

**COMPORTAMIENTO DE ALGUNAS VARIABLES DE POSTCOSECHA Y RENDIMIENTO EN EL CULTIVO DE
PAPA A LA APLICACIÓN DE NANOFERTILIZANTES EN NARIÑO**

LEIDY CAROLINA MUÑOZ REINA
YASMIN JIMENA ROSERO GOMEZ

Proyecto de Trabajo de Grado presentado como requisito parcial para optar al título de Ingeniero
Agrónomo.

UNIVERSIDAD DE NARIÑO
FACULTAD DE CIENCIAS AGRICOLAS
PROGRAMA DE INGENIERIA AGRONÓMICA
SAN JUAN DE PASTO, COLOMBIA

2023

**COMPORTAMIENTO DE ALGUNAS VARIABLES DE POSTCOSECHA Y RENDIMIENTO EN EL CULTIVO DE
PAPA A LA APLICACIÓN DE NANOFERTILIZANTES EN NARIÑO**

LEIDY CAROLINA MUÑOZ REINA
YASMIN JIMENA ROSERO GOMEZ

Director
JAIRO HERNÁN MOSQUERA GUERRERO Ph. D

Proyecto de Trabajo de Grado presentado como requisito parcial para optar al título de Ingeniero
Agrónomo.

UNIVERSIDAD DE NARIÑO
FACULTAD DE CIENCIAS AGRICOLAS
PROGRAMA DE INGENIERIA AGRONÓMICA
SAN JUAN DE PASTO, COLOMBIA

2023

NOTA DE RESPONSABILIDAD

Las ideas y conclusiones aportadas en el siguiente trabajo son responsabilidad exclusiva del autor.

Artículo 1ro del Acuerdo No. 324 de octubre 11 de 1966 emanado del Honorable Consejo Directivo de la Universidad de Nariño

NOTA DE ACEPTACIÓN

PhD. Jairo Hernán Mosquera Guerrero
Firma del director del trabajo de grado

IA, Mg. José Álvaro Castillo Marín
Firma del jurado

IA, Mg. Mauricio Ortiz Botina
Firma del jurado

RESUMEN

La investigación se llevó a cabo en el año 2023, en la vereda Fuelamuesquer del municipio de Pupiales, donde se evaluó algunas variables de postcosecha y rendimiento de tubérculos de papa Var. Diacol Capiro. Se utilizó un diseño experimental de bloques completos al azar con tres tratamientos: fertilizante convencional (T0), nano fertilizante 100% del análisis de suelo (T1) y nano fertilizante al 75% (T2) del tratamiento 1. Se utilizó los nano fertilizantes comerciales Triple 20-n[®] (21-20-23), NPK-n[®] (12-12-36), Magno-n[®] (3-0-0-7MgO-7S), Fosfo-n[®] (10-30-0), Calcio-n[®] (0-0-0-7), Silico-n[®] (0-0-0-2Si), Micro-n[®] (0-0-0-8S-0,3B-0,5Cu-7Fe-1,5Mn-0,7Mo-1,7Zn). Los resultados mostraron diferencias significativas entre tratamientos, encontrándose los mejores promedios con el T0 en la altura de planta (76 cm), rendimiento calibre B (16.071 kg ha⁻¹), porcentaje de almidón (6,1%) y gravedad específica (1,1 g cc⁻¹). Igualmente, con el T1 se obtuvo mayores valores en número de tallos por planta (6), número de tubérculos por planta (17), diámetro de tubérculos calibre A (8,9 cm) y calibre B (7,1 cm), rendimiento de tubérculos por hectárea para calibres A (38.636 kg ha⁻¹) y el mejor porcentaje de materia seca se encontró en el T2 (22%). Además, el análisis económico mostró una mayor relación de costo-beneficio con el T1 (1,41) y tasa interna de retorno (41%).

Palabras clave: Nano partículas, nano fertilizantes, gravedad específica, almidón, materia seca.

ABSTRACT

The research was carried out in 2023, in the Fuelamuesquer village of the municipality of Pupiales, where some post-harvest variables and yield of Var potato tubers were evaluated. Diacol Capiro. A randomized complete block experimental design was used with three treatments: conventional fertilizer (T0), 100% nano fertilizer from soil analysis (T1) and 75% nano fertilizer (T2) from treatment 1. Commercial nano fertilizers were used. Triple 20-n[®] (21-20-23), NPK-n[®] (12-12-36), Magno-n[®] (3-0-0-7MgO-7S), Phospho-n[®] (10-30-0), Calcio-n[®] (0-0-0-7), Silico-n[®] (0-0-0-2Si), Micro-n[®] (0-0-0-8S-0,3B-0, 5Cu-7Fe-1.5Mn-0.7Mo-1.7Zn). The results showed significant differences between treatments, with the best averages found with T0 in plant height (76 cm), B caliber yield (16,071 kg ha⁻¹), starch percentage (6.1%) and specific gravity (1,1 g cc⁻¹). Likewise, with T1, higher values were obtained in number of stems per plant (6), number of tubers per plant (17), diameter of tubers caliber A (8.9 cm) and caliber B (7.1 cm), yield of tubers per hectare for sizes A (38,636 kg ha⁻¹) and the best percentage of dry matter was found in T2 (22%). Furthermore, the economic analysis showed a greater cost-benefit ratio with T1 (1.41) and internal rate of return (41%).

Keywords: Nano particles, nano fertilizers, specific gravity, starch, dry matter.

TABLA DE CONTENIDO

INTRODUCCIÓN	12
OBJETIVOS	13
Objetivo general	13
Objetivos específicos	13
MARCO TEÓRICO	14
Clasificación taxonómica de la papa	14
Generalidades de la papa Var. Diacol capiro	14
Fases fenológicas del cultivo de papa	15
Requerimientos nutricionales	15
Nanotecnología	16
<i>Uso de la nanotecnología en la agricultura: Nano fertilizantes</i>	16
<i>Absorción y movimiento de nanopartículas en las plantas</i>	18
MATERIALES Y MÉTODOS	19
Suelos de la zona	19
Material vegetal	19
Diseño experimental	20
Distribución de las parcelas	20
Manejo Agronómico	21
<i>Análisis de suelo</i>	21
<i>Preparación del suelo</i>	21
<i>Desinfección de semilla</i>	22
<i>Siembra</i>	22
<i>Deshierba y aporque</i>	22
<i>Fertilización</i>	22
<i>Cosecha</i>	23
Variables Para Evaluar	24
<i>Altura de la planta</i>	24
<i>Número de tallos aéreos por planta</i>	24
<i>Diámetro de los tubérculos por categoría</i>	24
<i>Número de tubérculos por planta</i>	25

<i>Rendimiento de tubérculos por hectárea</i>	25
<i>Gravedad específica</i>	25
<i>Contenido de materia seca</i>	25
<i>Porcentaje de almidón</i>	26
Análisis estadísticos y económico	26
RESULTADOS Y DISCUSIÓN	27
Altura de planta	27
Número de tallos aéreos	28
Número de tubérculos por planta	29
Diámetro de tubérculos	30
Rendimiento	31
<i>Rendimiento de tubérculos calibre A</i>	31
<i>Rendimiento de tubérculos calibre B</i>	32
Porcentaje de materia seca	33
Gravedad específica	34
Porcentaje de almidón	35
Análisis Económico	37
<i>Relación costo/beneficio (C/B)</i>	39
<i>Tasa Interna de Retorno (TIR)</i>	39
<i>Tasa Interna de Oportunidad (TIO)</i>	40
CONCLUSIONES	42
RECOMENDACIONES	42
BIBLIOGRAFÍA	44

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Fases fenológicas del cultivo de Var. Diacol capiro.	15
Tabla 2. Requerimiento nutricional del cultivar Diacol Capiro (<i>Solanum tuberosum</i> Andigenum 4X).	15
Tabla 3. Comparación de los requerimientos climáticos de la especie con las condiciones presentes en el municipio de Pupiales.	19
Tabla 4. Resultados análisis químico de suelo.	21
Tabla 5. Producto y dosis aplicada en cada tratamiento.	23
Tabla 6. Calibres de las papas tipo pardas (<i>Solanum tuberosum</i> , L.).	25
Tabla 7. Resumen de cuadrados medios en diez variables Andeva.	27
Tabla 8. Prueba de comparación de medias de Tukey para altura de planta.	28
Tabla 9. Prueba de comparación de medias de Tukey para número de tallos aéreos.	29
Tabla 10. Prueba de comparación de medias de Tukey para número de tubérculos por planta.	30
Tabla 11. Prueba de comparación de medias de Tukey para diámetro calibre A.	31
Tabla 12. Prueba de comparación de medias de Tukey para diámetro calibre B.	31
Tabla 13. Prueba de comparación de medias de Tukey para rendimiento kg ha ⁻¹ del calibre A.	32
Tabla 14. Prueba de comparación de medias de Tukey para rendimiento kg ha ⁻¹ del calibre B.	33
Tabla 15. Rendimiento en ton ha ⁻¹ de los tratamientos y sus respectivos calibres.	33
Tabla 16. Prueba de comparación de medias de Tukey porcentaje de materia seca.	34
Tabla 17. Prueba de comparación de medias de Tukey para gravedad específica.	35
Tabla 18. Prueba de comparación de medias de Tukey para porcentaje de almidón.	36
Tabla 19. Costos de fertilizantes granulados para una hectárea de papa en Nariño, año 2023.	38
Tabla 20. Costos de nano fertilizantes con el 100% del análisis de suelos para una hectárea de papa en Nariño, año 2023.	38
Tabla 21. Costos de nano fertilizantes con el 75% del análisis de suelos para una hectárea de papa en Nariño, año 2023.	38
Tabla 22. Relación costo/beneficio.	39
Tabla 23. Tasa Interna de Retorno (TIR) y Tasa interna de oportunidad (TIO).	41

ÍNDICE DE FIGURAS**Figura 1.** Mapa de campo.

20

GLOSARIO

- **Nanotecnología:** Es un área de investigación, así como su aplicación en la fabricación de dispositivos y productos, que estudia las propiedades de los materiales que tienen entre uno y 100 nanómetros de tamaño.
- **Nano fertilizantes:** son fertilizantes sintetizados o modificados con ayuda de la nanotecnología para mejorar la fertilidad del suelo, la productividad y la calidad de productos agrícolas.
- **Nanopartículas:** son objetos de tamaño nanométrico, es decir, sus dimensiones son del orden de unos pocos nanómetros, a lo sumo decenas de nanómetros. Un nanómetro es la mil millonésima parte de un metro, o la millonésima parte de un milímetro.
- **Gravedad específica:** es la densidad de un material en relación con el agua y es un factor importante de calidad en los tubérculos.
- **Porcentaje de materia seca:** se refiere a la cantidad de alimento menos el agua contenida en dicho alimento. Influye directamente en el rendimiento de las papas procesadas, la tasa de absorción de aceite en los productos fritos y la textura de las papas cocidas.
- **Almidón:** son un ingrediente muy versátil con un sabor neutro, alta claridad, fuerte calidad gelificante y alta capacidad de retención de agua.

INTRODUCCIÓN

La creciente población mundial ha generado una demanda creciente de alimentos y otros insumos, planteando uno de los mayores desafíos del siglo XXI: innovar e implementar tecnologías para producir suficiente cantidad y calidad de alimentos. Según estimaciones, la producción mundial de alimentos debe aumentar entre un 70% y un 100% para el año 2050, con el objetivo de cubrir las necesidades de una población cada vez mayor, sin comprometer la salud del suelo y los agroecosistemas (Lira *et al.*, 2018).

El cultivo de papa desempeña un papel crucial en la cadena alimentaria. Después de los cereales, la papa se erige como el alimento más importante del mundo y ocupa un lugar destacado en la cocina colombiana. En 2020, no solo fue el tubérculo más consumido en el país, sino que también se posicionó como el segundo producto más relevante en la canasta familiar, justo después del arroz, con un impresionante consumo per cápita de 57 kg por persona al año (Freshplaza, 2021).

La producción de papa en Colombia representó el 3,3% del PIB agrícola del país. Los departamentos de Cundinamarca, Boyacá y Nariño contribuyeron significativamente, aportando el 85% de la producción y el 84% del área sembrada (MADR, 2021). En Nariño, se cultivaron 24.906 hectáreas de papa, generando empleos directos e indirectos para aproximadamente 3.950.000 personas y desempeñando un papel esencial en el tejido social y cultural del departamento (Gobernación de Nariño, 2020). Para aumentar la producción y calidad de la papa es esencial adoptar prácticas agrícolas sostenibles, uso adecuado de abonos y fertilizantes insumos que garantizan valor comercial a la papa, como menciona Palacios *et al.*, (2008), que factores como el contenido de azúcares reductores y la gravedad específica, son esenciales para el procesamiento y calidad del producto final.

Los fertilizantes representaron un porcentaje significativo de los costos de producción en Nariño en 2018 para variedades como 'Diacol Capiro' (45%) y 'Superior' (43%) (Federación Colombiana de Productores de Papa [Fedepapa], 2021), los gastos asociados con enmiendas, abonos y fertilizantes alcanzaron el 25% del total, resaltando la importancia crítica de estos insumos para los agricultores y la industria. A pesar de la relevancia de los fertilizantes, su uso irracional incluye costos elevados, daños ambientales como la contaminación del suelo, el agua y la reducción de biodiversidad (Luna *et al.*, 2016). Por ello, la ciencia ha introducido avances revolucionarios, entre ellos, la nanotecnología, que ofrece herramientas innovadoras para mejorar la agricultura. La nano tecnología ha surgido como una tecnología transformadora que proporciona soluciones para la producción de alimentos, incluyendo la detección rápida de enfermedades fitopatógenas y la mejora de la capacidad de las plantas para absorber agua, nutrientes y pesticidas (Lira *et al.*, 2018).

OBJETIVOS

Objetivo general

Evaluar la respuesta de algunas variables de postcosecha y rendimiento en el cultivo de papa a la aplicación de diferentes niveles de nano fertilizante.

Objetivos específicos

Determinar los niveles de nano fertilizante de acuerdo con el análisis de suelo y requerimientos de la planta.

Evaluar algunas variables de postcosecha, rendimiento y costos en el cultivo de papa mediante pruebas de campo y laboratorio.

MARCO TEÓRICO

Clasificación taxonómica de la papa

Según Tinjacá, *et al.* (2015) la papa se clasifica de la siguiente manera:

Reino: Plantae

Familia: Solanaceae

Género: solanum

Especie: *Solanum tuberosum*

Sub especie: Andigenum 4X

Nombre común: Diacol capiro

Generalidades de la papa Var. Diacol capiro

Diacol Capiro es un cultivar obtenido en 1958, inscrito y mejorado en el Instituto Colombiano Agropecuario (ICA) con registro nacional PAP-68-02; su genealogía corresponde al cruzamiento entre Tuquerreña (CCC 61) x 1967 (C) (9) (CCC 751); se siembra comercialmente en los departamentos de Cundinamarca, Boyacá, Nariño, Antioquia, Cauca, Norte de Santander, Caldas, Tolima y Santander. La variedad es de doble propósito: para consumo fresco directo y como materia prima para la transformación en hojuelas y bastones por su excepcional aptitud y calidad de procesamiento industrial Porras, *et al.* (2015).

La planta es herbácea, de porte medio con tallos principales delgados de color verde oscuro y púrpura, al comienzo erguidos luego se postran sobre el suelo cuando llegan a la madurez del cultivo; las hojas son compuestas, imparipinnadas; los folíolos son pequeños y alargados, de color verde oscuro; con flores de color morado oscuro, acúmenes blancos en la punta y escasa fructificación Porras, *et al.* (2015).

Los tubérculos son numerosos, con predominio de tamaños grandes, de forma redonda, ligeramente aplanada. La piel predominantemente es de color rojo con color secundario morado y pulpa de color crema. Las raíces son fibrosas, filamentosas, muy ramificadas, finas y largas; tienen una profundidad aproximada de 0,5 m; si hay restricción a una profundidad de 0,3 m, el potencial de rendimiento teórico se disminuiría en 40,4 %, lo que hace a la variedad susceptible a capas compactadas. En texturas franco-arenosas, la retención de humedad del suelo es muy baja y, por tanto, el rendimiento del cultivo podría disminuir hasta un 32,4 %. La variedad presenta amplia adaptación, se cultiva en todos los departamentos del país y tiene un periodo vegetativo relativamente semi tardío cercano a 165 días en

alturas de 2600 m.s.n.m. Se adapta a condiciones entre 2000 y 3200 msnm, con un periodo vegetativo de cuatro y medio a seis meses, duración que está en función de la temperatura. La variedad Diacol Capiro es muy susceptible a *Phytophthora infestans*, virus del amarillamiento de venas de la papa (PVV), *Erysiphe cichoracearum* y *Spongospora subterranea* tanto en raíz como en tubérculo, es tolerante a *Ralstonia solanacearum*, al virus X de la papa (PVX) y al virus Y de la papa (PVY) Porras, *et al.* (2015).

El rendimiento comercial de la variedad se encuentra sobre 40 ton ha⁻¹, aunque su potencial puede superar 70 ton ha⁻¹; su materia seca promedia del 20 % al 22 %, con peso específico de 1,085gr/cc y azúcares reductores de 0,1 %; calidad culinaria buena para consumo fresco, textura compacta después de la cocción y apta para preparaciones en sopa, cocinada o salada Porras, *et al.* (2015).

Fases fenológicas del cultivo de papa

El ciclo fenológico del cultivo de papa (tabla 1) se divide en 5 etapas, iniciando desde el desarrollo de tallos principales (etapa 1), hasta la senescencia (etapa 5) Valbuena *et al.* (2010).

Tabla 1. Fases fenológicas del cultivo de Var. Diacol capiro.

Fases	Etapas	Descripción	Días después siembra (dds)
Vegetativa	1	Emergencia de tallos principales y hojas	20 dds.
	2	Formación de tallos secundarios, raíces y hojas	32 a 40 dds
Reproductiva	3	Floración, inicio de tuberización	60 a 88 dds
	4	Formación de bayas, llenado y cuajado de tubérculos.	88 dds
	5	Senescencia.	180 dds

Requerimientos nutricionales

En la tabla 2 se resume los requerimientos nutricionales del cultivo de papa.

Tabla 2. Requerimiento nutricional

Requerimientos nutricionales para obtener rendimientos de 40 ton ha ⁻¹					
kg ha ⁻¹					
N	P ₂ O ₅	K ₂ O	Ca	MgO	S
120	40	200	20	40	20

Nota. Franco, (2022).

Nanotecnología

El término nanotecnología fue usado por primera vez en (1959) por el físico Richard Feynman, quien señaló la capacidad de manejar materiales a nivel nanométrico. El *nano* es un prefijo griego que significa enano y abarca una amplia gama de fenómenos y objetos cuyas dimensiones son de una millonésima parte de un milímetro (1×10^{-9} m) Foladori, (2013). Esta tecnología que, aparte de estar caracterizada por operar a tales dimensiones (en la que también funcionan otras disciplinas como la química y la biología), alude en particular al diseño, caracterización y producción de nuevas nano estructuras, nano dispositivos y sistemas basados en "controlar" la forma, el tamaño y las propiedades de la materia a dicha escala Delgado, (2014).

Uso de la nanotecnología en la agricultura: Nano fertilizantes

Los nano fertilizantes son nutrimentos que se encuentran encapsulados mediante tres diferentes vías. En la primera, los nutrimentos son encapsulados dentro de materiales porosos; en la segunda, éstos son cubiertos con una capa delgada de un polímero; y en la tercera, los nutrimentos son liberados como partículas o emulsiones con dimensiones nano escalares Rai *et al.* (2012).

Actualmente, para lograr una agricultura sustentable con el máximo rendimiento y el mínimo riesgo ambiental, el uso de nano fertilizante ha despertado una amplia atención, hay diversas investigaciones en las cuales se evalúan nanopartículas en la agricultura, por ejemplo, en un estudio de Amirnia, Bayat & Tajbakhsh (2014) revelan que se encontró diferencias significativas entre las dosis estudiadas de nano fertilizante con base en (Fe, P y K), en ecotipos de azafrán (*Azafrán sativus*). Los resultados mostraron que el nano fertilizante que contienen Fe, P y K tuvieron efectos positivos en la floración de dicho cultivo.

De igual manera, en una investigación de Tarafdar, Raliya, Mahawar & Rathore (2014), donde evaluaron el efecto de nano partículas ZnO como promotoras de crecimiento en el cultivo de sorgo (*Pennisetum americanum*), encontraron un incremento significativo en variables fisiológicas y bioquímicas como: el crecimiento del tallo (15,1%), longitud de raíz (4,2%), área radicular (24,2%), contenido de clorofila (24,4%), proteína soluble total en hojas (38,7%), biomasa seca de plantas (12,5%), y actividad enzimática de fosfatasa ácida (76,9%), fosfatasa alcalina (61,7%), fitasa (322,2%), y deshidrogenasa (21%); esos aumentos se detectan en plantas de 6 semanas tratadas con nanopartículas ZnO, en comparación con las plantas del tratamiento control o testigo; además, el rendimiento del grano se incrementó en un 37,7 % debido a la aplicación de nano fertilizante de zinc.

Por su parte, Raliya, Biswas & Tarafdar (2015) encontraron que nano partículas de óxido de titanio aplicado foliarmente en dosis de (10 mg L^{-1}) a plantas de *Vigna radiata* puede servir como un fertilizante más amigable con el ambiente, debido a que su aplicación reveló un incremento significativo en la longitud del tallo (17,02%), longitud de raíz (49,6%), área radicular (43%), nódulos radiculares (67,5%), contenido de clorofila (46,4%) y proteína total soluble (94%). Además, se detectó que en la zona de la rizosfera la población microbiana benéfica se incrementó entre 21,4% y 48,1%, así como la actividad de fosfatasa ácida (67,3%), fosfatasa alcalina (72%), fitasa (64%) y deshidrogenasa (108,7%). Del mismo modo, según Abd El-Azeim *et al.* (2020) en su artículo Impacts of nano- and nonnanofertilizers on potato quality and productivity, evaluaron en sistemas de cultivo de papa, que al aplicar NPK-n en proporciones iguales o más bajas a lo recomendado podrían reemplazar los fertilizantes químicos NPK sin efectos negativos sobre su rendimiento, producción y calidad, en comparación con los tratamientos testigo encontraron que las parcelas que se les aplicó NPK-n foliar mostraron valores más altos de rendimiento productivo y económico ($23,59 \text{ ton ha}^{-1}$), índices de almidón (79,62%), índice de cosecha (59,24%), logrando mayor relación costo:beneficio en la producción de papa. Esta investigación recomienda la aplicación foliar de nano fertilizante en papa para aumentar la producción y la calidad en comparación con las aplicaciones al suelo. En este estudio se demostró que la aplicación de nano fertilizante foliares son una alternativa ambiental y económica frente a los fertilizantes químicos.

Ahmadian, Jalilian y Pirzad (2021); investigaron el efecto del nano fertilizante en la eficiencia y rendimiento del uso del agua en trigo en Irán. Por lo tanto, realizaron bloques al azar en parcelas con riego deficitario y riego completo, subparcelas empleando nano fertilizante de boro, zinc y silicio. Para la preparación del nano fertilizante disolvieron los compuestos de zinc, boro y silicio en un poco de agua, seguidamente lo pusieron en un agitador, luego agregaron ácido orgánico, esperaron a que se disolviera y secaron en un horno. Realizaron ocho tratamientos, sembraron en hileras en una superficie de 200 kg ha^{-1} , aplicaron urea y sulfato de potasio. Los resultados mostraron que con el nano silicio el número de 1000 granos aumentó en un 38% con los dos regímenes de riego y mejoró la altura del trigo en un 26% con riego al 100% en contraste con el tratamiento de control; en cuanto al peso, el nano silicio aumentó en 45 y 40% con riego al 50% y 100% respectivamente; por otro lado el nano-zinc demostró mayor efecto en el contenido de proteína con un 26,5% en contraste con el tratamiento de control; en el contenido de agua relativo, el nano fertilizante de silicio bajo regímenes deficientes de riego demostró un aumento de 15% y en regímenes de riego total aumentó un 15%. En consecuencia, los resultados evidencian la relevancia del nano fertilizante para el desarrollo del trigo y protección ante el estrés del riego.

Absorción y movimiento de nanopartículas en las plantas

Las nanopartículas (NPs) pueden aplicarse en la parte foliar mediante aspersion y en el agua de riego a la zona de las raíces, pudiendo luego transportarse a diversos sitios de las plantas Cañas, (2020). La absorción de nanopartículas por las plantas es un campo de reciente estudio. La mayor parte de los datos corresponden a la etapa de germinación y cultivo en desarrollo. Debido a que aún no están bien definidos los protocolos para la cuantificación de nanopartículas dentro de los tejidos, la absorción, translocación, y acumulación de nanopartículas dependen de la especie de la planta y el tamaño, tipo, composición química, funcionalización, y la estabilidad de las nanopartículas Rico *et al.* (2011).

La internalización de las nanopartículas en las plantas se produce durante la endocitosis con la ayuda de una cavidad mediante la membrana plasmática. También pueden cruzar la membrana utilizando proteínas transportadoras o a través de los canales iónicos. En el citoplasma, las nanopartículas se pueden unir con diferentes orgánulos citoplasmáticos e interferir con los procesos metabólicos en ese sitio Nair *et al.* (2010).

Por otra parte, Kurepa *et al.* (2010) mencionan que existen varias posibles vías para la absorción de nanopartículas por las células vegetales. Los datos sugieren que las nanopartículas pueden entrar en las células de plantas mediante la unión a proteínas transportadoras, a través de las acuaporinas, canales de iones, mediante la creación de nuevos poros (exclusivo en nanotubos de carbono, los nanotubos crean o forman los poros para entrar a la célula) o mediante endocitosis. Las nanopartículas pueden formar complejos con transportadores de membrana o exudados de las raíces y posteriormente ser transportados. Una vez dentro de las células, las nanopartículas pueden ser transportadas apoplásticamente o simplásticamente. Sin embargo, los mecanismos exactos de por qué sólo algunas especies de plantas fácilmente absorben nanopartículas son aún desconocidos (Rico *et al.*, 2011).

Cuando las nanopartículas se aplican sobre la superficie de las hojas, entran a través de estomas abiertos o a través de las bases de tricomas y luego son transportadas a diversos tejidos. Sin embargo, las acumulaciones de las nanopartículas en la superficie fotosintética pueden causar calentamiento foliar que se traduce en alteraciones en el intercambio de gases debido a la obstrucción en estomas que producen cambios en diversas funciones fisiológicas y celulares de plantas Eichert *et al.* (2008).

MATERIALES Y MÉTODOS

Localización

La investigación se desarrolló en la vereda Fuelamuesquer, Municipio de Pupiales, a una altura de 3141 m.s.n.m., latitud 0°54 '14"N, longitud 77°36' 27"W IDEAM (2022), bosque seco montano bajo (bs-MB) Holdridge, (1967).

Clima

La zona de Pupiales vereda Fuelamuesquer se caracteriza por presentar un clima frío (tabla 3) húmedo con temperatura promedio de 11°C y precipitación media anual de 1254 mm IDEAM (2023).

Tabla 3. Comparación de los requerimientos climáticos de la especie con las condiciones presentes en el municipio de Pupiales.

Parámetros	Condición climáticos requerida por la especie	Condiciones climáticas del municipio
Temperatura (°C)	10 a 15	11
Humedad relativa (%)	70 y 90	70
Precipitación (mm año ⁻¹)	500 y 2500	1254
Altura (msnm)	2000 a 3000	2650 a 3600

Nota. Moreno, E. (2012), IDEAM. (2023), Weather Spark (2023).

Suelos de la zona

En el área experimental los suelos taxonómicamente son andisoles (*Vitric haplustand*) los cuales se formaron a partir de cenizas volcánicas como material parental, texturas en general francas que rápidamente acumulan materia orgánica y complejo aluminio-humus ocasionando la adsorción de fósforo y generando deficiencia de este elemento. Presentan de moderada a alta capacidad de intercambio y generalmente por la presencia de aluminio, son de pH con tendencia ácida generalmente de 4,5 a 5,5. Son suelos considerados de alta productividad y presentan pendientes del 12% (Contextoganadero, 2019).

Material vegetal

Para la investigación se utilizó tubérculos de papa var. Diacol Capiro certificada y distribuida por la empresa Plantar de Colombia.

Diseño experimental

Se utilizó el diseño experimental de bloques completos al azar (BCA), donde se implementaron tres tratamientos diferentes: un fertilizante convencional y dos niveles de nano fertilizante. Estos tratamientos se distribuyeron en tres repeticiones de forma aleatoria en el área experimental, tal como se muestra en el Gráfico 1. El tratamiento control consistió en la aplicación de fertilizante granulado como es tradicional en la zona, en el primer tratamiento, el nano fertilizante se aplicó al 100% de la recomendación basada en la disponibilidad de nutrientes del suelo y las necesidades específicas del cultivo. Por otro lado, en el segundo tratamiento, se utilizó el 75% de la recomendación aplicada en el primer tratamiento.

T0 Testigo (Fertilizante convencional).

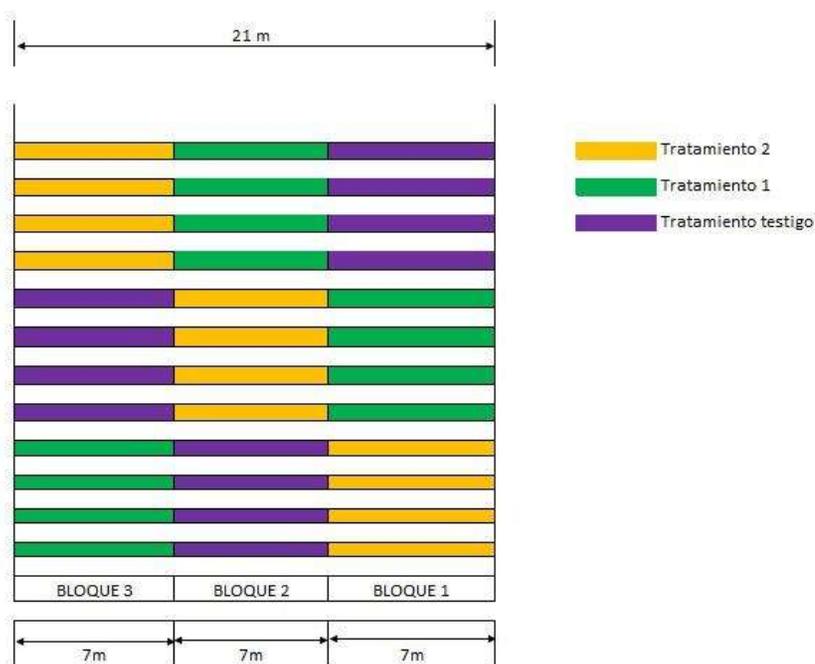
T1 100% con Nano fertilización

T2 75% con Nano fertilización

Distribución de las parcelas

El área experimental fue de 315 m², dividida en tres bloques con tres repeticiones, con un total de 9 unidades experimentales. La unidad experimental estuvo conformada por 4 surcos de 7 m de longitud, con una separación de 1 m entre surcos y 0,4 m entre plantas, totalizando así 636 plantas en el área de estudio.

Figura 1. Mapa de campo.



Manejo Agronómico

Análisis de suelo

Se efectuó un análisis del suelo (tabla 4), involucrando la toma de 5 sub muestras en la zona experimental que abarcó 315 m², con el objetivo de cuantificar la disponibilidad de nutrientes en el suelo.

Tabla 4. Resultados análisis químico de suelo.

Ensayos	Método	Técnica	Unidad de medida	Muestra
pH, Potenciómetro	NTC 5264	Potenciométrica		5,22
Materia Orgánica	Walkley-Black	Espectrofotométrica uv-vis	%	12,3
Fósforo disponible	Bray II y Kurtz	Espectrofotométrica uv-vis	mg/Kg	12,4
Capacidad Intercambio Catiónico (CIC)	NTC 5268	Volumétrica		32,5
Calcio de Cambio				2,97
Magnesio de Cambio	NTC 5349	Espectrofotometría de Absorción Atómica	cmol ⁺ /Kg	0,54
Potasio de Cambio				0,68
Aluminio de Cambio	Extracción KCl 1N NTC 5263	Volumétrica		1,58
Hierro disponible				270
Manganeso disponible		Espectrofotometría de Absorción Atómica		41,6
Cobre disponible	DTPA - NTC 5526		mg/Kg	0,89
Zinc disponible				3,23
Boro disponible	Agua Caliente NTC 5404	Espectrofotométrica uv-vis		0,3
Nitrógeno Total	Con base en la materia orgánica	Cálculo	%	0,44
Carbono Orgánico Oxidable	Walkley-Black	Espectrofotométrica uv-vis	%	7,11

Nota. Análisis proporcionados por los Laboratorios especializados de suelo UDENAR (2023).

Preparación del suelo

Antes de la siembra se realizó la aplicación de Glifosol® SL (1 L ha⁻¹) en el área experimental, posteriormente se llevó a cabo la preparación manual del suelo utilizando un azadón, alcanzando una profundidad de 30 cm. Este proceso se realizó para acondicionar y homogeneizar la superficie de siembra para garantizar un adecuado drenaje y aireación.

Desinfección de semilla

La certificación de la semilla de papa Var. Diacol Capiro, garantizó la desinfección realizada por el proveedor, plantar de Colombia, con el fungicida Vitavax® 300 WP y el insecticida Lorsban® 2,5 % DP asegurando inocuidad para uso de cultivo.

Siembra

La siembra se realizó en el mes de marzo de 2023, depositando un tubérculo semilla por sitio, con distancias de 0.40 m entre plantas y 1.00 m entre surcos e igualmente se aplicó fungicidas e insecticidas químicos de forma preventiva para enfermedades y plagas que afectan la primera etapa del cultivo así: Furtivo® 250SC (300cc ha⁻¹) + Abafed® 18EC (300cc ha⁻¹) + Agrodyne® SL (500cc ha⁻¹) + Lannate® 40SP (40 g ha⁻¹).

Deshierba y aporque

La deshierba se realizó de forma manual con azadón a los 20 días después de la siembra, para mantener el suelo libre de arvenses y el aporque se realizó a los 40 días después de la siembra.

Control fitosanitario

Se realizaron tres aplicaciones radiculares durante los primeros 40 días después de la siembra con Propamocur® 70SL (700 L ha⁻¹), Validacim®30SL (500cc ha⁻¹) y Engeo® SC (200 cc ha⁻¹). Durante el resto del ciclo del cultivo se llevaron a cabo aplicaciones foliares preventivas cada 9 días para plagas con Lorsban® 4EC (1L ha⁻¹), Engeo® SC (200 cc ha⁻¹), Karate Zeon® CS (200 cc ha⁻¹), Pirestar® 38EC (750 cc ha⁻¹), Methox® (500 g ha⁻¹), Spider® (400 cc ha⁻¹) y para enfermedades con Fitoraz® 76WP (1,5 kg ha⁻¹), Curaxil® WP (2 kg ha⁻¹), Ebano 500WP® (0,4 kg ha⁻¹), Daconil® SC (1,5 L ha⁻¹), Oficial® 250EW (0,9 L ha⁻¹), Propamocur® 70SL (700 cc ha⁻¹), Score® 250EC (0,5 L ha⁻¹) y Manzate® 200WP (1 kg ha⁻¹).

Fertilización

Se realizó un plan nutricional en base al peso, volumen, potencial de producción del cultivo, eficiencia de nutrientes y la selección del nano fertilizante correspondiente por hectárea. Las dosis correspondientes a la fertilización convencional (agricultor) fueron de 75 kg de fertilizantes por cada 50 kg de semilla. Esta fertilización se dividió en dos etapas clave del cultivo: la primera aplicación se realizó a

los 20 días después de la siembra (dds), durante el desarrollo de las hojas, utilizando un grado de 13-26-6 (1.250 kg ha⁻¹), mientras que la segunda aplicación tuvo lugar a los 40 dds, al inicio de la tuberización, utilizando 10-20-20 (1.000 kg ha⁻¹).

Para la fertilización con nano fertilizante, se consideró tanto la disponibilidad de nutrientes en el suelo como los requerimientos del cultivo (N 120 kg ha⁻¹, P 40 kg ha⁻¹, K 200 kg ha⁻¹), basándose en el rendimiento esperado de 40 ton ha⁻¹ en la zona. Las dosis de los nano fertilizantes por su tamaño métrico y peso en nano gramo equivalen aproximadamente a la relación 50:1 ósea por cada 50 kg ha⁻¹ de requerimiento de cada nutriente se aplica 1 kg de nano partícula en base a masa o peso. Se seleccionó para la investigación los únicos grados y formulas disponibles en Colombia Triple 20-n[®] (21-20-23), NPK-n[®](12-12-36), Magno-n[®] (3-0-0-7MgO-7S), Fosfo-n[®] (10-30-0), Calcio-n[®] (0-0-0-7), Silico-n[®] (0-0-0-2Si), Micro-n[®] (0-0-0-8S-0,3B-0,5Cu-7Fe-1,5Mn-0,7Mo-1,7Zn). Este plan de fertilización se dividió en tres etapas cruciales del cultivo: la primera aplicación se realizó a los 20 dds durante el desarrollo de las hojas, la segunda aplicación tuvo lugar a los 40 dds al inicio de la tuberización, y finalmente, se llevó a cabo una tercera aplicación a los 60 dds durante el llenado y cuajado de los tubérculos. En cuanto a los métodos de aplicación, el 50% de la dosis se administró mediante la técnica edáfica utilizando el método drench, mientras que el 50% restante se aplicó vía foliar, como se detalla en la tabla 5.

Tabla 5. Producto y dosis aplicada en cada tratamiento.

		Nano fertilizantes (g L ⁻¹)						
		Triple 20-n	P-n	Ca-n	12-12-36-n	Micro-n	Si-n	Mg-n
Primera aplicación	T1	60	25	30				
	T2	45	18	22				
Segunda aplicación	T1			30	50	25	5	
	T2			22	38	19	4	
Tercera aplicación	T1			15	50	25		25
	T2			11	38	19		19

Nota. Investigación (2023)

Cosecha

La cosecha se llevó a cabo el 22 de agosto de 2023, cuando se alcanzaron los 180 días después de la siembra. Durante esta operación, se consideraron criterios específicos, como el estado de madurez fisiológica de los tubérculos y la condición del follaje circundante. La recolección se realizó en las primeras

horas de la mañana utilizando herramientas manuales, como el azadón. Posteriormente, los tubérculos fueron dejados al sol para que se secan a temperatura ambiente. Se realizaron cuidadosas selecciones, etiquetando las muestras que serían evaluadas más tarde.

Variables Para Evaluar

Altura de la planta

La medición se llevó a cabo durante el período de floración, exactamente a los 95 días después de la siembra (dds). Para realizar esta evaluación, se midió la distancia desde el cuello del tallo principal hasta el ápice de la hoja más joven utilizando una cinta métrica. Se seleccionaron aleatoriamente 10 plantas de cada una de las parcelas asignadas a cada tratamiento y repetición. Las medidas obtenidas se registraron en centímetros, siguiendo el método descrito por Arizala *et al.* (2011).

Número de tallos aéreos por planta

Se registró el número de tallos aéreos que brotaron de los tubérculos en 10 plantas seleccionadas al azar de cada una de las parcelas asignadas a cada tratamiento y repetición. Esta observación se llevó a cabo cuando el 50% de las plantas comenzaron a florecer, es decir, a los 95 días después de la siembra (dds), según el método descrito por Arizala *et al.* (2011).

Diámetro de los tubérculos por categoría

Durante la cosecha, se seleccionaron tubérculos aleatoriamente de las 10 plantas recolectadas de cada una de las parcelas asignadas a cada tratamiento y repetición. Utilizando un pie de rey, se midió el diámetro polar y ecuatorial de estos tubérculos. Esta medición se realizó siguiendo la clasificación de los tubérculos por diámetro establecida en la Norma Técnica Colombiana (NTC) 341 (2018). De acuerdo con esta normativa, se consideran "calibre A" los tubérculos con un diámetro superior a 8,0 cm, mientras que los de "calibre B" tienen un diámetro que varía entre >4,5 y 8,0 cm. Para esta investigación, se evaluaron específicamente los tubérculos de calibres A y B debido a su relevancia comercial, como se detalla en la Tabla 6.

Tabla 6. Calibres de las papas tipo pardas (*Solanum tuberosum*, L.).

Código de calibre	Diámetro (cm)
A	>8,0
B	>4,5 a 8,0
C	2,0 a 4,5
D	<2,0

Nota. NTC 341 (2018).

Número de tubérculos por planta

Se contó el número total de tubérculos por planta en 10 plantas tomadas al azar en cada una de las parcelas útiles en cada tratamiento y repetición. Esta evaluación se realizó de acuerdo con la clasificación por tamaño como se cita en Porras *et al.* (2015)

Rendimiento de tubérculos por hectárea

Se cosecharon 10 plantas tomadas al azar de cada una de las parcelas útiles de cada tratamiento y repetición. Y se calculó utilizando la fórmula de Sánchez *et al.* (2015).

Rendimiento (kg ha⁻¹) = Densidad de plantas por ha * N° tubérculos por planta * peso promedio del tubérculo en fresco (kg)

Gravedad específica

Se determinó siguiendo el método descrito por Contreras (2017), seleccionando aleatoriamente un tubérculo de cada una de las parcelas asignadas a cada tratamiento y repetición. Se registró el peso del tubérculo en el aire (W) y el peso del tubérculo totalmente sumergido en agua (W_a). La diferencia entre estos pesos representa la pérdida de peso aparente en el agua, que es equivalente al peso del agua desplazada según el principio de Arquímedes. En consecuencia, la gravedad específica se calculó utilizando la siguiente ecuación:

$$\text{Gravedad específica (GE)} = W / (W - W_a)$$

Contenido de materia seca

Se escogieron tres tubérculos de calibre B, los cuales fueron cortados en rodajas. Se registró el peso fresco de estas muestras. Posteriormente, cada muestra se colocó en una bolsa de papel o recipiente

abierto y se sometió a una temperatura de 105 °C en una estufa durante 3 horas. Después de este proceso, las muestras se pesaron nuevamente para determinar su peso seco.

El porcentaje de contenido de materia seca se calculó utilizando la siguiente fórmula, tal como se describe en el estudio de Callejas *et al.* (2020):

$$\text{Materia seca} = (\text{Peso seco (g)} / \text{Peso fresco (g)}) \times 100$$

Porcentaje de almidón

La extracción del almidón se realizó por el método de decantación adaptada a partir del método de Melian (2010), donde se extrae el almidón de un tubérculo por cada una de las parcelas útiles de cada tratamiento y repetición. Para determinar el porcentaje de almidón se empleó la fórmula de Romero y Garnica (2009).

$$\% \text{ Almidón} = (\text{peso almidón (g)} / \text{peso inicial del tubérculo}) * 100$$

Análisis estadísticos y económico

Las variables fueron sometidas a análisis estadístico utilizando un análisis de varianza (ANDEVA). Para aquellas variables en las que se encontraron diferencias significativas, se llevó a cabo la prueba de significancia de Tukey ($p < 0,05$) para identificar las diferencias entre los tratamientos. Estas pruebas estadísticas fueron realizadas mediante el software estadístico Infostat en su versión 2020e, asegurando la precisión y confiabilidad de los resultados obtenidos.

Además del análisis estadístico, se realizó un análisis económico considerando los costos asociados a cada tratamiento. La relación beneficio-costos de cada tratamiento fue determinada utilizando la metodología propuesta por Muñoz & Lucero (2008). Este enfoque proporciona una evaluación integral de la rentabilidad de cada tratamiento, permitiendo una comprensión detallada de su viabilidad económica en el contexto del estudio.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

A continuación, se muestran los resultados encontrados en la investigación donde se evidencia el comportamiento del cultivo de papa (*Solanum tuberosum Subespecie Andigena 4x*) a la aplicación de nanopartículas de NPK y su respuesta a diferentes variables agronómicas y de calidad (Tabla 7).

Tabla 7. Resumen de cuadrados medios en diez variables Andeva.

FV	GL	CM									
		AP	NT	NTP	RA	RB	DA	DB	%MS	GE	%A
Modelo	2	55,2	0,45	28,44	161.895.788	5.186.723	21,78	23,11	15,09	0,01	0,95
Tratamientos	2	55,2	0,45	28,44	161.895.788	5.186.723	21,78	23,11	15,09	0,01	0,95
CV		4,1	3,74	9,55	5,72	5,72	1,74	2,00	4,47	2,61	5,80
R²		0,68	0,74	0,82	0,94	0,71	0,76	0,80	0,86	0,74	0,76
Error	6	8,49	0,05	2,11	3.447.720	706.265	2,33	1,89	0,82	0,0007	0,1

Nota. FV: Fuentes de variación; CM: Cuadrados medios; GL: Grados libertad; CV: Coeficiente de varianza; R²: Coeficiente de determinación; AP: Altura planta; NT: Numero de tallos, NTP: Numero de tubérculos/planta; RA: Rendimiento calibre A; RB: Rendimiento calibre B; DA: Diámetro calibre A; DB: Diámetro calibre B; %MS: Porcentaje de materia seca; GE: Gravedad específica; %A: Porcentaje almidón (Investigación, 2023).

Las variables evaluadas se describen a continuación:

Altura de planta

Esta variable agronómica mostro diferencias significativas entre tratamientos encontrándose que el T0 (76,03 cm), correspondiente a la fertilización convencional, evidencio el mayor promedio y el T2 (68,1 cm), 75% de nano fertilizante con la menor altura de la planta (tabla 8).

Trabajos realizados por Méndez, Lira & Vera, (2016) afirman que la aplicación de las nano partículas en diferentes cultivos ha evidenciado que incrementan el crecimiento de las plantas, el contenido nutricional y la actividad enzimática. Algunas nano partículas de ZnO y CuO muestran un efecto positivo sobre la reactividad de fitohormonas, especialmente del ácido indolacético, el cual promueve la elongación y división celular, incrementando la velocidad de crecimiento en las plantas, reportes similares encontrados en la investigación.

Además, Salama (2012), referente al crecimiento y la altura de la planta en cultivos de maíz y frijol, menciona que la aplicación de nanopartículas de plata (NPs Ag) tuvo un efecto estimulante sobre el crecimiento de las plántulas. Así mismo, Méndez *et al*, (2016) reporta el efecto de nano partículas de óxido de zinc puras (NPsZnO) y con plata (NPs ZnO + Ag) en plantas de chile (*Capsicum annum*) mostraron

mayor producción de biomasa seca, crecimiento de la parte aérea y radicular. El resultado encontrado en el presente trabajo refleja un efecto positivo sobre la variable altura de la planta con la aplicación de nano partículas.

El efecto sobre la altura de la planta con la aplicación de nano fertilizante puede variar dependiendo de diversos factores, como la formulación del nano fertilizante, las condiciones de crecimiento, las dosis, la interacción con el suelo, la planta y el agua. Sin embargo, es importante tener en cuenta que los resultados pueden variar según las condiciones específicas del experimento. Es importante mencionar que la nano fertilización está en constante evolución porque depende de la interacción genotipo- ambiente, que afectaría positiva o negativamente, dependiendo de la especie la variable altura.

Tabla 8. Prueba de comparación de medias de Tukey para altura de planta.

Tratamientos	Medias	
T0	76	a
T1	69,2	ab
T2	68,1	b

Nota. Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0,05$)

Número de tallos aéreos

En la variable número de tallos aéreos no se presentaron diferencias significativas en la aplicación de nano fertilizante. En la prueba de comparación de Tukey (tabla 9) se observó que el tratamiento 2 (5 tallos/planta) con el 75% de nano fertilización obtuvo el promedio más bajo de numero de tallos. De acuerdo con los datos podemos deducir que se obtuvieron promedios de 5 a 6 tallos/planta. Resultados similares fueron descritos por Méndez (2006) quien registra una media de 3-6 tallos por planta en un cultivo de papa, datos tomados 100 dds. Al respecto Jerez, Martin y Morales (2017) manifiestan que el crecimiento y desarrollo de las plantas está determinado por factores genéticos propios de la semilla, ambientales y resultado de la interacción entre fotosíntesis, respiración, transporte de asimilados, relaciones hídricas y nutrición mineral; que se traduce como el incremento irreversible en materia seca, volumen, longitud o área como resultado de la división, expansión y diferenciación celular.

Al respecto Cargua, (2022) afirma que el efecto de la nano fertilización promueve la formación de tallos turgentes, hojas verdes y saludables, debido al suministro de K disponible para el desarrollo de biomasa área y foliar, coincidiendo con lo evidenciado en la investigación.

Tabla 9. Prueba de comparación de medias de Tukey para número de tallos aéreos.

Tratamientos	Medias	
T0	6	a
T1	6	ab
T2	5	b

Nota. Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0,05$)

Número de tubérculos por planta

El análisis de varianza ANDEVA mostró diferencias significativas entre tratamientos, donde el T1 (17 tubérculos/planta) presentó el mayor promedio con la aplicación del 100% de la dosis de nano fertilizante con respecto a la disponibilidad de nutrientes en el suelo (tabla 10) y el T2 (11 tubérculos/planta) con el menor promedio. La aplicación de nano fertilizante requerido por la planta y la disponibilidad de los nutrientes en el suelo mostraron la mejor respuesta de la planta a la dotación del 100% con respecto al análisis de suelo. Así mismo se observó una superioridad fenotípica en la fase de tuberización debido a la eficiencia de los nano fertilizantes con NPK y microelementos en la segunda aplicación (50% drench y 50% foliar) con los grados, 12-12-36-n^o (10 kg ha⁻¹) Micrón-n^o (5 kg ha⁻¹) Ca-n^o (6 kg ha⁻¹) y Si-n^o (1,0 l ha⁻¹). Además, muy probablemente el mayor promedio en número de tubérculos por planta encontrados en el T1, se debió a la liberación controlada de nutrientes, permitiendo una absorción más eficiente por la planta e igualmente por la movilidad de los nano nutrientes en la planta, impactando positivamente en su crecimiento y desarrollo.

El tratamiento control presentó un comportamiento similar estadísticamente con respecto a los demás tratamientos muy posiblemente se debió a la baja eficiencia de los minerales granulados en el suelo y la absorción por la planta e igualmente la cantidad aplicada que se efectuó sin ninguna referencia de disponibilidad de nutrientes en el suelo, generando un desbalance nutricional en concordancia con lo mencionado por Novoa, M. *et al.*, (2018) quien afirma que el suministro en exceso o deficiente de minerales esenciales, afectan el adecuado desarrollo fenológico de las plantas.

Tabla 10. Prueba de comparación de medias de Tukey para número de tubérculos por planta.

Tratamientos	Medias	
T1	17	a
T0	17	a
T2	11	b

Nota. Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0,05$)

Diámetro de tubérculos

La variable agronómica diámetro de tubérculos presentó diferencias significativas entre tratamientos, encontrándose en el calibre A que el T0 fertilización convencional (8,9 cm) y el T1 (8,9 cm) con el 100% de nano fertilizante evidenciaron el mayor promedio estadístico sobre el T2 (8,4 cm) con el 75% de nano fertilizante que mostró el menor diámetro (tabla 11). Igualmente se presentaron diferencias significativas para el calibre B, con valores más altos para el T0 (6,9 cm) y T1 (7,1 mm) respecto al T2 (6,5 mm) este tratamiento tuvo el promedio de diámetro más bajo (tabla 12). Referente al tamaño de tubérculos Koch *et al*, (2020) afirma específicamente que el nutriente fósforo afectó el tamaño del tubérculo y que el aumento de tubérculos pequeños disminuye el número de tubérculos grandes, esto explica la variación de los resultados de calibre A y calibre B evidenciados en el tratamiento 2 de la investigación.

Resultados diferentes fueron encontrados por Peñaloza, *et al*. (2020) quien evaluó cuatro cultivares de papa y obtuvo promedios estadísticamente iguales en diámetro de tubérculo con valores que van desde 6,87cm a 8,83 cm. Es importante mencionar que el diámetro de tubérculos es una característica fundamental para el mercado en fresco en el cual se requieren dimensiones entre 4,5 y 5 cm y en la agroindustria para frituras deben ser mayores a 6,5 cm.

Con respecto al tamaño de algunos frutos, Azpeitia (2022) evaluó el efecto de nano partículas de hidroxiapatita y encontró mayor tamaño en higo comparado con los demás tratamientos y afirma que el efecto de la nano partícula de Ca se debe principalmente a una mayor absorbancia y reactividad atribuida a su pequeño tamaño.

Tabla 11. Prueba de comparación de medias de Tukey para diámetro calibre A.

Tratamientos	Medias	
T1	8.9	a
T0	8.9	a
T2	8.4	b

Nota. Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0,05$)

Los diámetros encontrados en la investigación concuerdan con Rahman, Hasan & Khan, (2021) quienes confirman que la producción de tubérculos de mayor tamaño podría atribuirse a la lenta liberación de los nano fertilizantes que garantizan una disponibilidad adecuada de nutrientes durante el crecimiento de los cultivos frente a la de los fertilizantes granulados, el aumento en el peso promedio de

la fruta podría deberse a la absorción nutricional balanceada que se sostiene mediante la aplicación tanto foliar como al suelo.

Tabla 12. Prueba de comparación de medias de Tukey para diámetro calibre B.

Tratamientos	Medias	
T1	7.1	a
T0	6.9	a
T2	6.5	b

Nota. Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0,05$)

Rendimiento

Rendimiento de tubérculos calibre A

La prueba de comparación de medias Tukey (tabla 13) mostró diferencias significativas entre tratamientos, el T1 obtuvo el mayor rendimiento ($38.636 \text{ kg ha}^{-1}$) con la aplicación del 100% de nano partículas y el menor rendimiento se obtuvo en el tratamiento 2 ($24.330 \text{ kg ha}^{-1}$) más sin embargo no se presentaron diferencias estadísticas con respecto al control o T0 ($34.384 \text{ kg ha}^{-1}$) explicando que el rendimiento alcanzado con la aplicación de los nano fertilizantes supero la aplicación de fertilizantes granulados tradicionales. Los resultados obtenidos concuerdan con los autores Kurepa *et al.*, (2010) quienes mencionan que existen varias vías posibles para la absorción de nanopartículas por las células vegetales que mejoran la eficiencia de los minerales. Igualmente, Cañas (2020) confirma que las nanopartículas pueden aplicarse en la parte foliar mediante aspersion y en el agua de riego a la zona de las raíces, pudiendo luego transportarse a diversos sitios de las plantas.

Tabla 13. Prueba de comparación de medias de Tukey para rendimiento kg ha^{-1} del calibre A.

Tratamientos	Medias	
T1	38.636	a
T0	34.384	a
T2	24.330	b

Nota. Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0,05$)

Rendimiento de tubérculos calibre B

De acuerdo con el análisis estadístico, se observó diferencias significativas entre los tratamientos (tabla 14), evidenciando que el rendimiento de calibre B tratamiento 1 (14.533 kg ha⁻¹) obtuvo el mayor promedio de rendimiento. Cabe destacar que los calibres A y B estadísticamente evaluados representan un mayor valor comercial por lo cual representa mayores ingresos económicos para el agricultor.

Al respecto Abd El-Azeim *et al*, (2020) menciona que el rendimiento de los tubérculos es un índice importante que indica la eficiencia fotosintética del cultivo que influye en el rendimiento, la calidad y el valor económico del cultivo. Estudios realizados por Zurita y Morales (2021) sobre el uso de nano fertilizante en el cultivo de zanahoria reportaron que la producción se vio beneficiada gracias a la aplicación de nano fertilizantes con valores entre 119 ton de zanahoria para la categoría primera y 36 ton de zanahoria para la categoría segunda en comparación con la producción alcanzada sin aplicación de nano fertilizantes.

Abd El-Azeim *et al.*, (2020) afirma que la aplicación foliar de los nano fertilizantes atribuyen mayor disponibilidad de nutrientes y rápida absorción por los tejidos estomáticos, por ello, está sujeta a la superioridad de parámetros de rendimiento del cultivo de papa en comparación con la aplicación al suelo, de esta manera, fue posible explicar el aumento significativo del rendimiento de tubérculos encontrado en la investigación con la nano fertilización foliar realizada 40 dds en la segunda aplicación (inicio de tuberización) y 60 dds en la tercera aplicación (llenado y cuajado de tubérculos).

Pérez, Rodríguez & Gómez (2008), mencionan que, el acumular mayor cantidad de materia seca no garantiza que el rendimiento kg ha⁻¹ sea mayor, lo cual se evidencia en la correlación de estas variables del calibre A en el tratamiento 2, donde se obtuvo promedio de 22,12% de materia seca y 24.330 kg ha⁻¹ mostrando ser el promedio más bajo en comparación con el tratamiento 1.

Tabla 14. Prueba de comparación de medias de Tukey para rendimiento kg ha⁻¹ del calibre B.

Tratamientos	Medias
T0	16.071 a
T1	14.533 ab
T2	13.455 b

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0,05$)

El rendimiento total (ton ha⁻¹, calibre A, B, C y D) de la Var. Diacol Capiro encontrado en la investigación (tabla 15) mostro promedios satisfactorios a la eficiencia de las nano partículas de

fertilizante en la interacción suelo-agua-planta-atmosfera, obteniendo el mayor rendimiento en el tratamiento 1 (62 ton ha⁻¹) y tratamiento 2 (45 ton ha⁻¹) siendo este rendimiento el promedio más bajo en la investigación, así mismo el calibre A (38.636 kg ha⁻¹) del tratamiento 1 considerado como papa comercial superan lo consolidado por Fedepapa (2020) donde reporta que el rendimiento total del cultivar Diacol Capiro es de 32.084 kg ha⁻¹ y los rendimientos de papa comercial (papa de buena calidad y gran tamaño que es comercializada a intermediarios, mayoristas, minoristas, industria, etc.), se evidenció un rendimiento promedio de 27.729 kg ha⁻¹.

Tabla 15. Rendimiento en ton ha⁻¹ de los tratamientos y sus respectivos calibres.

Tratamientos	Rendimiento ton ha ⁻¹				Rendimiento total ton ha ⁻¹
	Calibre A	Calibre B	Calibre C	Calibre D	
Tratamiento testigo	34	14	7	2	58
Tratamiento 1	38	14	6	3	62
Tratamiento 2	24	14	5	1	45

Nota. Investigación (2023)

Porcentaje de materia seca

El análisis estadístico mostro diferencias significativas entre el fertilizante convencional y el nano fertilizante, con valores promedios de materia seca T0 (17%) fertilizante convencional, T1 (20%) aplicación del 100% nano fertilizantes y T2 (22%) nano fertilizante al 75% del análisis de suelos, siendo el porcentaje más alto según lo indica la tabla 16. Según Ñustez, (2010) la materia seca en la variedad Diacol Capiro representa cifras alrededor de 20,21% valor similar a los encontrados en esta investigación.

Punina (2013). Menciona que la producción de biomasa seca es el resultado de la acumulación y la distribución de fotosintatos en diferentes órganos de la planta, que está influenciado por la administración y absorción de los nutrientes. Según Abd El-Azeim *et al*, (2020) los nano fertilizantes aplicados foliarmente se asocian con un mayor crecimiento vegetativo de las plantas y área foliar, lo que ayuda a una mejor utilización de la radiación solar y los nutrientes disponibles esenciales para aumentar la productividad y la calidad de las plantas, a su vez estos aumentan fuerza a una mayor superficie fotosintética, formación de clorofila, biomasa y una mayor absorción de nutrientes, lo que resulta en un crecimiento vigoroso acumulativo, situación similar a la investigación donde se aplicó las nano partículas de fertilizante foliarmente en el cultivo de papa.

Trocchi y Guillen (2022) en plantas de caña de azúcar encontraron con dosis bajas en el cual el tratamiento con la dosis más baja reflejó plantas con mayor desarrollo y contenido de materia seca, aunque la altura de planta del T2 fue 68,1 cm menor frente a los otros tratamientos, esto lo justifica el mismo autor quien señala que se debe a la distribución o translocación de los nutrientes hacia las partes bajas de la planta con la edad del cultivo.

Flores, *et al.*, (2021) encontraron en papa una acumulación de biomasa en toda la planta gracias a una adecuada relación entre N y K, cuyos efectos son conocidos desde hace tiempo respecto a la producción de biomasa en papa, concentraciones altas de nitrógeno favorecen el desarrollo del dosel, alargan el ciclo de cultivo e inhiben la tuberización, mientras altas concentraciones de potasio la favorecen; sin embargo, se puede observar que a concentraciones de 200 a 250 kg ha⁻¹ de N, obtuvo mayor biomasa total y de tubérculo, lo que concuerda con Coraspe *et al.* (2008) (citado por el mismo autor) quienes mencionan que la producción de biomasa está directamente relacionada con la dosis de nitrógeno en la solución nutritiva.

Tabla 16. Prueba de comparación de medias de Tukey porcentaje de materia seca.

Tratamientos	Medias	
T2	22	a
T1	20	a
T0	17	b

Nota. Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0,05$)

Gravedad específica

Se encontraron diferencias estadísticas entre tratamientos, se observó que el promedio más alto para gravedad específica es el T0 (1,1 g cc⁻¹) fertilización convencional, seguido por T1 (1,08 g cc⁻¹) nano fertilización 100%, el valor más bajo se obtuvo en el T2 (1,01 g cc⁻¹) nano fertilización (75%) (tabla 17). El resultado de la variable gravedad específica evidenció que la aplicación de nano fertilizantes (T1) puede superar en cualquier momento el valor encontrado con el fertilizante granulado (T0) porque no se presentaron diferencias entre ellos.

El T2 es el único tratamiento que está por debajo de la gravedad específica estándar, según Martínez, (2009), una gravedad específica mayor a 1,085 g cc⁻¹ permite obtener un buen rendimiento de hojuelas, con un menor contenido de aceite, mejor textura y color, por consiguiente, el T2 podría tener problemas para su fritura.

Torabian, *et al.*, (2021) menciona que el potasio es un elemento importante en esta característica, sin embargo, se registran resultados contradictorios en términos de la aplicación de K sobre la gravedad específica de los tubérculos de papa; algunos estudios informan reducciones, mientras que en otros estudios no se observa ningún impacto. La reducción de la gravedad específica a menudo se asocia más con la aplicación de KCl que con otras fuentes de K debido a una mayor absorción de K y a un mayor índice de sal, lo que aumenta la absorción de agua por los tubérculos. Por lo cual la aplicación de nano fertilizantes vía foliar y edáfica crean en conjunto una mayor eficiencia del nutriente debido al tamaño, concentración y redistribución o transporte de la nano partícula en la planta.

Tabla 17. Prueba de comparación de medias de Tukey para gravedad específica.

Tratamientos	Medias	
T0	1.10	a
T1	1.08	a
T2	1.01	b

Nota. Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0,05$)

Además de la materia seca, el contenido de almidón y la gravedad específica, el K puede afectar el contenido de azúcares reductores, que son precursores de la formación de acrilamida en productos de papa procesados (Koch *et al*, 2020). Probablemente el potasio en nano fertilizante mejore la dinámica enzimática y fisiológica del cultivo.

Porcentaje de almidón

El análisis estadístico reveló diferencias significativas entre los tratamientos en cuanto al porcentaje de almidón. El valor promedio más alto se observó en el T0, correspondiente al fertilizante convencional (6,1%), seguido por el tratamiento T1 de nano fertilizante 100% (5,33%), y el valor más bajo se registró en el T2 (5%). Es importante destacar que el T0 y T1 mostraron comportamientos estadísticamente similares, como se detalla en la (tabla 18), evidenciando que el nano fertilizante aplicado de acuerdo con el análisis de suelo y requerimiento de la planta podrían superar e incrementar el contenido de almidón y como alternativa para mejorar la calidad de los tubérculos. Los resultados obtenidos en la investigación concuerdan con Adhikari *et al.* (2011) quienes afirman que los contenidos de almidón y nitrato son importantes en la calidad de los tubérculos, a pesar de que, en estudios previos, el mismo autor sobre el cultivo de papa, encontró que el uso de fertilizantes, tanto nano como convencionales, no tuvo un efecto significativo en el contenido de almidón (%).

Es crucial considerar el aporte de nutrientes, especialmente el potasio, en relación con el contenido de almidón. El potasio desempeña una función vital al estimular la enzima almidón sintasa, fundamental para la síntesis de almidón y el transporte de carbohidratos dentro de la planta (Koch *et al.*, 2020). Se ha observado que una dosis adecuada de fertilizante de potasio mejora las propiedades de cocción y procesamiento, el color del producto final y la calidad del almidón (Torabian *et al.*, 2021).

La aplicación de magnesio y potasio en nano fertilizantes mejora las relaciones de calcio, magnesio y potasio en la planta. Al respecto Koch *et al.*, (2020) menciona que la relación entre magnesio y potasio es importante para la partición de carbohidratos. El magnesio es esencial para la carga de sacarosa en el floema, y las deficiencias de magnesio pueden afectar negativamente tanto el rendimiento de tubérculos como la producción de almidón. Posiblemente el movimiento del calcio en el floema mejore cuando se aplique como nano partícula, aumentando la eficiencia fisiológica del mineral.

Los resultados encontrados en la investigación concuerdan con diferentes estudios que respaldan estos hallazgos. Zhao *et al.* (2014) investigaron los efectos de nano partículas de ZnO y CuO₂ en plantas de pepino (*Cucumis sativus*) y encontraron un aumento en el contenido de almidón y alteraciones en los carbohidratos de los frutos cuando se aplicaron nano fertilizantes a concentraciones de 400 ppm. Estos resultados sugieren que los nano fertilizantes pueden influir positivamente en la cantidad de almidón en diferentes cultivos.

Tabla 18. Prueba de comparación de medias de Tukey para porcentaje de almidón.

Tratamientos	Medias	
T0	6.10	a
T1	5.33	ab
T2	5.00	b

Nota. Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0,05$)

La aplicación futura de nano fertilizantes jugará un papel crucial en la mejora de la producción y calidad de los cultivos de papa, al reducir los costos de fertilización y mitigar los riesgos de contaminación del ecosistema. En un estudio reciente de Sohair EED, *et al.*, (2018) se demostró que la aplicación foliar de nano-NPK al 50% estuvo a la par con los tratamientos de control que utilizaban niveles recomendados de fertilizantes químicos NPK aplicados tanto por vía foliar como al suelo. En la mayoría de los casos estudiados, el nano 25% también mostró resultados comparables a los tratamientos de control utilizando fertilizantes químicos NPK en las cantidades recomendadas. Este éxito se debe a que los nano fertilizantes sincronizan la liberación de nitrógeno (N), fósforo (P) y potasio (K) con la absorción por parte de las

plantas. Esto detiene las pérdidas no deseadas de nutrientes en el suelo y el agua al ser adoptados directamente por las plantas, evitando la interacción de los nutrientes con el suelo, los microorganismos y el agua.

El rendimiento potencial de cualquier variedad de planta depende principalmente de su genética, pero este rendimiento puede mejorarse significativamente mediante prácticas agronómicas adecuadas, donde la gestión de la fertilización juega un papel fundamental. La aplicación de nano-NPK no solo impulsa la absorción de agua y nutrientes por parte de la planta, sino que también mejora el proceso de fotosíntesis. Se considera que el nano-NPK actúa como una "bomba biológica", facilitando la absorción de agua y nutrientes por las plantas, lo que aumenta el índice de cosecha y, como resultado, la producción de biomasa y rendimiento (Meena *et al.*, 2017).

Estos notables incrementos en productividad y calidad en el cultivo de la papa, resultado de la aplicación de nano fertilizantes foliares, se atribuyen a las características únicas de los nano fertilizantes: su tamaño pequeño y su alta área superficial. Estas características facilitan la eficiente absorción de nutrientes a través de los estomas de las hojas de papa y su rápida translocación Sohair EED, *et al.*, (2018).

Análisis Económico

Para llevar a cabo el análisis económico, se evaluaron indicadores clave como el costo/beneficio, la tasa interna de retorno y la tasa interna de oportunidad. Se consideró la inversión real utilizada en esta investigación para una hectárea de papa en Nariño, que fue de \$28.850.000, sin incluir los costos de los fertilizantes. Además, se tuvieron en cuenta los gastos asociados a cada uno de los tratamientos: el fertilizante convencional con un costo de \$11.150.000 (Tabla 19), el nano fertilizante al 100% con un valor de \$9.338.000 (Tabla 20), y para el nano fertilizante al 75%, un monto de \$7.003.500 (Tabla 21), todos correspondientes al año 2023 para todos los tratamientos. Estos datos se utilizaron para realizar un análisis detallado de la viabilidad económica de cada tratamiento, proporcionando una perspectiva valiosa sobre su rentabilidad en el contexto de la presente investigación.

Tabla 19. Costos de fertilizantes granulados para una hectárea de papa en Nariño, año 2023.

Producto	Kg ha ⁻¹	Valor kg	Valor total (COP)
13-26-6	1.250	5.000	6.250.000
10-20-20	1.000	4.900	4.900.000
TOTAL			11.150.000

Nota. Investigación (2023).

Tabla 20. Costos de nano fertilizantes con el 100% del análisis de suelos para una hectárea de papa en Nariño, año 2023.

Producto	Kg ha ⁻¹	Valor kg	Valor total (COP)
Triple 20-n	12	84.000	1.008.000
Fosfo-n	5	110.000	550.000
Calcio -n	27	105.000	2.835.000
12-12-36 -n	20	116.000	2.320.000
Micro -n	15	126.000	1.890.000
Silicio -n	1	210.000	210.000
Magno -n	5	105.000	525.000
TOTAL			9.338.000

Nota. Investigación (2023).

Tabla 21. Costos de nano fertilizantes con el 75% del análisis de suelos para una hectárea de papa en Nariño, año 2023.

Producto	Kg ha ⁻¹	Valor kg	Valor total (COP)
Triple 20-n	9	84.000	756.000
Fosfo-n	3,75	110.000	412.500
Calcio -n	20,25	105.000	2.126.250
12-12-36 -n	15	116.000	1.740.000
Micro -n	11,25	126.000	1.417.500
Silicio -n	0,75	210.000	157.500
Magno -n	3,75	105.000	393.750
TOTAL			7.003.500

Nota. Investigación (2023).

Relación costo/beneficio (C/B)

La variable de costo-beneficio se calculó utilizando los precios reales de venta del día 23 de agosto de 2023, establecidos por los comerciantes locales y diferenciados según el tamaño de los tubérculos: Calibre A (\$1.000.000 por tonelada), Calibre B (\$800.000 por tonelada), Calibre C (\$500.000 por tonelada) y Calibre D (\$100.000 por tonelada). El análisis detallado de costo-beneficio (Tabla 22) reveló la relación C/B más alta (1,41) para el tratamiento que empleó nano fertilizantes al 100% según el análisis del suelo. Esto significa que, por cada peso invertido, se recuperaron \$1,41 pesos. Por otro lado, el tratamiento que

generó la menor ganancia fue el de nano fertilizantes al 75% del análisis de suelo, con una relación beneficio-costo de 1,08, obteniendo una ganancia de \$0,8 pesos por cada peso invertido. Estos resultados subrayan la importancia de la dosificación precisa de los fertilizantes y su correlación directa con la rentabilidad del cultivo, proporcionando información valiosa para futuras decisiones agrícolas.

Tabla 22. Relación costo/beneficio.

Tratamientos	Costo total (COP)	Calibre	Rendimiento ton ha ⁻¹	Ingreso bruto por calibre (COP)	Ingreso bruto (COP)	Ingreso neto (COP)	Relación C/B
Fertilización Convencional	40.000.000	A	34,38	34.380.000	49.686.000	9.686.000	1,24
		B	14,41	11.528.000			
		C	7,09	3.545.000			
		D	2,33	233.000			
Nano fertilización (100%)	38.188.000	A	38,64	38.640.000	53.877.000	15.689.000	1,41
		B	14,53	11.624.000			
		C	6,62	3.310.000			
		D	3,03	303.000			
Nano fertilización (75%)	35.853.500	A	24,33	24.330.000	38.670.000	2.816.500	1,08
		B	14,12	11.296.000			
		C	5,8	2.900.000			
		D	1,44	144.000			

Nota. COP. Pesos colombianos, Investigación (2023)

Tasa Interna de Retorno (TIR)

Las cifras arrojadas para cada tratamiento son divergentes: con la fertilización convencional, el agricultor terminaría con una TIR del 24% (equivalente al 4% mensual) respecto a su inversión. En contraste, la nano fertilización al 100% proporcionaría una TIR del 41% (equivalente al 6,83% mensual), mientras que la nano fertilización al 75% mostraría una TIR del 8% (equivalente al 1,33% mensual) (Tabla 23).

De acuerdo con García-Santillán (2014), un proyecto se considera rentable si su TIR es igual o superior al 10%. En este contexto, para el año 2023, invertir en papa utilizando los tratamientos T0 y T1 fue rentable, siempre y cuando se haya obtenido igual o mayor producción y un precio de venta igual o superior. Sin embargo, el tratamiento T2 no resultó rentable en esta inversión, subrayando la importancia de analizar cuidadosamente los resultados obtenidos para tomar decisiones informadas sobre futuras

estrategias de cultivo. Estos hallazgos proporcionan una valiosa orientación para los agricultores al evaluar la rentabilidad de diferentes enfoques de fertilización en sus cultivos de papa.

Tasa Interna de Oportunidad (TIO)

La determinación de la Tasa Interna de Oportunidad (TIO) para el sistema de producción de papa, considerando el uso de fertilizante convencional, nano fertilizante al 100% y nano fertilizante al 75%, se llevó a cabo en base a la oferta de inversión del mercado, específicamente en relación con el Banco Agrario de Colombia en el año 2023.

Desde el análisis de la TIO, se puede afirmar que fue rentable invertir en un sistema de producción de papa tanto con fertilizante convencional como con nano fertilizante al 100%. Es importante señalar que la rentabilidad más alta se alcanzó con el nano fertilizante al 100%, que mostró una TIR del 41,08% (tabla 23). Esto representa un aumento significativo de 16,86 puntos porcentuales en comparación con el fertilizante convencional y 33,48 puntos porcentuales en comparación con el nano fertilizante al 75%. En contraste, si se hubiera optado por las ofertas de inversión bancaria, la utilidad habría sido menor, independientemente del tipo de oferta seleccionada, ya sea DTF o CDT.

Es crucial destacar que las rentabilidades de los tratamientos 0 y 1 superan considerablemente las ofertas bancarias. Sin embargo, el tratamiento 2 se encuentra por debajo de la TIO del Banco Agrario, lo que indica que hubiera sido más beneficioso colocar el dinero en un banco en lugar de invertirlo en el cultivo de papa.

En relación con las ofertas de inversiones bancarias en el Banco Agrario de Colombia, se manejó un plan de inversión que osciló entre \$450.000 y \$49.000.000 durante un período de 180 a 359 días, con una tasa de interés ofrecida en el año 2023 del 11,10%. Esto se traduce en una utilidad mensual del 1,85%. Además, la oferta de DTF por parte del Banco Agrario de Colombia, con una duración de 180 días en el mismo año, ofreció una rentabilidad mensual del 2,24%. Estos datos son esenciales para contextualizar las decisiones de inversión y ayudan a los agricultores a tomar decisiones financieras informadas sobre sus cultivos de papa.

El autor Ghezzi (2019) señala aspectos positivos que respaldan la inversión ofrecida por los bancos. Esta inversión no es fácilmente comparable con la agricultura, ya que invertir en el mercado financiero no implica ningún tipo de riesgo de pérdidas debido al respaldo proporcionado por las entidades financieras. En contraste, en la agricultura, no existen garantías y existe la posibilidad de perder toda la inversión. Este riesgo está presente debido a condiciones climáticas adversas que pueden afectar el cultivo, es decir, eventos externos al proceso productivo. Además, problemas fitosanitarios pueden

reducir la producción e incluso anularla, siendo clasificados por el autor como riesgos sistémicos. También es importante considerar que la rentabilidad puede ser afectada por el costo de venta de la producción, lo que añade una capa adicional de complejidad a la toma de decisiones en el sector agrícola. Estos factores subrayan la necesidad de una cuidadosa evaluación de riesgos y consideraciones financieras al decidir entre inversiones agrícolas y financieras.

Tabla 23. Tasa Interna de Retorno (TIR) y Tasa interna de oportunidad (TIO).

Tratamiento	Costo total (COP)	TIR	TIO	
			DTF 13,47	CDT 11,10
Fertilización Convencional	40.000.000	24%	5.388.000	4.440.000
Nano fertilización (100%)	38.188.000	41%	5.143.924	4.238.868
Nano fertilización (75%)	35.853.500	8%	4.829.466	3.979.738

Nota. COP. Pesos colombianos, Investigación (2023).

CONCLUSIONES

1. El mayor rendimiento total (calibre A, B, C y D) para el cultivo de papa Var. Diacol Capiro se obtuvo con el tratamiento 1 (nano fertilizante 100% del análisis de suelo) con 62 ton ha⁻¹
2. La aplicación del 100% de nano fertilizante de acuerdo con el análisis de suelo presentó el mayor promedio en el rendimiento de calibre A con 38.636 kg ha⁻¹ debido a la eficiencia nutricional de las nano partículas.
3. El mayor porcentaje de materia seca se encontró con la aplicación del 75% de nano fertilizante con un promedio del 22%.
4. Con la aplicación del 100% de nano fertilizante se encontró valores promedios óptimos de gravedad específica con 1,08 grcc⁻¹, resultado requerido para procesos industriales.
5. La variable porcentaje de almidón no mostró diferencias significativas entre fertilizantes convencionales T0 (6,1%) y nano fertilizantes T1 (5,33%), evidenciando que los nano fertilizantes aplicados al 100% de acuerdo con el análisis de suelo y requerimiento de la planta podrían superar e incrementar el contenido de almidón.
6. La aplicación de nano fertilizantes al 100% en base a la disponibilidad de nutrientes del suelo obtuvo la mejor relación costo-beneficio de 1,41 y tasa interna de retorno con el 41%.

RECOMENDACIONES

1. Continuar evaluando la aplicación de diferentes dosis de nano fertilizantes en las diferentes fases fenológicas del cultivo de papa.
2. Realizar curvas de extracción de nutrientes con la aplicación de nano partículas.
3. Realizar curvas de absorción de nutrientes con la aplicación de nano partículas.

BIBLIOGRAFÍA

- Abd El-Azeim, M., Sherif, M., Hussien, M., Tantawy, I & Bashandy, S. (2020). Impacts of nano- and non-nanofertilizers on potato quality and productivity. *Acta Ecológica Sinica*. Volumen 40, Issue 5, Pages 388-397 <https://doi.org/10.1016/j.chnaes.2019.12.007>
- Adhikari, Tapan, Kundu, Samaresh, Meena, Vasudeb and Subba, R. Anangi. (2011). Utilization of Nano Rock Phosphate by Maize (*Zea mays L.*) Crop in a Vertisol of Central India. *Journal of Agricultural Science and Technology*. 4(1): 384- 394
- Ahmadian, K., Jalilian, J y Pirzad, A. (2021). Nano-fertilizers improved drought tolerance in wheat under deficit irrigation. *Agricultural Water Management* [en línea]. Febrero del, vol. 244, p. 1-13. [Fecha de consulta: 24 de mayo del 2021]. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2020.106544>
- Amirnia, R. Bayat, M. & Tajbakhsh, M. (2014). Efectos de la aplicación de nano fertilizantes y el peso materno del cormo sobre la floración en algunos ecotipos de azafrán (*Crocus sativus L.*). *Revista turca de cultivos de campo*, 19 (2), 158-168. <https://doi.org/10.17557/tjfc.46269>
- Arizala, M. Monsalvo, A. Betancourth, C. Salazar, C. Lagos T. (2011). Evaluación de solanaceas silvestres como patrones de lulo (*Solanum quitoense lam*) y su reacción a *Fusarium* sp. Facultad de Ciencias Agrícolas, Universidad de Nariño, Pasto – Colombia.
- Azpeitia, H. (2022). Evaluación de calcio, silicio y nanopartículas de hidroxapatita sobre la calidad de higo (*Ficus carica L.*) producido en dos densidades, en invernadero. (Tesis de posgrado). Universidad Autónoma de Nuevo León. <http://eprints.uanl.mx/23989/1/1080328562.pdf>
- Cañas, J. (2020). Nuevas tecnologías para el manejo eficiente de fertilizantes en la agricultura y su aplicabilidad al territorio colombiano. Universidad de Antioquia. Facultad de Ingeniería. https://bibliotecadigital.udea.edu.co/bitstream/10495/15419/1/ParraJenny_2020_RecursoHidricoFertilizacion.pdf
- Callejas, D. Bonifacio, A. (2020). Variables relacionadas con la calidad culinaria de la papa amarga *Solanum Juzepczukii* y *Solanum curtilobum*. Facultad de Agronomía, Universidad Mayor de San Andrés. Bolivia.
- Colombia Fedepapa, Federación Colombiana de Productores de papa. (2020). Boletín regional N°05. Recuperado de: <https://fedepapa.com/wp-content/uploads/2021/09/NACIONAL2020.pdf>

- Colombia Fedepapa, Federación Colombiana de Productores de Papa. (2021). Boletín Regional Nariño. Vol. 5. Bogotá.
- Colombia Gobernación de Nariño. (2020). Plan departamental de extensión agropecuaria del departamento de Nariño 2020-2023. San Juan de Pasto, Colombia
- Colombia MADR, Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural. (2021). Cadena de la papa.
- Contextoganadero. (2019, 30 agosto). Conozca los 7 tipos de suelos que hay en Colombia. Contextoganadero. <https://www.contextoganadero.com/ganaderia-sostenible/conozca-los-7-tipos-de-suelos-que-hay-en-colombia>
- Contreras, MR. (2017). “Determinación de la relación entre el contenido de almidón y materia seca con la gravedad específica de cinco variedades de papa (*Solanum tuberosum*)”. En la Universidad Nacional del Centro de Perú. Trabajo de grado para optar al Título Profesional de Ingeniero en Industrias Alimentarias. Huancayo – Perú. 17-18 p.
- Cargua, B. (2022). Desarrollo de un fertilizante nano-micro-particulado con poliacrilamida-NPK: Efecto sobre el rendimiento de papa chaucha (*Solanum tuberosum*, grupo *Phureja*) en cultivos urbanos. (Tesis de posgrado). <http://www.dspace.uce.edu.ec/handle/25000/30266>
- Delgado, G. (2014). Nanotechnology in Mexico: global trends and national implications for policy and regulatory issues. *Technology in Society* 37: 4-15. Doi: 10.1016/j.techsoc.2013.09.005
- Eichert, T. Kurtz, A. Steiner, U. Goldbach, H. (2008). Size exclusion limits and lateral heterogeneity of the stomatal foliar uptake pathway for aqueous solutes and water-suspended nanoparticles. *Physiologia Plantarum* 134(1): 151- 160. Doi: 10.1111/j.1399-3054.2008. 01135.x
- Federación Colombiana de Productores de Papa. Fedepapa. (2020). Boletín regional Nariño. <https://fedepapa.com/wp-content/uploads/2021/09/NARINO-2019.pdf>
- Flores, S., Casimiro, M., Sotelo, E., Rubio, O., López, H. (2021). Fertilización NPK, distribución de biomasa y número de minitubérculos de papa en invernadero. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*. vol.11 no.8 https://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2007-09342020000801827

- Foladori, G. (2013). Nanotecnología: gestión y reglamentación de riesgos para la salud y medio ambiente en América Latina y el Caribe. *Trabalho, Educação e Saúde* 11(1): 145-167. Doi:10.1590/S1981-77462013000100009
- Franco, A. (2022). Cultivo de Papa en Nariño. <https://es.scribd.com/document/520052859/Cultivo-de-Papa-en-Narino>
- Freshplaza. (2021). El sector colombiano de la papa mantiene buenas proyecciones para 2021. [https://www.freshplaza.es/article/9327884/elsectorcolombianodelapapamantienebuenasproyeccionespara2021/#:~:text=En%202020%2C%20Colombia%20export%C3%B3%201.776,%25\)%20y%20Panam%C3%A1%20\(5%25\).](https://www.freshplaza.es/article/9327884/elsectorcolombianodelapapamantienebuenasproyeccionespara2021/#:~:text=En%202020%2C%20Colombia%20export%C3%B3%201.776,%25)%20y%20Panam%C3%A1%20(5%25).)
- García-Santillán, A. (2014). Matemáticas financieras para la toma de decisiones. Universidad de Málaga Edición, 783. <https://www.eumed.net/libros-gratis/2014/1406/1406.pdf>
- Ghezzi, T. A. (2019). Análisis de la pluriactividad de una empresa agropecuaria del departamento de Quemú Quemú (La Pampa). <https://repo.unlpam.edu.ar/handle/unlpam/1534>
- Holdrige, L. R. (1967). Ecología basada en zonas de vida. Instituto interamericano de cooperativa para la agricultura
- Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM, 2022). <http://www.ideam.gov.co>
- Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM, 2023). Cambio Climático. Ministerio de Medio Ambiente. <http://www.ideam.gov.co>
- Jerez E, Martin R, y Morales D. (2017). Evaluation of growth and composition by size of tubers from potato plants for seed. *Cultivos Tropicales*, vol. 38, núm. 4, pp. 102-110, 2017. Instituto Nacional de Ciencias Agrícolas.
- Kurepa, J. Paunesku, T. Vogt, S. Arora, H. Rabatic, B. Lu, J. Smalle, J. (2010). Uptake and distribution of ultrasmall anatase TiO₂ Alizarin Red S nanoconjugates in *Arabidopsis thaliana*. *Nano Letters* 10(7): 2296-2302. Doi: 10.1021/nl903518f
- Koch, M., Naumann, M., Pawelzik., Gransee, A & Thiel, H. (2020). The Importance of Nutrient Management for Potato Production Part I: Plant Nutrition and Yield. *Potato Research*. 63, 97–119 <https://doi.org/10.1007/s11540-019-09431->

- Lira, R. Bulmaro, M. De los santos, G & Vera, I. (2018). Potencial de la nanotecnología en la agricultura. Acta Universitaria, vol. 28, núm. 2, pp. 9-24. Universidad de Guanajuato. DOI: <https://doi.org/10.15174/au.2017.1575>.
- Luna, R. Espinosa, K. Trávez. Ulloa, C. Espinoza, A & Bejarano, A. (2016). Respuesta de variedades de papa (*Solanum tuberosum*, L) a la aplicación de abonos orgánicos y fertilización química. Ciencia y Tecnología. 2016. 9(1):11-16.
- Martínez, FA. (2009). Caracterización morfológica e inventario de conocimientos colectivos de variedades de papas nativas (*Solanum tuberosum*) en la provincia de Chimborazo. Tesis Lic. Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, Riobamba Ecuador. 72 p.
- Meena, D., Gautam, C., Patidar, Meena, H. Prakasha G. and Vishwajith. (2017). Nanofertilizers is a New Way to Increase Nutrients Use Efficiency in Crop Production. International Journal of Agricultural Sciences, 9(7), 3831-3833. https://www.researchgate.net/publication/344318260_Nano-Fertilizers_is_a_New_Way_to_Increase_Nutrients_Use_Efficiency_in_Crop_Production
- Melian, DE. (2010). Ensayo comparativo de dos metodologías de extracción de almidón de papa usando muestras de diez variedades nativas de Chiloé y dos variedades comerciales. Tesis Lic. Valdivia, Chile. Universidad Austral de Chile. 33 p.
- Méndez B., Lira, R., Ruiz-Torres, N.A., Cárdenas, A., Ponce, R., Vera, I. Mendoza, E., García, L., De los Santos Villarreal, G. (2015). Influencia de nanopartículas de óxido de zinc puras y dopadas con plata en el crecimiento y producción de biomasa en plántulas de chile. XVI Congreso Nacional de Biotecnología 21-26 de junio de 2015. Guadalajara, Jal., México.
- Méndez, B., Lira, R & Vera. I. (2016). Respuestas fisiológicas de plantas cultivadas en bioespacios por efecto de nano fertilizantes y zeolita. <http://ciqa.repositorioinstitucional.mx/jspui/handle/1025/333>
- Méndez, L. (2006). Crecimiento, desarrollo y producción de un cultivo de papa (*Solanum tuberosum ssp. andigena*) variedad Diacol Capiro (R12), en los municipios de Bojacá y Sopo (Cundinamarca). (Tesis de pregrado). Pontificia Universidad Javeriana. <https://repository.javeriana.edu.co/bitstream/handle/10554/55942/CULTIPAPA.pdf?sequence=>
- Moreno, E. (2012). Alcaldía Municipal de Pupiales. Plan de desarrollo “es tiempo de avanzar” 2012-2015.

- Muñoz, L. & Lucero, A. (2008). Efecto de la fertilización orgánica en el cultivo de papa criolla *Solanum phureja*. Rev. Agron. colomb. vol.26 no.2 Bogotá July/Dec. Recuperado de:
- Nair, R. Varghese, S. Nair, B. Maekawa, T. Yoshida, Y & Kumar, D. (2010). Nanoparticulate material delivery to plants. Plant Science 179(3): 154-163. Doi: 10.1007/s12571-012-0168-1
- Norma Técnica Colombiana - NTC 341:2018. Industria alimentaria Papa para consumo. especificaciones. <https://tienda.icontec.org/gp-industria-alimentaria-papapara-consumo-especificaciones-ntc341-2018.html>
- Novoa, M., Miranda, D., y Melgarejo, L. (2018). Efecto de las deficiencias y excesos de fósforo, potasio y boro en la fisiología y el crecimiento de plantas de aguacate (*Persea americana*, cv. Hass). <http://www.scielo.org.co/pdf/rcch/v12n2/2011-2173-rcch-12-02293.pdf>
- Ñustez, (2010). Diacol Capiro. Centro Internacional de la papa. CIP. <https://cipotato.org/papaenecuador/2017/10/12/24-diacol-capiro/>
- ONU. Organización de las Naciones Unidas. (2019). La población mundial sigue en aumento, aunque sea cada vez más vieja. Recuperado de: <https://news.un.org/es/story/2019/06/1457891>
- Palacios, C. Jaramillo, S. Gonzales, L. & Cotes, J. (2008). Efecto de la fertilización sobre la calidad de la papa para procesamiento en dos suelos antioqueños con propiedades ándicas. Rev.
- Peñaloza, J., Reyes, A., González, A., Pérez, D. & Sangerman, D. (2020) Fertilización orgánica con tres niveles de gallinaza en cuatro cultivares de papa. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*. vol.10 no.5. <https://doi.org/10.29312/remexca.v10i5.1759>
- Pérez, L., Rodríguez, L. y Gómez, M. (2008). Efecto del fraccionamiento de la fertilización con N, P, K y mg y la aplicación de los micronutrientes B, Mn y Zn en el rendimiento y calidad de papa criolla (*Solanum phureja*) variedad Criolla Colombia. *Agronomía Colombiana* vol.26 no.3. http://www.scielo.org.co/scielo.php?pid=S0120-99652008000300013&script=sci_arttext
- Porras PD, Herrera CA. (2015). Modelo productivo de la papa variedad Diacol Capiro para el departamento de Antioquia. Mosquera, Colombia: [Corpoica] Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria.
- Porras C, Brenes A. (2015). Calidad de tubérculos y rendimientos de híbridos de papa. Centro para Investigaciones en Granos y Semillas, Universidad de Costa Rica. San José, Costa Rica.

- Punina, E. (2013). "Evaluación agronómica del cultivo de papa (*Solanum tuberosum*) C.V. "fripapa" a la aplicación de tres abonos completos". Trabajo de investigación estructurado de manera independiente como requisito para optar el título de Ingeniera Agrónoma. Universidad Técnica De Ambato. Facultad De Ciencias Agropecuarias. Ambato - Ecuador.
- Rahman, M., Hasan, M., & Khan. (2021). Study on different nano fertilizers influencing the growth, proximate composition, and antioxidant properties of strawberry fruits. *Journal of Agriculture and Food Research*, Vol. 6.
- Rai, V. Acharya, S. Dey, N. (2012). Implications of nanobiosensors in agriculture. *Journal of Biomaterials and Nanobiotechnology* 3: 315-324. Doi: 10.4236/jbnt.2012.322039
- Raliya, R. Biswas, P. & Tarafdar, J. (2015). Biosíntesis de nanopartículas de TiO₂ y su efecto fisiológico en frijol mungo (*Vigna radiata* L.). *Informes de biotecnología*, 5, 22-26. <https://doi.org/10.1016/j.btre.2014.10.009>
- Rico, C. Majumdar, S. Duarte, M. Peralta, J. Gardea, L. (2011). Interaction of nanoparticles with edible plants and their possible implications in the food chain. *Journal of Agricultural and Food Chemistry* 59(8): 3485-3498. Doi: 10.1021/jf104517j
- Romero, B; Garnica AM. (2009). Caracterización de clones promisorios de papa (*Solanum tuberosum* subespecie *andigenum*) por su potencial para la producción de almidones nativos. Trabajo de grado. Bogotá D.C. Colombia. Universidad de La Salle. 125 p.
- Salama H. (2012) Effects of silver nanoparticles in some crop plants, common bean (*Phaseolus vulgaris* L.) and corn (*Zea mays* L.). *Int. Res. J. Biotechnol.* 3(10): 190-197.
- Sánchez M. Meza R. (2015). Evaluation of potato crop yield under the application of deficit irrigation (PRD) using irrigation tapes. Universidad Nacional Agraria La Molina, Lima - Perú. DOI: <http://dx.doi.org/10.21704/ac.v76i1.760>
- Sohair EED, Abdall AA, Amany AM, Faruque HMd, Houda RA (2018) Evaluation of Nitrogen, Phosphorus and Potassium Nano-Fertilizers on Yield, Yield Components and Fiber Properties of Egyptian Cotton (*Gossypium Barbadosense* L.). *J Plant Sci Crop Protec* 1(3): 302
- Tarafdar, J. Raliya, R. Mahawar, H. & Rathore, I. (2014). Desarrollo de nano fertilizantes de zinc para mejorar la producción de cultivos de mijo perla (*Pennisetum americanum*). *Investigación Agrícola*, 3(3), 257-262. <https://doi.org/10.1007/s40003-014-0113-y>

- Tinjacá S, Rodríguez LE. (2015). Catálogo de papas nativas de Nariño Colombia. Universidad Nacional de Colombia Facultad de Ciencias Agrarias, Sede Bogotá. Bogotá. 2015. 84 p.
- Torabian, S., Farhangi-Abriz, S., Qin, R., Noulas, C., Sathuvalli, V., Charlton, B & Loka, D. (2021). Potassium: A Vital Macronutrient in Potato Production—A Review. *Agronomy*, 11(3), 543; <https://doi.org/10.3390/agronomy11030543>
- Troccoli, L & Guillen, T. (2022). Elaboración y Caracterización de un Nano fertilizante Urea-Hidroxiapatita para reducir aplicaciones de Nitrógeno en Cultivos Agrícolas. (Tesis de posgrado). Universidad Estatal de Milagro. <http://repositorio.unemi.edu.ec/xmlui/handle/123456789/6538>
- Valbuena R, Bolaños A, Zapata J, Almanza P, Porras P. (2010). Escalas fenológicas de las variedades de papa Parda Pastusa, Diacol Capiro y Criolla “Yema de Huevo” en las zonas productoras de Cundinamarca, Boyacá, Nariño y Antioquia. Bogotá: Corpoica.
- Weather Spark (2023). El clima y el tiempo promedio en todo el año en Pupiales. Colombia. <https://es.weatherspark.com/y/20623/Clima-promedio-en-Pupiales-Colombia-durante-todo-el-a%C3%B1o>
- Zhao, L., Peralta-Videa, J., Rico, C., Hernandez-Viezcas, J., Sun, Y., Niu, G. y Gardea J. (2014). CeO₂ and ZnO nanoparticles change the nutritional qualities of cucumber (*Cucumis sativus*). *Journal of agricultural and food chemistry*, 62(13), 2752- 2759.
- Zurita, J. & Morales, J. (2021). Efecto del uso de nano fertilizantes e hidroretenedores en el cultivo de zanahoria (*Daucus carota* L.) (Tesis de pregrado). <https://repositorio.uta.edu.ec/jspui/handle/123456789/33822>