

Esta fuente mostró una producción promedio de 70,56 lb por planta y un ingreso bruto de \$2046,15. El costo medio del fertilizante fue de \$155,27, resultando en un beneficio neto de \$1890,87. La relación B/C fue 12,21, lo que indica una excelente rentabilidad del fertilizante aplicado, aunque no fue el más alto en ingreso bruto.

- **Fuente de Sulfato de Amonio**

Tuvo la menor producción promedio (66,54 lb) y el ingreso bruto más bajo (\$1264,22), aunque también presentó el menor costo de fertilización (\$99,19). El beneficio neto fue de \$1165,03, con una B/C de 11,75. Esto sugiere que, aunque es rentable, su eficiencia económica es más limitada frente a otras fuentes.

- **Fuente de Urea recubierta con azufre**

La Urea recubierta con azufre logró una producción promedio alta (73,32 lb) y un ingreso bruto de \$2712,74. Con un costo de fertilizante de \$192,97, generó un beneficio neto de \$2519,77 y la relación B/C más alta (13,06), destacándose como la fuente de nitrógeno más eficiente en términos económicos.

- **Fuente de Urea convencional**

Presentó la producción más baja (60,24 lb) y un ingreso bruto medio de \$1566,35. Con un costo de fertilización de \$135,71, el beneficio neto fue de \$1430,64 y la relación B/C fue 10,54, la más baja de todas las fuentes, lo que evidencia menor eficiencia económica comparativa.

- **Fuente de Urea + Inhibidor de nitrificación (DMPP)**

Se mostró un excelente desempeño, con una producción promedio de 73,04 lb y el mayor ingreso bruto (\$4820,64). A pesar de tener el mayor costo de fertilización (\$343,95), obtuvo el beneficio neto más alto (\$4476,69) y una relación B/C de 13,02, muy similar a la urea recubierta. Esto evidencia el alto retorno del uso de inhibidores de nitrificación.

- **Fuente de Urea + Inhibidor de ureasa (NBPT)**

Con una producción promedio de 69,28 lb y un ingreso bruto de \$1801,30, tuvo un costo medio de \$135,97. Su beneficio neto fue de \$1665,32 y la relación B/C alcanzó 12,25, destacándose como una alternativa rentable, aunque ligeramente inferior a las demás fuentes con DMPP o azufre.

Las fuentes de liberación controlada o con inhibidores (Tratamientos 3, 5 y 6) presentaron los mejores resultados tanto en ingreso como en eficiencia económica ($B/C > 12$). En cambio, la urea convencional mostró el menor rendimiento económico, a pesar de tener un costo bajo. Esto confirma que la eficiencia en el uso del nitrógeno no solo depende del precio del fertilizante, sino también de su formulación y disponibilidad prolongada en el suelo.

5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1. Conclusiones

El estudio concluye que las fuentes de nitrógeno con inhibidores de nitrificación (DMPP) y recubrimiento de azufre (SCU) mejoraron las propiedades químicas del suelo al mantener un pH más estable y reducir la lixiviación de nutrientes. Aunque no todas las variables mostraron diferencias estadísticas, se evidenció una mejor retención de nitrógeno en el perfil del suelo y menor acumulación de sales en comparación con fertilizantes convencionales. Estas tecnologías representan una estrategia eficaz para conservar la fertilidad edáfica y optimizar la eficiencia del nitrógeno en el cultivo de banano.

Las fuentes de nitrógeno con inhibidores de nitrificación (DMPP) y urea recubierta con azufre (SCU) favorecieron los parámetros agronómicos del banano al registrar mayor masa de raíces, porcentaje de raíces funcionales y número de hojas activas en comparación con fertilizantes

convencionales. En cuanto al rendimiento productivo, estos tratamientos generaron racimos significativamente más pesados, con mejores características de longitud y calibre de fruto. Aunque no todas las variables presentaron diferencias estadísticas, se observó una tendencia clara hacia un desarrollo vegetativo más vigoroso y una mayor productividad en las plantas tratadas con fuentes que contiene inhibidores, evidenciando su eficacia para mejorar el desempeño agronómico del cultivo en condiciones tropicales.

El análisis económico evidenció que las fuentes nitrogenadas con tecnologías de liberación controlada, como la urea recubierta con azufre (SCU) y la urea con inhibidor de nitrificación (DMPP), fueron las más rentables al alcanzar las mayores relaciones beneficio/costo ($B/C > 13$), a pesar de su mayor costo inicial. Estas fuentes también generaron los ingresos netos más altos debido a su efecto positivo sobre el rendimiento del cultivo. En contraste, la urea convencional y el sulfato de amonio mostraron menor eficiencia económica. En suma, este estudio confirma que el uso racional de fertilizantes nitrogenados estabilizados permite mejorar la eficiencia en el uso del nitrógeno (EUN), conservar la calidad del suelo y elevar la productividad del cultivo, contribuyendo así a una fertilización más sostenible y rentable en el banano.

5.2.Recomendaciones

- Implementar el uso de fertilizantes con inhibidores de nitrificación o recubrimientos con azufre en programas de fertilización del cultivo de banano, especialmente en zonas con alta susceptibilidad a lixiviación o en suelos de textura franca a liviana.
- Monitorear periódicamente las formas disponibles de nitrógeno en el suelo (NH_4^+ y NO_3^-) a distintas profundidades para evaluar la eficiencia del fertilizante aplicado y prevenir pérdidas hacia capas profundas o aguas subterráneas.

- Considerar el análisis costo-beneficio al momento de seleccionar fuentes nitrogenadas. Aunque los fertilizantes estabilizados pueden tener un mayor precio por unidad, sus beneficios en términos de rendimiento, eficiencia y conservación del suelo justifican su inversión.
- Promover investigaciones complementarias a largo plazo que evalúen el efecto acumulativo del uso de estas tecnologías nitrogenadas sobre el microbiota del suelo, la dinámica del carbono y el rendimiento sostenible del cultivo.

6. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Agrocalidad. (s.f.). *Manual de aplicabilidad de buenas prácticas agrícolas de banano*. Agencia Ecuatoriana de Aseguramiento de la Calidad del Agro.
- Alcántara-Nazario, A. O., Sandoval-Villa, M., Alcántar-González, G., García-Esteva, A., & Peralta-Sánchez, M. G. (2023). Efecto de la relación nitrato:amonio en *Solanum nigrescens* Mart. & Gal. *Terra Latinoamericana*, 41, 1–12. <https://doi.org/10.28940/terra.v41i0.1786>
- Alotaibi, M. O., Alotibi, M. M., Eissa, M. A., & Ghoneim, A. M. (2022). Compost and plant growth-promoting bacteria enhanced steviol glycoside synthesis in stevia (*Stevia rebaudiana* Bertoni) plants by improving soil quality and regulating nitrogen uptake. *South African Journal of Botany*, 151, 306–314. <https://doi.org/10.1016/j.sajb.2022.10.010>
- Antošovský, J., Škarpa, P., & Ryant, P. (2025). The effect of nitrification inhibitor on the yield and quality of *Triticum aestivum* L. and *Brassica napus* L. *Field Crops Research*, 328, 109906. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2025.109906>
- Antošovský, J., Škarpa, P., & Ryant, P. (2024). The effect of nitrogen–sulphur fertilizer with nitrification inhibitor on winter wheat (*Triticum aestivum* L.) nutrition. *Heliyon*, 10(2), e33035. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e33035>
- Arteaga Alcívar, F. J. (2015). *Origen y evolución del banano*. Universidad Nacional de Colombia, Sede Palmira.
- Assa, B. G., Bhowmick, A., & Cholo, B. E. (2024). Assessing nitrate leaching and runoff coefficients in the dynamic interplay of seasonal crop biomass: A study of surface and groundwater nitrate contamination in the Bilate cropland watershed. *Environmental Advances*, 16, 100528. <https://doi.org/10.1016/j.envadv.2024.100528>
- Assa, B. G., Bhowmick, A., & Cholo, B. E. (2024). Modeling canopy water content in the assessment for rainfall induced surface and groundwater nitrate contamination: The Bilate cropland sub watershed. *Heliyon*, 10, e26717. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e26717>
- Baral, D., Shrestha, J., & Shrestha, S. (2023). *Effect of nitrogen fertilizer rates on growth, yield, and root development in banana (Musa spp.)*. *Journal of Agriculture and Natural Resources*, 6(1), 15–24. <https://doi.org/10.3126/janr.v6i1.53057>
- Barrera, C., Moreno, R., & Candanoza, E. (2009). Características morfológicas del banano. *Revista Técnica Agrícola*, 5(2), 56–63.
- Bernal-Monterrosa, M. Á., & Delgado-Bejarano, L. (2022). *Proyección de rendimiento usando variables productivas y diversos tipos de semilla de banano (Musa spp.) en Turbo-Colombia*. *Ciencia y Agricultura*, 19(3), 102–115. <https://doi.org/10.19053/01228420.v19.n3.2022.14706>

- Cando, C. (2019). *Efectos del trinchado de raíces de banano (Musa AAA) sobre la masa radical y la densidad poblacional de nemátodos*. Universidad Técnica De Babahoyo.
- Carletti, M., Barbera, E., Filippini, F., & Sforza, E. (2024). Effect of ammonium/nitrate ratio on microalgae continuous cultures: Species-specificity of nutrient uptake and modelling perspectives. *Journal of Water Process Engineering*, 58, 104762. <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2023.104762>
- Cedeño, M., Bravo, J., & Rivas, L. (2020). Estudio socioeconómico de los productores de banano orgánico, Cantón Milagro, Ecuador. *Revista Científica Mundo de la Investigación y el Conocimiento*, 4(1), 120–134. <https://doi.org/10.26820/recimundo/4.1.2020.120-134>
- Cervantes Alava, A. R., Sigcha Cañar, L., Villaseñor Ortiz, D., & Maldonado Mora, T. (2020). Efecto de la interacción del nitrógeno con el potasio sobre la intensidad de la clorofila en el cultivo del banano. *Revista Metropolitana de Ciencias Aplicadas*, 3(2), 192-198.
- Chávez-Díaz, L., Zambrano, M., & Cedeño, R. (2022). *Respuesta morfofisiológica de maíz a diferentes niveles de nitrógeno en suelos tropicales*. *Revista de Ciencias Agrícolas*, 39(3), 156–165. <https://doi.org/10.22267/rcia.223903.190>
- Chen, L. H., Ma, D. H., Liu, Z. P., Huo, Y. W., Wu, S. C., Chen, L., & Zhang, J. B. (2024). Continuous shallow groundwater decline and accidental extreme precipitation control the soil nitrate leaching of a well-irrigated area in the North China Plain. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 52, 101727. <https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2024.101727>
- Domingues Lima, J., Drominski, A. M., da Silva Rocha, C., Passos da Conceição, M., Gomes, E. N., & Rozane, D. E. (2021). Arrepollamiento de banano asociado a variaciones climáticas y nutricionales. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 12(3), 543–553.
- Dumagualla Arteaga, D. D. (2024). Evaluación de altura de corte del pseudotallo cosechado en el desarrollo del hijo descendiente en el cultivo de banano Cantón Balao-Guayas [Tesis de pregrado, Universidad Agraria del Ecuador].
- Dumes Herrera, V. R. (2023). *Efecto de tres niveles de nitrógeno en forma de drench en una plantación establecida en el cultivo de banano (Musa acuminata AAA)* [Trabajo de titulación, Universidad Agraria del Ecuador].
- Dhakar, M. K., Singh, A. K., Patel, V. B., Singh, S. K., Datta, S. P., Kumar, R., & Khanna, M. (2015). Effect of different nitrogen sources and nitrification inhibitors on soil nitrogen distribution in Kinnow orchard. *Indian Journal of Horticulture*, 72(2), 178–182. <https://doi.org/10.5958/0974-0112.2015.00035.3>
- Fageria, N. K., & Baligar, V. C. (2005). Enhancing nitrogen use efficiency in crop plants. *Advances in Agronomy*, 88, 97–185. [https://doi.org/10.1016/S0065-2113\(05\)88004-6](https://doi.org/10.1016/S0065-2113(05)88004-6)
- FAO. (2019). Manual para la evaluación agronómica de cultivos tropicales. Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura.

- FAO. (2023). Banana market review – Preliminary results 2023. Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación. <https://www.fao.org/3/cc9120en/cc9120en.pdf>
- Field, A. (2018). *Discovering statistics using IBM SPSS Statistics* (5th ed.). SAGE Publications.
- Galan, V., Rangel, A., Lopez, J., Perez, J. B., Sandoval, J., & Rocha, H. S. (2018). Propagación del banano: técnicas tradicionales, nuevas tecnologías e innovaciones. *Revista Brasileira de Fruticultura*, 40(4), e-574. <https://doi.org/10.1590/0100-29452018574>
- García-Guzmán, S. D., Morales Romero, S. C., Torres Bazurto, J., & Sánchez, J. D. (2021). Relationships between mineral nutrients in banana (*Musa AAA Simmonds* cv. Williams) bunches fertilized with nitrogen in two production cycles. *Agronomía Colombiana*, 39(2), 234-242.
- Gómez, K. A., & Gómez, A. A. (1984). *Statistical procedures for agricultural research* (2nd ed.). John Wiley & Sons.
- González, A., & Andrade, P. (2022). *Dependencia económica y social de la producción de banano orgánico en el sitio La Palestina, cantón El Guabo, periodo 2017–2020*. Universidad Técnica de Machala. <https://repositorio.utmachala.edu.ec/bitstream/48000/16612/1/TTUACA-2021-EA-DE00019.pdf>
- Gouda, F. E. M., Abdel-Raman, M. A. A., & Salem, E. H. (2021). *Effect of different nitrogen and potassium fertilizer sources on growth and productivity of Williams Banana plants*. *Journal of Plant Production*, 12(6), 613–617. <https://doi.org/10.21608/jpp.2021.70766.1026>
- Guato Fernández, L. F. (2021). *Efecto de fitohormonas sobre el crecimiento y desarrollo de yemas en banano (Musa AAA), en Balao, Guayas* [Tesis de pregrado, Universidad Agraria del Ecuador, Facultad de Ciencias Agrarias]. <https://cia.uagraria.edu.ec/Archivos/GUATO%20FERNANDEZ%20LUIS%20FERNANDO.pdf>
- Han, J., Schlingmann, M., Gasche, R., Garcia-Franco, N., Wiesmeier, M., Kiese, R., Ostler, U., Rennenberg, H., & Dannenmann, M. (2025). High importance of organic fertilizer nitrogen applied to temperate grassland for plant nitrogen uptake. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 389, 109653. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2025.109653>
- Hina, N. (2025). A comprehensive meta-analysis of nitrate leaching from wheat, rice, and maize cultivation. *Journal of Agriculture and Food Research*, 19, 101722. <https://doi.org/10.1016/j.jafr.2025.101722>
- Horneck, D. A., Ellsworth, J. W., Hopkins, B. G., & Sullivan, D. M. (2011). *Soil test interpretation guide* (EC1478). Oregon State University Extension Service. <https://catalog.extension.oregonstate.edu/ec1478>

- Huang, H., Liu, X., Shan, X., Yang, J., Ding, L., Zhang, R., ... & Niu, Z. (2025). Adding urease inhibitor into nitrogen fertilizer of hydrothermal aqueous phase decreases NH₃ volatilization. *Environmental Technology & Innovation*, 38, 104075. <https://doi.org/10.1016/j.eti.2025.104075>
- International Plant Nutrition Institute. (2012). 4R de la nutrición de plantas: Un manual para mejorar el manejo de la nutrición de plantas. Norcross, GA, EE. UU.: IPNI.
- Iriarte, A., Almeida, M. G., & Villalobos, P. (2014). Carbon footprint of premium quality export bananas: case study in Ecuador, the world's largest exporter. *Science of the total environment*, 472, 1082-1088.
- Jadán Sánchez, V. M., Belduma Pizarro, N. A., & Elizalde Orellana, M. V. (2024). *Evolución y proyección de la producción agrícola (Banano y Café) en Ecuador en el periodo 2012-2025* [Evolution and projection of agricultural production (Bananas and Coffee) in Ecuador in the period 2012-2025]. REVISTA INVECOM “Estudios transdisciplinarios en comunicación y sociedad”, 4(2). <https://www.revistainvecom.org>
- Jaramillo Dávalos, S. I. (2020). Manual de aplicabilidad de buenas prácticas agrícolas de banano. AGROCALIDAD.
- Kim, D. G., Saggar, S., & Roudier, P. (2012). The effect of nitrification inhibitors on soil ammonia emissions in nitrogen managed soils: a meta-analysis. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 93, 51-64.
- Larrea, C. M., Espinosa, M., & Charvet, P. S. (Eds.). (1987). *El banano en el Ecuador: Transnacionales, modernización y subdesarrollo* (Vol. 16). Corporación Editora Nacional.
- León Ajila, J. P., Espinosa Aguilar, M. A., Carvajal Romero, H. R., & Quezada Campoverde, J. (2023). Análisis de la producción y comercialización de banano en la provincia de El Oro. *Ciencia Latina Revista Científica Multidisciplinar*, 7(1), 7494–7507. https://doi.org/10.37811/cl_rcm.v7i1.4981
- Li, H., Gao, F., Wang, L., Sher, A., Ren, B., Zhao, B., Liu, P., & Zhang, J. (2025). Increasing soil organic matter and nitrogen use. *Journal of Integrative Agriculture*, 24(2025). <https://doi.org/10.1016/j.jia.2025.01.001>
- Liu, C., Mo, T., Zhong, J., Chen, H., Xu, H., Yang, X., & Li, Y. (2023). Synergistic benefits of lime and 3,4-dimethylpyrazole phosphate application to mitigate the nitrous oxide emissions from acidic soils. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 263, 115387. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2023.115387>
- MAG. (2020). Guía técnica para el muestreo y análisis de suelos agrícolas. Ministerio de Agricultura y Ganadería del Ecuador.
- Martínez Acosta, A. M., & Cayón Salinas, D. G. (2011). Dinámica del crecimiento y desarrollo del banano (Musa AAA Simmonds cvs. Gran Enano y Valery). *Revista Facultad Nacional*

- de Agronomía – Medellín*, 64(2), 6055–6064. Universidad Nacional de Colombia.
<http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=179922664003>
- Martínez, G., & Pérez, J. (2018). Evaluación de características físicas del racimo de banano (*Musa AAA*) en diferentes etapas de desarrollo. *Revista Cultivos Tropicales*, 39(1), 66–72.
<https://revistas.cultivostropicales.edu.co/index.php/cultivos/article/view/928/888>
- Matse, D. T., Krol, D. J., Richards, K. G., Danaher, M., Cummins, E., Wang, X., & Forrester, P. J. (2025). Fertiliser nitrogen source and the use of nitrification inhibitors are tools to reduce nitrous oxide emissions and improve agronomic performance in temperate grassland. *Environmental Technology & Innovation*, 39, 104232.
<https://doi.org/10.1016/j.eti.2025.104232>
- Meléndez Cerezo, J. E. (2021). *Fitohormonas promotoras en el crecimiento vegetal en la producción del cultivo de banano* [Tesis de pregrado, Universidad Técnica de Babahoyo].
- Miller, R. O., & Kotuby-Amacher, J. (1996). *Extractable ammonium and nitrate nitrogen*. In D. L. Sparks (Ed.), *Methods of soil analysis: Part 3—Chemical methods* (pp. 1201–1204). Soil Science Society of America. <https://doi.org/10.2136/sssabookser5.3.c41>
- Monge-Freile, M. F., Álvarez-Sánchez, A. R., Batista-Casaco, A. R., & Santana Alvarado, W. H. (2022). Necesidades hídricas del cultivo de banano (*Musa paradisiaca*) variedad Williams. *Ciencia y Tecnología UTEQ*, 15(2), 19–23. <https://doi.org/10.18779/cyt.v15i2.581>
- Montgomery, D. C. (2019). *Design and analysis of experiments* (10th ed.). Wiley.
- Murphy, D. J., Dillon, P., O’ Donovan, M., Shalloo, L., & Ruelle, E. (2024). Nitrate leaching on Irish grassland dairy farms. *European Journal of Agronomy*, 153, 127042.
<https://doi.org/10.1016/j.eja.2023.127042>
- Mustafa, A., Athar, F., Khan, I., Chattha, M. U., Nawaz, M., Shah, A. N., Mahmood, A., Batool, M., Aslam, M. T., Jaremko, M., Abdelsalam, N. R., Ghareeb, R. Y., & Hassan, M. U. (2022). Improving crop productivity and nitrogen use efficiency using sulfur and zinc-coated urea: A review. *Frontiers in Plant Science*, 13, 942384.
<https://doi.org/10.3389/fpls.2022.942384>
- Myers, F., Russel, D. A., & Young, R. D. (1979). Sulfur-coated urea (Circular Z-102). Tennessee Valley Authority, National Fertilizer Development Center.
<https://books.google.com.ec/books?id=yQgTELdqv5UC&hl=es>
- Orozco-Romero, J., & Pérez-Zamora, O. (2006). Tensión de humedad del suelo y fertilización nitrogenada en plátano (*Musa AAA Simmonds*) cv. Gran Enano. *Agrociencia*, 40(2), 149–162. <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=30240201>
- Papadopoulou, E. S., Bachtsevani, E., Katsoula, A., Charami, C., Lampronikou, E., Vasileiadis, S., & Karpouzias, D. G. (2024). Nitrification inhibitors impose distinct effects. *Applied Soil Ecology*, 199, 105417. <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2024.105417>

- Pineda Ramón, J. S. (2021). *Evaluación de diferentes métodos de aplicación de fungicidas y extractos botánicos para el control de pudrición de corona de banano* [Tesis de pregrado, Universidad Técnica de Machala]. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.15190.78402>
- Quijano, A., & Arévalo, A. (2015). Evaluación de variables morfológicas y productivas del banano en sistemas de cultivo intensivo. *Revista Agronomía Costarricense*, 39(2), 47–55. <https://www.revistas.ucr.ac.cr/index.php/agro/article/view/21024/20680>
- Quiñonez Bermello, M. C. (2020) Evaluación de mezcla física: fertilizante químico con enmiendas edáficas en el cultivo de banano (musa x paradisiaca l.) (trabajo de titulación). UTMACH, Unidad Académica de Ciencias Agropecuarias, Machala, Ecuador.
- Ramírez, D., & León, S. (2022). Análisis económico del banano en el Ecuador. *Revista Investigo*, 2(1), 33–45.
- Ramírez Argoti, D. F., & Rosado Calero, A. G. (2024). Efecto de distintos niveles de fertilización mineral en el comportamiento agronómico del banano. *Universidad Técnica de Cotopaxi*.
- Rashid, M. A., Duan, Y. F., Lesschen, J. P., Groenendijk, P., Bruun, S., & Jensen, L. S. (2025). Evaluating the performance of biobased fertilizers. *Farming System*, 3, 100141. <https://doi.org/10.1016/j.farsys.2025.100141>
- Rashid, A., Maqbool, M. M., Shahzad, M., & Irshad, M. (2025). *Economic analysis of enhanced-efficiency nitrogen fertilizers in banana cultivation under tropical conditions*. *Agricultural Economics Review*, 46(2), 98–106
- Robinson, J. C., & Galán Saúco, V. (2010). *Bananas and Plantains* (2nd ed.). CABI Publishing. <https://doi.org/10.1079/9781845936587.0000>
- Roman Britez, P. A., Rasche Alvarez, J. W., & Fatecha Fois, D. A. (2023). Fertilización nitrógenada y potásica en el cultivo del banano. *Revista Científica de la UCSA*, 10(2), 3–13. <https://doi.org/10.18004/ucsa/2409-8752/2023.010.02.003>
- Rojo, M. C., et al. (2023). Evaluation of different nitrogen sources on yeast performance. *Heliyon*, 9, e22608. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e22608>
- Santana Fernández, A. W. (2021). *Efecto de sustancias reguladoras de crecimiento en el desarrollo del racimo de banano (Musa acuminata) en la zona de Quevedo* [Tesis de pregrado, Universidad Técnica Estatal de Quevedo]. <https://repositorio.uteq.edu.ec/handle/43000/6517>
- Santos, M. R., Donato, S. L. R., Magalhães, D. B., & Cotrim, M. P. (2019). Precocity, yield and water-use efficiency. *Pesquisa Agropecuária Tropical*, 49, 1–10.
- Sarmiento Ramírez, H. P., & Cadme Arévalo, M. L. (2023). *Diagnóstico de los sistemas de producción y comercialización del cultivo de banano*. Ediciones GESICAP – Universidad Técnica Estatal de Quevedo.

- Simmonds, N. W. (1962). *The Evolution of the Bananas*. Longmans, Green and Co.
- Soto, J. (1985). *Estudios sobre el sistema radical del banano*. Universidad de Costa Rica.
- Sheskin, D. J. (2020). *Handbook of parametric and nonparametric statistical procedures* (6th ed.). CRC Press.
- Steiger, B. G. K., et al. (2024). Sustainable agro-waste pellets as fertilizer carriers. *RSC Sustainability*, 2, 2979–2988. <https://doi.org/10.1039/d4su00141a>
- Stoorvogel, J., & Mena, R. S. (2018). Nutrition and soil management in banana cultivation. In *Achieving sustainable cultivation of bananas: Cultivation techniques*. Burleigh Dodds Science Publishing Limited.
- Sun, J., Li, W., Li, C., Chang, W., Zhang, S., Zeng, Y., Zeng, C., & Peng, M. (2020). *Effect of different rates of nitrogen fertilization on crop yield, soil properties and leaf physiological attributes in banana under subtropical regions of China*. *Frontiers in Plant Science*, 11, 613760. <https://doi.org/10.3389/fpls.2020.613760>
- Sunling, Y., et al. (2024). Urease and nitrification inhibitors with fertigation strategies. *Agricultural Water Management*, 295, 108750. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2024.108750>
- Swafo, S. M., & Dlamini, P. E. (2023). Soil nutrient management zones for banana. *Land*, 12(9), 1651. <https://doi.org/10.3390/land12091651>
- Tao, J., et al. (2025). In situ visualization of soil profile acidification. *Geoderma*, 456, 117243. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2025.117243>
- Tariq, A., et al. (2025). Assessing nitrous oxide mitigation efficiency. *Environmental Technology & Innovation*, 37, 103952. <https://doi.org/10.1016/j.eti.2024.103952>
- Thomas, G. W. (1996). Soil pH and soil acidity. In D. L. Sparks (Ed.), *Methods of soil analysis: Part 3—Chemical methods* (pp. 475–490). Soil Science Society of America. <https://doi.org/10.2136/sssabookser5.3.c16>
- Torres Gómez, S. A. (2016). Efecto de fuentes nitrogenadas sobre el rendimiento y calidad. *Universidad Agraria del Ecuador*. <https://cia.uagraria.edu.ec/Archivos/TORRES%20GOMEZ%20SONIA%20AZUCENA.pdf>
- Torres-Bazurto, J., et al. (2019). Effect of fertilization on banana growth. *Revista Colombiana de Ciencias Hortícolas*, 13(1), 9–17. <https://doi.org/10.17584/rcch.2019v13i1.8440>
- Torres Bazurto, J., & Sánchez, D. (2024). *Efecto de dosis de nitrógeno sobre peso de racimo de banano y variables de crecimiento: Hacia uso eficiente del Nitrógeno*. *Acorbat Revista de Tecnología y Ciencia*, 1(1), 10–18. <https://doi.org/10.62498/ARTC.2410>
- Trenkel, M. E. (2010). *Slow- and Controlled-Release and Stabilized Fertilizers* (2nd ed.). International Fertilizer Industry Association.

- Triviño, C; Navia, D; Velasco, L. 2013. Guía para reconocer daño en raíces y métodos de muestreo y extracción de nemátodos en raíces y suelo. Yaguachi, Estación Experimental Litoral Sur «Dr. Enrique Ampuero Pareja». Boletín divulgativo 433. 17 p.
- Turner, D. W. (2003). Growth, development and yield of banana. In *Banana improvement: Cellular, molecular biology, and induced mutations* (pp. 51–65). FAO/IAEA. https://www-pub.iaea.org/MTCD/publications/PDF/te_1475_web.pdf
- Universidad Técnica de Machala. (2020). Efecto de fuentes y dosis de nitrógeno. *Producción Científica* Luz. <https://produccioncientificaluz.org/index.php/agronomia/article/view/26495/27121>
- Uwimana, B., et al. (2021). Effect of seasonal drought on banana genotypes. *Agronomy*, 11(1), 4. <https://doi.org/10.3390/agronomy11010004>
- Uzun, S., Özaktan, H., & Uzun, O. (2020). Effects of different nitrogen dose and sources as top-dressing on yield and silage quality attributes of silage maize. *Anais da Academia Brasileira de Ciências*, 92(Suppl. 1), e20190030. <https://doi.org/10.1590/0001-3765202020190030>
- Vaca, E., Gaibor, N., & Kovács, K. (2020). *Analysis of the chain of the banana industry of Ecuador and the European market*. *APSTRACT: Applied Studies in Agribusiness and Commerce*, 14(1-2), 57–65. <https://doi.org/10.19041/APSTRACT/2020/1-2/7>
- Valencia Morla, L. A. (2018). *Evaluación de técnicas de cirugía en el cultivo de banano (Musa spp.) para mejorar la calidad del racimo en la Hacienda Isabel II* [Tesis de pregrado, Universidad Técnica de Babahoyo]. <http://repositorio.utb.edu.ec/handle/49000/xxxx>
- Vargas Céspedes, A., Watler, W., Morales, M., & Vignola, R. (2017). Prácticas efectivas para la reducción de impactos por eventos climáticos en el cultivo de banano en Costa Rica. CATIE.
- Vásquez, R., & López, M. (2021). El banano ecuatoriano y su participación en el mercado internacional. *Revista REMCA*, 5(2), 70–85. <https://remca.umet.edu.ec>
- Verhulst, N., François, I., Grahmann, K., Cox, R., & Govaerts, B. (2015). Eficiencia del uso de nitrógeno y optimización de la fertilización nitrogenada en la agricultura de conservación.
- Wei, J., et al. (2020). Nitrogen fertilization strategies in ginseng. *Ecological Indicators*, 110, 105952. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2019.105952>
- Zhang, S.-q., et al. (2019). Urea with humic acid on maize yield. *Journal of Integrative Agriculture*, 18(3), 656–666. [https://doi.org/10.1016/S2095-3119\(18\)61950-1](https://doi.org/10.1016/S2095-3119(18)61950-1)
- Zhao, Y., et al. (2024). Nitrification inhibitor alleviates dissolution of soil inorganic carbon. *Geoderma*, 441, 116742. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0016706123004196>

- Zambrano, G., Vásquez, S., & Macías, A. (2022). Evaluación de dosis de nitrógeno en el rendimiento de banano (*Musa AAA*) en la provincia de El Oro, Ecuador. *Revista Ciencia y Agricultura*, 19(2), 45–53. <https://revistas.utm.edu.ec/index.php/CyA/article/view/3791>
- Wu, Y., Yi, G., Yang, H., Zhou, B., & Zeng, J. (2005). Basal medium with modified nitrogen source and other factors influence the rooting of banana. *HortScience*, 40(2), 428–430. <https://journals.ashs.org/hortsci/view/journals/hortsci/40/2/article-p428.xml>

7. ANEXOS



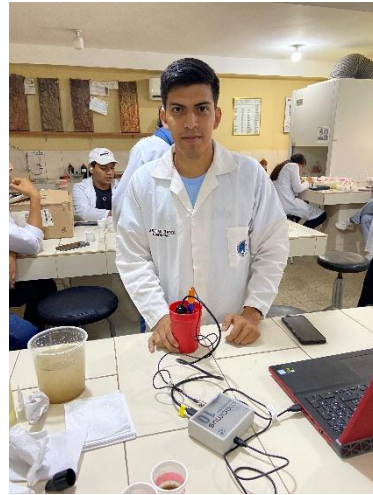
Pesaje y aplicación de los tratamientos



Distintas fuentes de Nitrógeno utilizadas



Toma de datos de desarrollo agronómico



Toma de datos de propiedades químicas



Toma de datos de rendimiento productivo