



# UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO

FACULTAD DE CIENCIAS AGROPECUARIAS

MAESTRÍA EN AGRONOMÍA

MENCIÓN NUTRICIÓN VEGETAL

PROYECTO DE INVESTIGACIÓN PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL  
GRADO ACADÉMICO DE MAGISTER

**Tema:** “Evaluación del efecto de fertilización con dos fuentes de calcio en el  
rendimiento de la papa (*Solanum tuberosum*)”

**Autor:** Ing. Katherine Gabriela Valenzuela Coba

**Director:** Ing. Rita Cumandá Santana Mayorga, M. Sc.

AMBATO – ECUADOR

2023

A la Unidad Académica de Titulación de la Facultad de Ciencias Agropecuarias

El Tribunal receptor del Trabajo de Investigación presidido por el Ing. Oscar Patricio Núñez Torres Ph.D, e integrado por los señores: Ingenieros designados por la Unidad Académica de Titulación de la Facultad de Ciencias Agropecuarias de la Universidad Técnica de Ambato, para receptor el Trabajo de Titulación con el tema: “Evaluación del efecto de fertilización con dos fuentes de calcio en el rendimiento de la papa (*Solanum tuberosum*)” aprobado por la Unidad Académica de Titulación, elaborado y presentado por la señora Ingeniera Katherine Gabriela Valenzuela Coba, para optar por el Grado Académico de Magister en Agronomía Mención Nutrición Vegetal y una vez escuchada la defensa oral Trabajo de Investigación el Tribunal aprueba y remite el trabajo para uso y custodia en las bibliotecas de la UTA.

---

Ing. Oscar Patricio Núñez Torres Ph.D  
**Presidente y Miembro del Tribunal**

---

Ing. David Guerrero, Mg.  
**Miembro del Tribunal**

---

Ing. Carlos Vásquez, Ph.D.  
**Miembro del Tribunal**

## **AUTORÍA DEL TRABAJO DE INVESTIGACIÓN**

La responsabilidad de las opiniones, comentarios y críticas emitidas en el Trabajo de Investigación, presentado con el tema: **“Evaluación del efecto de fertilización con dos fuentes de calcio en el rendimiento de la papa (*Solanum tuberosum*)”**, le corresponde exclusivamente a: Ingeniera Katherine Gabriela Valenzuela Coba, autora bajo la Dirección de la Ingeniera Rita Cumandá Santana Mayorga, M. Sc., Directora del Trabajo de Investigación y el patrimonio intelectual a la Universidad Técnica de Ambato.

---

Ing. Katherine Gabriela Valenzuela Coba

C.C. 0401814694

**AUTORA**

---

Ing. Rita Cumandá Santana Mayorga, M. Sc.

C.C. 1803690971

**DIRECTORA**

## **DERECHOS DE AUTOR**

Autorizo a la Universidad Técnica de Ambato, para que el Trabajo de Investigación, sirva como un documento disponible para su lectura, consulta y procesos de investigación, según las normas de la Institución.

Cedo los Derechos de mi trabajo, con fines de difusión pública, además apruebo la reproducción de este, dentro de las regulaciones de la Universidad.

---

Ing. Katherine Gabriela Valenzuela Coba

C.C. 0401814694

**AUTORA**

## ÍNDICE GENERAL

AUTORÍA DEL TRABAJO DE INVESTIGACIÓN .....	iii
ÍNDICE GENERAL .....	v
ÍNDICE DE FIGURAS .....	viii
DEDICATORIA .....	ix
AGRADECIMIENTO .....	x
RESUMEN EJECUTIVO .....	xi
ABSTRACT .....	xiii
CAPÍTULO I .....	1
EL PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN .....	1
1.1. Introducción .....	1
1.2. Justificación .....	2
1.3. Objetivos .....	2
CAPÍTULO II .....	3
ANTECEDENTES INVESTIGATIVOS .....	3
2.1. Antecedentes investigativos .....	3
2.2. El cultivo de papa: características e importancia económica .....	6
2.2.1. Cultivo de papa: etapas fenológicas .....	6
2.2.2. Características generales de la variedad Super Chola .....	6
2.3. Requerimientos nutricionales del cultivo .....	7
2.3.1. Fertilización: macro y micronutrientes .....	7
2.3.2. Macronutrientes Secundarios .....	7
2.3.3. El papel del calcio en la nutrición de la planta .....	8
CAPÍTULO III .....	14
MARCO METODOLÓGICO .....	14
3.1. Ubicación del ensayo .....	14
3.2. Equipos y materiales .....	14
3.3. Tipo de investigación .....	14
3.4. Prueba de hipótesis .....	15
3.5. Recolección de la información .....	15
3.6. Variables respuesta .....	16

3.7.	Procesamiento de la información y análisis estadístico .....	17
	CAPÍTULO IV .....	18
	RESULTADOS Y DISCUSIÓN .....	18
4.1.	Efecto de la aplicación de dos fuentes de calcio en el peso de los tubérculos de papa 18	
	Figura 3. Peso promedio de los tubérculos de papa variedad Super Chola por efecto de la fuente de calcio .....	19
4.2.	Contenido de calcio en cáscara de papa.....	24
	CAPÍTULO V .....	26
	CONCLUSIONES, RECOMENDACIONES, BIBLIOGRAFÍA.....	26
5.1.	Conclusiones .....	26
5.2.	Recomendaciones .....	26
5.3.	Bibliografía .....	27
	Anexos.....	33
	1. Análisis estadístico .....	34
	2. Fotos del ensayo .....	45

## ÍNDICE DE TABLAS

<b>Tabla 1.</b> Clasificación de los tubérculos de papa de acuerdo con el peso .....	16
<b>Tabla 2.</b> Altura de plantas de papa variedad Super Chola tratadas con dos fuentes de calcio .....	18
<b>Tabla 3.</b> Categorización de los tubérculos de papa variedad Super Chola del tratamiento control.....	20
<b>Tabla 4.</b> Categorización de los tubérculos de papa variedad Super Chola fertilizadas con nitrato de calcio .....	21
<b>Tabla 5.</b> Categorización de los tubérculos de papa variedad Super Chola fertilizadas con sulfato de calcio .....	22

## ÍNDICE DE FIGURAS

<b>Figura 1</b> Funciones del calcio en la planta .....	9
<b>Figura 2</b> Descripción de la absorción del $\text{Ca}^{2+}$ , donde muestra que el elemento es absorbido por la raíz y transportado al brote de forma principalmente apoplásica. Para evadir las Bandas de Caspari (banda roja), tiene que ingresar al citosol de las células endodérmicas (que se muestran en azul) y posteriormente moverse al apoplasto a través de $\text{Ca}^{2+}$ -ATPasas o antiportadores de $\text{Ca}^{2+}/\text{H}^+$ (líneas naranja).....	10
<b>Figura 3</b> Características de la unidad experimental.....	15
<b>Figura 4</b> <i>Peso promedio de los tubérculos de papa variedad Super Chola por efecto de la fuente de <math>\text{Ca}^{2+}</math></i> .....	19
<b>Figura 5</b> Categorías de tubérculos de papa variedad Super Chola de acuerdo al peso en el tratamiento control.....	20
<b>Figura 6</b> Categorías de tubérculos de papa variedad Super Chola de acuerdo al peso en plantas tratadas con nitrato de calcio .....	21
<b>Figura 7</b> Categorías de tubérculos de papa variedad Super Chola de acuerdo al peso en plantas tratadas con sulfato de calcio .....	22
<b>Figura 8</b> Rendimiento de plantas de papa variedad Super Chola tratadas con dos fuentes de $\text{Ca}^{2+}$ .....	23
<b>Figura 9</b> Variación en el contenido de $\text{Ca}^{2+}$ en cáscaras de tubérculos de papa variedad Super Chola tratados con dos fuentes de calcio.....	24
<b>Figura 10.</b> Toma de datos sobre altura de planta.....	45



## DEDICATORIA

### “El creador del cielo se fijó en mí ”

A ti Dios, por tus bendiciones, por cada decisión que me permitiste tomar en mi vida, por cada paso, por cada cambio, por cada persona que como ángeles pusiste en mi camino, por el amor que me demuestras día a día.

A mi hijo Galy Alejandro por ser mi fortaleza, mi motor y mi mayor inspiración, a mi amado esposo Galo por ser mi compañero de vida, por todo el esfuerzo, paciencia y amor que tiene con nosotros.

A mi abuela por estar siempre conmigo, por ser mi segunda madre, compañera y confidente, por alentarme siempre para cumplir mis sueños, a mi familia materna quienes me brindaron su apoyo incondicional compartiendo momentos de felicidad durante mi vida profesional.

A mi madre por su ejemplo de trabajo, perseverancia y amor, a mi padre quien con cariño y firmeza me exigía ser cada día mejor, ellos siendo mi razón de vida han sido mi apoyo fundamental para llegar a ser lo que siempre anhele.

A mi mejor amiga Paola, quién creyó en mí desde el primer día de prepo, con quien compartí mi vida de universidad, ahora colega, quien me brinda amor, apoyo y confianza en todo momento, por ser como una hermana, una mujer guerrera inspiradora, por sus palabras, consejos de seguir luchando por lo quiero, por enseñarme a defender mis sueños y a trabajar por ellos, la vida me premio contigo.

A mi segunda familia Ambateña, por todo el amor que me brindaron, por cada consejo, apoyo, e interés en mi bienestar y felicidad

## **AGRADECIMIENTO**

**“La gratitud es el don máspreciado de las almas nobles”**

Gracias Dios por guiar mis pasos durante el cumplimiento de mis sueños y objetivos.

A mi abuela materna por siempre apoyarme, brindarme amor y darme las fuerzas necesarias para seguir luchando en mi camino.

A mis padres y hermanos por ser el pilar fundamental para la culminación de mis estudios.

A los docentes de la Carrera de Ingeniería Agronómica que con esfuerzo, responsabilidad y dedicación impartieron conocimientos fundamentales en mi formación académica.

De manera especial a mi tutora, Ing. Rita Santana, quien me ha brindado su apoyo para cumplir mi objetivo y también por ser mi guía en mi trabajo de investigación para que este se realice con éxito.

Son muchas las personas que han formado parte de mi vida profesional a las que me encantaría agradecerles su amistad, consejos, apoyo, ánimo y compañía, en especial a las “K” con quien hice una amistad sin límites, personas maravillosas que compartí muchos momentos felices en mi vida.

**UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO**  
**FACULTAD DE CIENCIAS AGROPECUARIAS/ DIRECCIÓN DE POSGRADO**  
**PROGRAMA DE MAESTRÍA EN AGRONOMÍA MENCIÓN NUTRICIÓN**  
**VEGETAL**

**INFORMACIÓN GENERAL**

**TEMA:** Evaluación del efecto de fertilización con dos fuentes de calcio en el rendimiento de la papa (*Solanum tuberosum*)

**AUTOR:** Ing. Katherine Gabriela Valenzuela Coba.

**DIRECTOR:** Ing. Rita Cumandá Santana Mayorga, M. Sc.

**RESUMEN EJECUTIVO**

La papa (*Solanum tuberosum*) es el cuarto cultivo alimenticio a nivel mundial y en Ecuador es considerado uno de los principales alimentos para las familias de la zona Sierra Ecuatoriana. La presente investigación tuvo como objetivo evaluar el efecto de fertilización con dos fuentes de calcio en el rendimiento de la papa variedad Super Chola. En el experimento se evaluaron dos fuentes de calcio (Nitrato de Calcio y Sulfato de Calcio) y su efecto sobre la altura de planta, peso fresco y seco de tubérculos, rendimiento y contenido de calcio en la cáscara de tubérculos de papa. La altura de planta se midió a los 30, 60, 90 y 120 días después de la siembra, mientras que el resto de las variables fueron evaluadas al momento de la cosecha. A los 30 y 90 días dds la mayor altura fue alcanzada por plantas de papa fertilizadas con nitrato de calcio, seguido de las plantas tratadas con sulfato de calcio. Con relación al peso de los tubérculos, no se observaron diferencias significativas por efecto de la fuente de calcio aplicada, pero las plantas tratadas con nitrato de calcio produjeron tubérculos con mayor peso fresco (86.7 g), seguido de aquellos obtenidos de plantas tratadas con sulfato de calcio (77.8 g). Aunque el rendimiento de las plantas de papa variedad Super Chola no fue significativamente afectado por la fuente de calcio utilizada, ambas fuentes provocaron mayor rendimiento cuando fueron comparadas con las plantas del tratamiento testigo. El contenido de  $\text{Ca}^{2+}$  en la cáscara de los tubérculos de papa varió entre los tratamientos, siendo mayor en tubérculos obtenidos de plantas tratadas con nitrato y sulfato de calcio, alcanzando valores de 0.201 y 0.197%, respectivamente. El rendimiento y

contenido de  $\text{Ca}^{2+}$  de la cáscara fue mejorado por el uso de dos fuentes de este nutriente junto con la fertilización adicional a los fertilizantes a base de NPK, por lo que se recomienda su inclusión en programas de fertilización.

**Palabras clave:** calcio, fertilización, papa, Super Chola

## ABSTRACT

The potato (*Solanum tuberosum*) is the fourth largest food crop worldwide and in Ecuador it is considered one of the main foods for families in the Ecuadorian Sierra area. The objective of this research was to evaluate the effect of fertilization with two sources of calcium on the yield of the Super Chola variety potato. In the experiment, two sources of calcium (Calcium Nitrate and Calcium Sulfate) and their effect on plant height, fresh and dry weight of tubers, yield and calcium content in the peel of potato tubers were evaluated. Plant height was measured at 30, 60, 90 and 120 days after sowing, while the rest of the variables were evaluated at the time of harvest. At 30 and 90 days after, the highest height was reached by potato plants fertilized with calcium nitrate, followed by plants treated with calcium sulfate. Regarding the weight of the tubers, no significant differences were observed due to the effect of the calcium source applied, but the plants treated with calcium nitrate produced tubers with a higher fresh weight (86.7 g), followed by those obtained from plants treated with sulfate. of calcium (77.8 g). Although the yield of the Super Chola variety potato plants was not significantly affected by the calcium source used, both sources caused greater yield when compared to the control treatment plants. The calcium content in the peel of potato tubers varied with the treatment, being higher in tubers obtained from plants treated with calcium nitrate and sulfate, reaching values of 0.201 and 0.197%, respectively. The yield and calcium content were improved by the use of calcium as sources of additional fertilization to NPK-based fertilizers, which is why its inclusion in fertilization programs is recommended.

**Keywords:** calcium, fertilization, potato, Super Chola

# CAPÍTULO I

## EL PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN

### 1.1. Introducción

La papa, *Solanum tuberosum* subsp. *tuberosum* y *Solanum tuberosum* subsp. *andigena* y otras siete especies relacionadas son cultivadas en diferentes zonas climáticas, incluyendo regiones templadas, subtropicales y tropicales donde predominan diversas condiciones y socioeconómicas (Askew, 2001). Entre los principales productores se incluyen China, India, Rusia, Ucrania, Estados Unidos y Alemania con el 24,0; 13,1; 5,8; 5,3; 5,0 y 2,8% de la producción mundial (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura, 2023).

La papa es una de las especies cultivadas con mayor diversidad genética, principalmente en la zona andina donde se encuentran ocho especies cultivadas y más de 200 especies silvestres que implican aproximadamente 4.000 variedades comestibles, con alto potencial genético de rendimiento y amplia adaptabilidad a diferentes climas, sin embargo, el cultivo está sometido a diferentes estreses bióticos y abióticos que amenazan su rendimiento (Lagos-Regalado et al., 2021).

Entre los factores abióticos más importantes que influyen en el rendimiento se incluye las necesidades nutricionales del cultivo, pues de acuerdo con Westermann (2005), uno de los desafíos más importantes de los productores de papa es el intentar mantener altos rendimientos del cultivo con mínimas pérdidas de nutrientes al medio ambiente, por lo que es necesario continuar con las investigaciones que contribuyan a mejorar las prácticas de manejo del cultivo.

Una de las prácticas más comúnmente usadas entre los agricultores para incrementar los rendimientos es mediante la utilización de grandes cantidades de fertilizantes, lo que ha llevado no solo a la disminución de la eficiencia en el uso de nutrientes, sino también a la degradación de los suelos cultivables, lo que representa una amenaza para el ambiente eficiencia y consecuentemente problemas en rendimiento (Sedlacek et al., 2020; Smyth et al., 2022).

## **1.2. Justificación**

La papa es considerada uno de los principales alimentos para las familias de la Sierra Ecuatoriana. En el país, cada persona consume un promedio de 30 Kg de papa al año (Andrade, et.al.2002), siendo un rubro muy importante para los agricultores. Según Cadena (2018) la papa es el cuarto cultivo alimenticio en orden de importancia a nivel mundial. La presente investigación tiene como finalidad evaluar el efecto de la fertilización con macronutrientes secundarios en papa variedad Capiro, dicha variedad es muy apetecida en el mercado internacional y local (López,2013) de tal manera que sea eficiente el manejo y a su vez nos permita mejorar la productividad del cultivo frente a la evaluación de fertilizantes, para optimizar los costos de producción y reducir la tasa de afectaciones que se dan por el consumo de productos contaminados, permitiendo obtener mayor beneficio económico y mejorar el nivel de vida de los agricultores dedicados a esta actividad; en comparación con el manejo empírico que le dan al cultivo.

## **1.3. Objetivos**

### ***Objetivo general***

Evaluar el efecto de fertilización con dos fuentes de calcio en el rendimiento de la papa (*Solanum tuberosum*)

### ***Objetivo(s) específico(s)***

- ✓ Determinar el efecto de la aplicación de dos fuentes de calcio en el peso de los tubérculos de papa.
- ✓ Estimar el contenido de calcio en cáscara de papa.

## CAPÍTULO II

### ANTECEDENTES INVESTIGATIVOS

#### 2.1. Antecedentes investigativos

Existen estudios donde se evalúa el rol del  $\text{Ca}^{2+}$  en el desarrollo y comportamiento de diferentes cultivos sometidos a diferentes fuentes de estrés tanto biótico como abiótico.

De acuerdo con Feng et al. (2023), el ion  $\text{Ca}^{2+}$  exógeno es un elemento esencial para el crecimiento, desarrollo y reproducción de las plantas y, además juega un papel importante en la tolerancia al estrés de las plantas. Así, estos investigadores realizaron una revisión exhaustiva de los avances más recientes referentes al rol del “ $\text{Ca}^{2+}$  exógeno” y “estrés” mediante un análisis utilizando VOSviewer, para discutir sobre los mecanismos relacionados con el  $\text{Ca}^{2+}$  exógeno que intervienen en las respuestas defensivas de las plantas ante varios tipos de estrés abiótico. Basados en la revisión, los autores clasificaron los efectos en seis categorías: a) estabilización de paredes y membranas celulares; b) regulación de las proporciones de  $\text{Na}^+$  y  $\text{K}^+$ ; c) regulación de los niveles hormonales en las plantas; d) mantenimiento de la fotosíntesis; e) regulación del metabolismo respiratorio de las plantas y mejora de la actividad radicular; y f) inducción de expresiones génicas y transcripciones de proteínas para la resistencia al estrés. Además, la revisión permitió identificar el papel del  $\text{Ca}^{2+}$  en la regulación de siete tipos de estrés abiótico como sequía, inundaciones, salinidad, altas temperaturas, bajas temperaturas, metales pesados y lluvia ácida y, por último, se discuten las perspectivas futuras de investigación en producción agrícola.

Elkelish et al. (2019) evaluaron el papel del calcio ( $\text{Ca}^{2+}$ ) en el crecimiento y los mecanismos de tolerancia a la salinidad en plántulas de soja suplementadas con 2 mM de  $\text{Ca}^{2+}$  y sin suplementación de  $\text{Ca}^{2+}$  para determinar su efecto sobre la modulación de parámetros fisiológicos y bioquímicos clave. El estrés por salinidad ( $\text{NaCl}$  100 mM) resultó en una reducción del crecimiento en términos de altura y acumulación de biomasa, que fue más pronunciada en las plantas con deficiencia de  $\text{Ca}^{2+}$ , mientras que las plántulas suplementadas con  $\text{Ca}^{2+}$  exhibieron un mayor contenido relativo de agua, síntesis de pigmentos y eficiencia fotosintética. Además, se encontró que el  $\text{Ca}^{2+}$  afectó la síntesis de prolina, glicina betaína y azúcares solubles en plantas con y sin estrés salino. La suplementación óptima con  $\text{Ca}^{2+}$  reguló positivamente las actividades de las enzimas antioxidantes analizadas y el contenido



de los antioxidantes no enzimáticos (ascorbato, glutatión y tocoferol), lo que se refleja en la mejora del daño oxidativo inducido por NaCl y en el incremento de la concentración de fenoles. Más importante aún, la disponibilidad de  $\text{Ca}^{2+}$  redujo la acumulación de sodio restringiendo así los efectos dañinos sobre el metabolismo. En conclusión, los autores señalaron que la disponibilidad de  $\text{Ca}^{2+}$  óptimo regula potencialmente los mecanismos de tolerancia a la salinidad en la soja al mantener la osmorregulación y el metabolismo antioxidante.

Con relación a los estudios sobre el efecto del  $\text{Ca}^{2+}$  en el cultivo de papa, varios estudios han sido realizados debido a la importancia del cultivo. Así, Torres-Hernández et al. (2023) evaluaron el efecto de la aplicación de varias dosis provenientes de tres enmiendas a base de silicatos sobre los parámetros de crecimiento y producción en la variedad Capiro en un suelo ácido en Colombia. La investigación planteó determinar el efecto del uso de tres enmiendas (fosfato térmico, silicato doble de calcio y magnesio y enmienda Triple 30®) aplicadas a las dosis de 300, 600, y 900 kg/ha, más el control sobre el peso fresco y seco de la parte aérea y raíz, área y grosor de la hoja y el rendimiento total. Los resultados mostraron que tanto las variables de crecimiento como el rendimiento fueron significativamente afectados por dosis y el tipo de enmienda, pero las mejores respuestas fueron observadas con el silicato doble de calcio y magnesio aplicado a dosis de 900 kg/ha, con el que se alcanzó un rendimiento de 61,8 tn/ha, señalándolo como una alternativa para la producción de papa.

Ibraheem & Hussein (2023) diseñaron un estudio para determinar el efecto de la aplicación de un fertilizante nanocálcico a tres concentraciones (0, 1,5 y 2,5 g/L) sobre algunas características anatómicas de dos variedades de papa (EL-Beida y Montreal). Se hicieron tres aplicaciones del fertilizante en tres etapas del crecimiento de la planta; la primera fue hecha después de la emergencia en campo, la segunda y una tercera aplicación fueron hechas a intervalos de 20 días. Los resultados indicaron que el espesor de la cáscara del tubérculo aumentó cuando se aplicó el fertilizante nanocálcico a concentraciones de 1,5 y 2,5 g/L, alcanzando 179,99 y 185,73  $\mu\text{m}$ , respectivamente, en comparación con el tratamiento control, donde este rasgo disminuyó a 150,90  $\mu\text{m}$ . La interacción entre variedades y la fertilización con nanocálcico indicaron una superioridad significativa en la variedad EL-Beida tratada con 2,5 g/L de fertilizante.

De acuerdo con Koch et al. (2019), las grietas en miniatura que se presentan en tubérculos de papa son producto de trastornos fisiológicos de la cáscara del tubérculo y estas pueden afectar significativamente la apariencia del tubérculo y, por tanto, su calidad general. En ese sentido, los investigadores caracterizaron las propiedades de fractura de la cáscara del tubérculo. A pesar de la importancia que tiene el conocer las razones fisiológicas que influyen en la resistencia de los tubérculos de papa a los impactos mecánicos y, por tanto, al agrietamiento y la fractura, la información es limitada. Los autores encontraron que la materia seca (MS) del tubérculo y el contenido de almidón se correlacionan con las propiedades reológicas de los tubérculos, lo que, a su vez, podría afectar la resistencia del tubérculo al agrietamiento y la fractura. Además, los cationes divalentes, como el  $\text{Ca}^{2+}$  y el magnesio (Mg), y su distribución en el tubérculo pueden afectar la resistencia del tubérculo a los impactos mecánicos a través de las propiedades estabilizadoras de la pared celular.

Hamdi et al. (2015) investigaron el efecto de la nutrición con  $\text{Ca}^{2+}$  sobre la producción de plantas de papa en un suelo isohúmico en Túnez. En el estudio evaluaron siete tratamientos de fertilización con siete dosis de nitrato de calcio como fuente de  $\text{Ca}^{2+}$  (0, 20, 40, 60, 80, 100 y 120), lo cual demostró que el uso de nitrato de calcio tuvo un efecto significativo no solo sobre el crecimiento de las plantas, sino también en el peso de los tubérculos y la materia seca. Adicionalmente, el aumento de la concentración de  $\text{Ca}^{2+}$  provocó una reducción en el número de tubérculos por planta, pero incrementó el tamaño de los tubérculos. Por último, se observó que la aplicación nitrato de calcio incrementó su concentración en hojas y tubérculos, pero esto no afectó la absorción de otros elementos nutritivos.

De manera similar, Helal & Abdelhady (2015) realizaron un experimento de campo Egipto, con el fin de investigar el efecto de la aplicación de  $\text{Ca}^{2+}$  (nitrato de calcio en dosis de 0, 10 y 20 kg/0.42 ha) y potasio (sulfato de potasio ( $\text{K}_2\text{SO}_4$ ) a razón de 0, 25, 50, 75 kg/0.42 ha) sobre el crecimiento vegetativo y la calidad del rendimiento de la papa variedad Spounta. Entre los resultados más resaltantes se observó que la aplicación de 50 y 75 kg de potasio mejoró significativamente el crecimiento de las plantas y el contenido químico de la papa y resultados similares fueron obtenidos con 10, 20 kg de  $\text{Ca}^{2+}$ . En cuanto a la interacción entre el  $\text{Ca}^{2+}$  y potasio, la aplicación de 20 kg de  $\text{Ca}^{2+}$  con 75 kg de potasio resultó en el mayor crecimiento vegetativo y el rendimiento de las plantas de papa.

## **2.2. El cultivo de papa: características e importancia económica**

### ***2.2.1. Cultivo de papa: etapas fenológicas***

El cultivo de la papa es dividido en cinco etapas fenológicas: emergencia o brotación, crecimiento de brotes laterales, inicio de la tuberización, llenado de los tubérculos y maduración, cuya duración depende de factores tales como la variedad de papa, así como de las condiciones agroclimáticas de la región donde sea cultivada (Vignola et al., 2017). Según Román y Hurtado (2002), la brotación ocurre cuando comienzan a emerger las yemas de los tubérculos; dura 2 a 3 meses, luego la papa está apta para sembrarse, mientras que el crecimiento de brotes laterales se observa el crecimiento de follaje y raíces en forma simultánea, lo cual ocurre entre 20 a 30 días y viene seguido de la floración que es acompañada con la emisión de estolones y formación de tubérculos, lo cual ocurre 30 días después de la siembra en variedades precoces, mientras que en las intermedias y tardías entre 35-45 y 50-60 días, respectivamente y finalmente el desarrollo de los tubérculos que llegan a su madurez fisiológica a los 75, 90 y 120 días en variedades precoces, intermedias y tardías.

### ***2.2.2. Características generales de la variedad Super Chola***

Esta variedad de papa produce tubérculos de piel rosada y lisa, tamaño mediano, con formas que van desde elípticos a ovalados, con ojos superficiales y pulpa amarilla pálida, se consume principalmente en sopas y puré, pero también puede ser procesada para la producción de papa frita (Torres et al., 2011).

Esta variedad fue obtenida a partir de cruzamientos entre las variedades (Curipamba negra x *Solanum demissum*) x (clon resistente con comida amarilla x chola seleccionada) y entre las características más resaltantes se incluye: plantas con crecimiento erecto, con tallos verdes bien desarrollados, pubescentes y muestra ciertas pigmentaciones de color púrpura, hojas de color verde intenso, de desarrollo rápido, hojas compuestas con tres pares de folíolos primarios, tres pares de folíolos secundarios y cinco pares de folíolos terciarios, flores de color morado (Torres et al., 2011).

## **2.3. Requerimientos nutricionales del cultivo**

### **2.3.1. Fertilización: macro y micronutrientes**

Las plantas requieren una serie de elementos químicos para su crecimiento, entre los que se señalan nutrientes esenciales, tales como nitrógeno (N), potasio (K), fósforo (P), azufre (S), calcio (Ca), magnesio. (Mg), zinc (Zn), manganeso (Mn), hierro (Fe), cobre (Cu), boro (B), molibdeno (Mo) y cloruro (Cl), sin los cuales son necesarios para el crecimiento de la planta puesto que están directamente involucrados en algún proceso metabólico en la planta, por lo que su función no puede ser reemplazada por otro elemento químico (Askew, 2001).

El crecimiento y desarrollo normal de la planta es alcanzado cuando se proporcionan una suficiente cantidad de los nutrientes esenciales, como N, P y K, debido a que estos intervienen y regulan varios procesos bioquímicos, fisiológicos y metabólicos (Kumar et al., 2021). Generalmente, las investigaciones sobre nutrición de plantas han sido enfocadas a abordar el efecto individual de los macronutrientes, sin embargo, investigaciones recientes han mostrado que existen interacciones sinérgicas entre ellos que promueven su absorción y asimilación, mejorando el rendimiento (Kumar et al., 2021).

### **2.3.2. Macronutrientes Secundarios**

Entre los macronutrientes esenciales para la planta, el calcio, el magnesio y el azufre son considerados macronutrientes secundarios debido a que son requeridos por las plantas en menores cantidades que el nitrógeno, el fósforo y el potasio, además es sabido que estos elementos pueden afectar el pH, aumentándolo (calcio y el magnesio) o disminuyéndolo (azufre) (Oldham, 2019).

El calcio es absorbido como  $\text{Ca}^{2+}$  y es esencial tanto para el crecimiento de las plantas y desarrollo de frutos como en la resistencia a enfermedades debido a que juega un papel importante en la estabilidad de la membrana e integridad celular, además de intervenir algunas reacciones bioquímicas relacionadas con el metabolismo y actividades enzimáticas (El Habbasha y Ibrahim, 2015).

Con relación al magnesio, este nutriente participa en varios procesos fisiológicos y bioquímicos, esencial para el crecimiento y desarrollo de las plantas y juega un papel primordial en la activación de mecanismos de defensa de la plantas al estrés abiótico. El

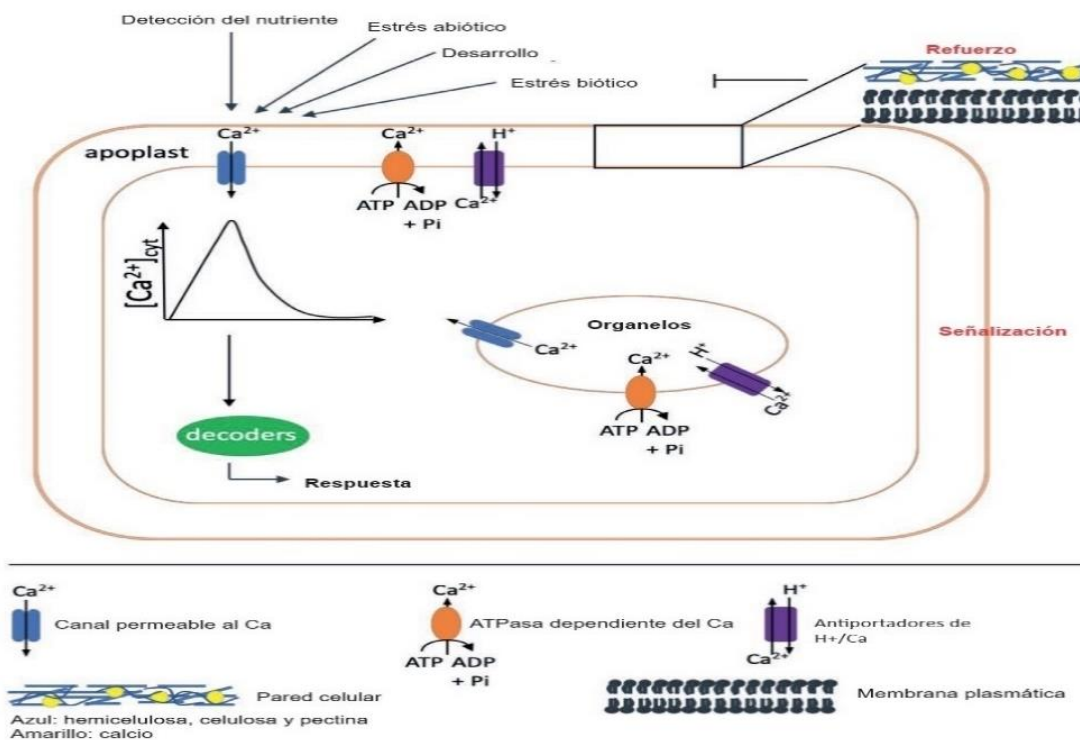
magnesio se encuentra formando parte de muchos minerales y, por lo tanto, no está directamente disponible para la absorción de las plantas, por lo que su disponibilidad va a depender de la velocidad de la meteorización, la humedad y pH del suelo y la actividad microbiana en la rizosfera (Yan y Hou, 2018). La importancia del magnesio radica en su participación en la fotosíntesis y translocación de asimilación de carbohidratos, lo que confiere calidad al almidón y además mejora la firmeza y resistencia del tubérculo durante la cosecha, el transporte y el almacenamiento, entre otras funciones (Senbayram et al., 2015).

Finalmente, el azufre es importante en la planta debido a que forma parte de la estructura de las proteínas e interviene en el funcionamiento de algunas enzimas y, por otra parte, actúa en la activación de los mecanismos de defensa de las plantas contra el estrés biótico y abiótico, debido a que uno de sus metabolitos, el glutatión, protege las plantas contra el estrés oxidativo, los metales pesados y los xenobióticos. Adicionalmente, los compuestos azufrados, tales como glucosinolatos, fitoalexinas, proteínas ricas en azufre (tioninas), la confieren resistencia contra la acción de insectos y ácaros fitófagos y agentes fitopatógenos (Zhao et al., 2008). Las sustancias azufradas relacionadas con la defensa de la planta son responsables de la detección inicial de patógenos, así como en la transducción de señales interconectadas con procesos de defensa regulados por las hormonas vegetales (ácido salicílico, ácido jasmónico y etileno) y por las especies reactivas de oxígeno (ROS) (Künstler et al., 2020).

### ***2.3.3. El papel del $\text{Ca}^{2+}$ en la nutrición de la planta***

El calcio es absorbido desde la solución del suelo a través de canales de la membrana plasmática en las raíces (White et al., 2002). Este macronutriente es esencial en las plantas y cumple una función estructural como parte de las paredes y membranas celulares y, además, como mensajero intracelular, por lo tanto, es necesario asegurar su suministro, distribución y almacenamiento en la planta (Thor, 2019) (Fig. 1). En la figura se muestra el efecto que tiene el  $\text{Ca}^{2+}$  de fortalecimiento de las paredes y membranas celulares y como mensajero en procesos de señalización durante el desarrollo y como respuestas a las señales ambientales. Una pared celular reforzada confiere protección contra patógenos. Además, diferentes tipos de estrés biótico también inducen cascadas de señalización, en las que el  $\text{Ca}^{2+}$  actúa como segundo mensajero y en estas cascadas de señalización, como en las inducidas por otros eventos, el  $\text{Ca}^{2+}$  ingresa al citosol desde compartimentos de mayor

concentración (apoplastos, orgánulos) a través de proteínas de canal (azul) para inducir un aumento en la concentración de  $\text{Ca}^{2+}$  citosólico, la señal de  $\text{Ca}^{2+}$ , que es decodificado por componentes posteriores en una respuesta adecuada (Thor, 2019). De acuerdo con este autor, la señal finaliza mediante el transporte de  $\text{Ca}^{2+}$  fuera del citosol a través de  $\text{Ca}^{2+}$ -ATPasas o antiportadores de  $\text{H}^+/\text{Ca}^{2+}$  en el plasma o en las membranas de los orgánulos y la presencia de estas proteínas exportadoras difiere en diferentes orgánulos.



**Figura 1**

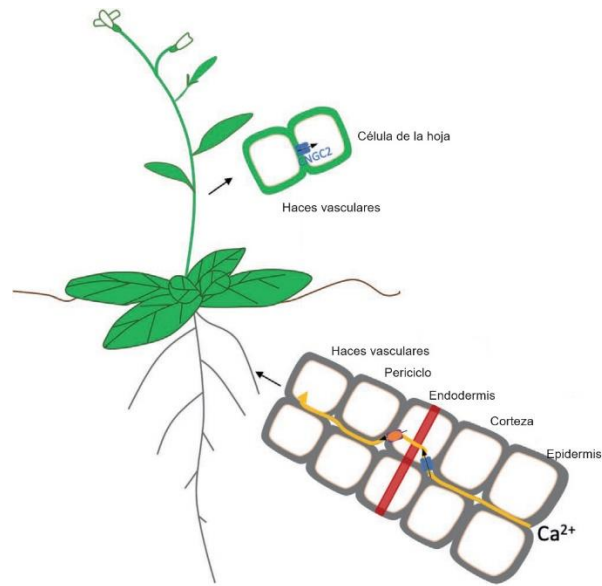
*Funciones del calcio en la planta*

Fuente: Thor (2019)

En general, no es común observar la deficiencia de  $\text{Ca}^{2+}$  por la baja disponibilidad del suelo, sin embargo, cuando ocurre, los síntomas de deficiencia pueden observarse con mayor frecuencia en el tejido en desarrollo como hojas y frutos jóvenes, debido a la baja movilización del  $\text{Ca}^{2+}$  desde el tejido viejo al joven a través del floema, por lo que, se requiere del suministro a través del xilema, auxiliado por la transpiración (White & Broadley, 2003). De esta forma, la deficiencia de este elemento se caracteriza por la

presencia de quemaduras en las puntas de la lechuga o pudrición apical en el tomate (Hirschi, 2004; White & Broadley, 2003).

Para generar una señal de  $\text{Ca}^{2+}$ , el ion puede moverse hacia abajo en el gradiente de concentración hacia el citosol a través de proteínas de canal en el plasma o las membranas internas (Fig. 2) (Thor, 2019).



## Figura 2

*Descripción de la absorción del  $\text{Ca}^{2+}$ , donde muestra que el elemento es absorbido por la raíz y transportado al brote de forma principalmente apoplásica. Para evadir las Bandas de Caspari (banda roja), tiene que ingresar al citosol de las células endodérmicas (que se muestran en azul) y posteriormente moverse al apoplasto a través de  $\text{Ca}^{2+}$ -ATPasas o antiportadores de  $\text{Ca}^{2+}/\text{H}^+$  (líneas naranja).*

Fuente: (Thor, 2019)

Con relación a su función como mensajero celular, el  $\text{Ca}^{2+}$  interviene en una variedad de procesos que van desde el crecimiento de la raíz y el tubo polínico hasta la fertilización, así como también juega un papel fundamental en la producción de respuestas al estrés biótico abiótico (Ortiz-Ramírez et al., 2017; Zhang et al., 2017). Los aumentos transitorios, sostenidos u oscilatorios en la concentración de  $\text{Ca}^{2+}$  citosólico sirven como una señal, que se decodifica en respuestas posteriores, para lo cual los niveles de  $\text{Ca}^{2+}$  libre deben mantenerse alrededor de  $0,1 \mu\text{M}$  en el citosol bajo condiciones no estimuladas, mediante la

acción de tampones bioquímicos, así como antiportadores de  $H^+/Ca^{2+}$  y  $Ca^{2+}$ -ATPasas, que liberan activamente  $Ca^{2+}$  en el apoplasto o en los almacenes intracelulares (Kudla et al., 2018; Thor & Peiter, 2014).

Las plantas están expuestas a una variedad de patógenos, desde bacterias hasta hongos y oomicetos, y también son atacadas por insectos. Para protegerse contra este estrés biótico, han desarrollado una red de señalización inmune de dos capas que proporciona defensa. La primera capa se denomina inmunidad activada por PAMP o PTI y conduce a la defensa basal. Los patrones microbianos conservados (patrones moleculares asociados a patógenos o PAMP) o patrones moleculares asociados a daños derivados del huésped (DAMP) son reconocidos por receptores de reconocimiento de patrones (PRR) localizados en la superficie, iniciando una cascada de señalización que conduce a la inducción de respuestas posteriores, como el gen de defensa, expresión, cierre de estomas y depósito de callosa en el sitio de la infección. La señal de  $Ca^{2+}$  es una de las primeras respuestas en esta cascada (Blume et al., 2000; Dodds y Rathjen, 2010). Para evadir esta defensa, los patógenos han desarrollado moléculas efectoras, que se administran a la célula huésped y se dirigen a los componentes relacionados con la defensa. Estos efectores, a su vez, son reconocidos por receptores intracelulares [receptores repetidos ricos en leucina (LRR) de unión a nucleótidos (NB) o NLR] que inducen la segunda capa de defensa llamada inmunidad activada por efecto o ETI, que a menudo se caracteriza por la aparición de reacciones celulares programadas. muerte en el lugar de la infección, la llamada respuesta de hipersensibilidad o HR. Las señales de  $Ca^{2+}$  también desempeñan un papel en la ETI (Grant et al., 2000)

Recientemente, Feng et al. (2023) señala que las respuestas defensivas de la planta pueden ser incluidas en seis categorías: a) estabilización de paredes y membranas celulares; b) regulación de las proporciones de  $Na^+$  y  $K^+$ ; c) regulación de los niveles hormonales en las plantas; d) mantenimiento de la fotosíntesis; e) regulación del metabolismo respiratorio de las plantas y mejora de la actividad radicular; y f) inducción de expresiones génicas y transcripciones de proteínas para la resistencia al estrés y, además, estos autores mencionan que los más recientes avances muestran el papel del  $Ca^{2+}$  en el estrés abióticos a la sequía, inundaciones, salinidad, altas temperaturas, bajas temperaturas, metales pesados y lluvia ácida.



El estrés que sufren las plantas, como la salinidad, las altas temperaturas, las bajas temperaturas y la sequía, tienden a inducir más especies reactivas de oxígeno (ROS) que causan una peroxidación de las paredes y membranas celulares y cambian la permeabilidad de la membrana, lo que resulta en una alteración osmótica, sin embargo, la aplicación de fertilizantes a base de  $\text{Ca}^{2+}$  provocó la reducción de la fuga de iones, la reposición del  $\text{Ca}^{2+}$  perdido e indujo la síntesis de sustancias osmorreguladoras (Feng et al., 2023; Min et al., 2021; Naeem et al., 2020). Adicionalmente, la fertilización con  $\text{Ca}^{2+}$  ha demostrado el aumento de la actividad de las enzimas antioxidantes como superóxido dismutasa (SOD), peroxidasa (POD) y catalasa (CAT) y la síntesis de glutatión (GSH), ascorbato, tocoferoles y otros antioxidantes no enzimáticos (Elkelish et al., 2019). En conclusión, se ha demostrado que todas estas respuestas biológicas y fisiológicas, metabolitos secundarios y enzimas correspondientes mantienen la estabilidad e integridad de las paredes y membranas celulares de las plantas (Feng et al., 2023).

#### ***2.3.4. El $\text{Ca}^{2+}$ y su papel en la regulación de los niveles hormonales en las plantas***

El crecimiento, el desarrollo y la reproducción de las plantas están básicamente regulados por hormonas endógenas, las cuales muestran variaciones debido a los cambios de las condiciones ambientales y responder a estos (Mesejo et al., 2013). Los sensores de  $\text{Ca}^{2+}$ , que incluyen calmodulinas (CaM), proteínas similares a CaM (CML), proteínas similares a calcineurina B (CBL) y CDPK, son moléculas que funcionan como detectores de señales de las fases iniciales de estrés y como reguladores de las principales señales de las hormonas vegetales (Ku et al., 2018). Los estudios han demostrado que el  $\text{Ca}^{2+}$  participa en el proceso de cierre estomático inducido por el ABA y, además, las quinasas reguladoras de  $\text{Ca}^{2+}$  y ABA se dirigen a la misma vía metabólica mediante la regulación de la biosíntesis y la transmisión de señales de ácido jasmónico (JA) que posteriormente ajustan el nivel de  $\text{Ca}^{2+}$ , induciendo la entrada del  $\text{Ca}^{2+}$  extracelular, aumentando temporalmente su concentración en el plasma nuclear (Liu et al., 2022).

El  $\text{Ca}^{2+}$  puede controlar la tasa de transporte de ácido indol-3-acético (AIA) y cambiar la dirección del flujo del AIA para amplificar eficazmente la señalización del  $\text{Ca}^{2+}$  para la activación de bombas de cationes en la membrana plasmática, promover la entrada de  $\text{Ca}^{2+}$  y la salida de  $\text{K}^+$  y la inducción del geotropismo de la raíz al interactuar con AIA (Vanneste & Friml, 2013). En condiciones adversas, la aplicación de fertilización a base de  $\text{Ca}^{2+}$

demonstró tener un efecto en la disminución de los efectos potencialmente dañinos causados por el estrés en el crecimiento y desarrollo de las plantas al minimizar la cantidad de ABA y aumentar la producción de otras hormonas (p. ej., AIA, AG3, citoquininas) para mejorar la resiliencia de las plantas en condiciones de estrés (Kamran et al., 2021).

### **2.3.5. *Mantenimiento de la fotosíntesis***

Las plantas necesitan clorofila como pigmento para realizar la fotosíntesis y su cantidad en las hojas afecta directamente la capacidad fotosintética para producir carbohidratos (Feng et al., 2023). Las condiciones de estrés tienden a dañar los cloroplastos y provocar una disminución en la cantidad de clorofila, por lo que el  $\text{Ca}^{2+}$  podría prevenir o minimizar la degradación de la clorofila, mantener los cloroplastos intactos bajo estrés y mantener un buen nivel de fotosíntesis (Min et al., 2021; Wang et al., 2022).

El  $\text{Ca}^{2+}$  juega un papel importante en la regulación estomática de las plantas como mensajero junto con señales externas en las células vegetales y así la aplicación de cantidades adecuada de  $\text{Ca}^{2+}$  puede hacer que las plantas ajusten la apertura/cierre de los estomas, optimizando el intercambio de gases y mejorando así la eficiencia fotosintética, lo que consecuentemente repercute positivamente en la adaptación al estrés causado por la sequía y la salinidad (Li et al., 2022). Otros efectos de la aplicación de  $\text{Ca}^{2+}$  han sido verificados en la inducción de mejoras en el ciclo de la luteína, mitigación de los efectos adversos sobre la inhibición del fotosistema II (PSII) y conservación de las actividades enzimáticas, efecto en la acumulación de carbohidratos y mantenimiento de la actividad normal de la fotosíntesis (Tan et al., 2011; Yang et al., 2013).

## CAPÍTULO III

### MARCO METODOLÓGICO

#### 3.1. Ubicación del ensayo

El presente estudio fue realizado en la Parroquia Cunchibamba, perteneciente al cantón Ambato, Provincia de Tungurahua, ubicada a altitud promedio de 2.703 m.s.n.m. (1°7'60" S y 78°34'60" W).

#### 3.2. Equipos y materiales

- ✓ Fertilizantes a base de  $\text{Ca}^{2+}$  (Nitrato de calcio y Sulfato de calcio)
- ✓ Baldes
- ✓ Herramientas de labores culturales
- ✓ Botas
- ✓ Etiquetas
- ✓ Palos de madera
- ✓ Plástico

#### 3.3. Tipo de investigación

Para determinar el diseño de investigación en una investigación cuantitativa se debe establecer la forma en que los tratamientos serán dispuestos de manera que facilite la recopilación y la interpretación de los datos (Creswell, 2012). De acuerdo con esto, el presente estudio fue abordado bajo un enfoque cuantitativo de tipo experimental, cuyos datos numéricos son sometidos a análisis estadístico para hacer la comprobación de la hipótesis (Hernández-Sampieri et al., 2014).

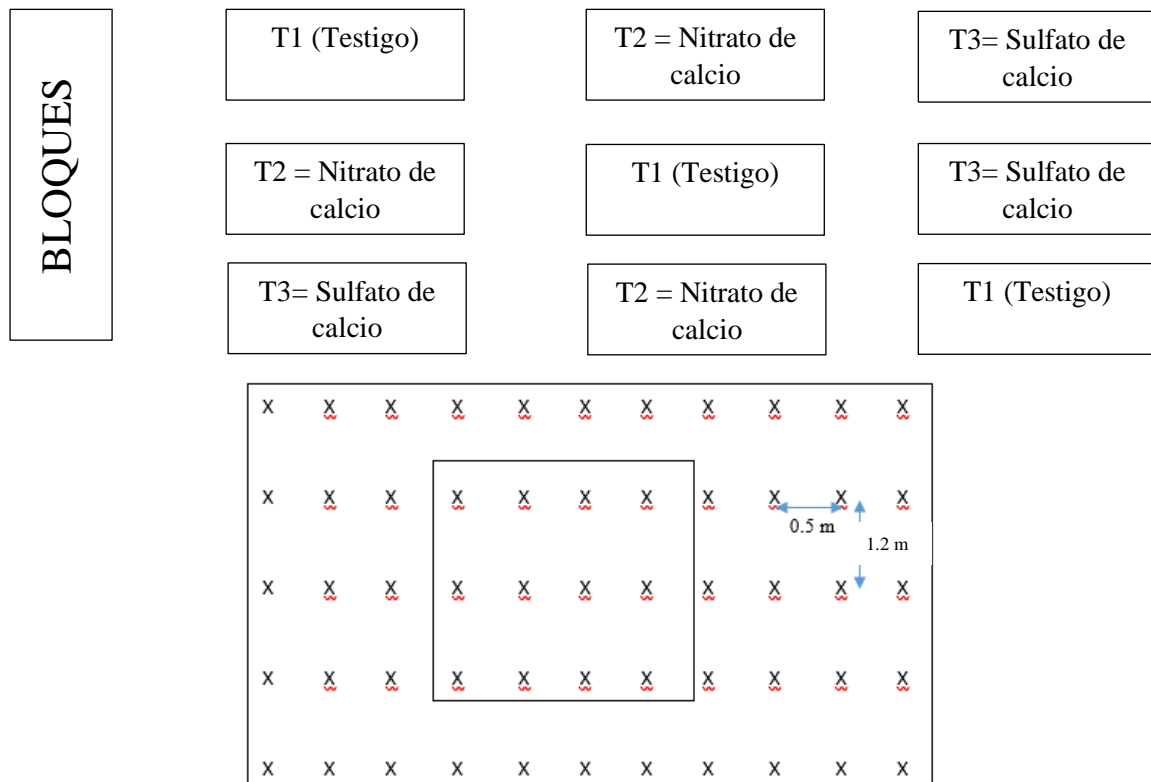
En este sentido, la investigación experimental permite evaluar el efecto de una o más variables independientes sobre una o más variables dependiente (Creswell, 2012). Así, en esta investigación se midió el efecto de la aplicación de dos fuentes de  $\text{Ca}^{2+}$  sobre el rendimiento en el cultivo de papa.

### 3.4. Prueba de hipótesis

$H_1$ = El rendimiento de la papa variedad Super Chola es afectado por el tipo de fuente de  $Ca^{2+}$

### 3.5. Recolección de la información

En el experimento se evaluaron dos fuentes de  $Ca^{2+}$  (Nitrato de Calcio y Sulfato de Calcio) para determinar el efecto de la fertilización con  $Ca^{2+}$  sobre los parámetros de rendimiento de la planta de papa variedad Super chola. Fueron consideradas tres parcelas, una por tratamiento. En el tratamiento 1 las plantas fueron fertilizadas con fórmula completa NPK (15 15 15), sin suplementación con  $Ca^{2+}$ , el cual fue considerado como el tratamiento control. En la segunda parcela, además de la aplicación con NPK (15 15 15), se adicionó  $Ca^{2+}$  en forma de nitrato de calcio (15.14%N–0P–0K–24.88%CaO) y en la tercera parcela se aplicó NPK y se usó sulfato de calcio (0N–0P–0K–30.9%CaO+17.5%S) como fuente de  $Ca^{2+}$ .



Distancia entre planta 0.50 m y distancia entre surcos de 1.20 m

**Figura 3**

*Características de la unidad experimental*

Cada 15 días, se hicieron mediciones de altura de planta, mientras que al final del cultivo se midió el peso fresco y seco de los tubérculos, el rendimiento tomando en cuenta el número de tubérculos y del peso promedio del tubérculo a los 150 días después de la siembra. Adicionalmente, los tubérculos fueron clasificados por peso en las siguientes categorías (Tabla 1).

**Tabla 1**

*Clasificación de los tubérculos de papa de acuerdo con el peso*

<b>Categoría</b>	<b>Peso promedio</b>
Categoría 1	151.00-290.00
Categoría 2	101.00 - 150.00
Categoría 3	51.00 - 100.00
Categoría 4	9-50.00

Después de la clasificación, se recolectaron 20 tubérculos para la determinación de la concentración de  $\text{Ca}^{2+}$  en los tejidos. Las muestras para el análisis de  $\text{Ca}^{2+}$  tisular se obtuvieron extrayendo una rebanada longitudinal de 1 cm de espesor del centro de cada tubérculo. El peridermo y la mayor parte de la corteza se extrajeron del tejido con una aguja de disección y fueron desechados. El tejido no peridérmico restante se preparó para análisis de  $\text{Ca}^{2+}$  según lo descrito por Kratzke & Palta (2022). Para ello las muestras fueron secadas en estufa a 70 °C, molidas, pesadas e incineradas (450 °C, 6 h). A continuación, la ceniza se disolvió en HCl 2 N. Esta solución se diluyó con una solución de cloruro de lantano ( $\text{LaCl}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$ ) y agua destilada-desionizada para obtener muestras en una concentración final de HCl 0,2 N y 2000 mg/L de cloruro de lantano. La concentración de  $\text{Ca}^{2+}$  se determinó mediante espectrofotometría.

### **3.6. Variables respuesta**

En cada tratamiento fueron seleccionadas 10 plantas al azar, en las cuales se midieron las siguientes variables:

- Altura de planta: la cual fue medida a los 30, 60, 90 y 120 días después de la siembra y fue expresada en cm.
- Peso del tubérculo al momento de la cosecha y expresado en gramos
- Categoría de tubérculo de acuerdo al peso, se usaron cuatro categorías de peso (Categoría 1, Categoría 2, Categoría 3 y Categoría 4; siendo categoría 1 papa con mayor tamaño y peso y categoría 4 las de menor tamaño y peso)
- Rendimiento/parcela: medida en la parcela neta y expresada en kg, posteriormente fue calculado el rendimiento en kg/ha.

### **3.7. Procesamiento de la información y análisis estadístico**

El ensayo fue conducido en un diseño de bloques al azar con 3 repeticiones y todas las variables fueron sometidas a análisis de varianza y aquellas variables que mostraron diferencias significativas fueron comparadas mediante prueba de medias según Tukey ( $p < 0,05$ ) usando el paquete estadístico Statistix para Windows, versión 10.0. La clasificación de los tubérculos por peso fue hecha usando el programa estadístico SPSS versión 22.

## CAPÍTULO IV

### RESULTADOS Y DISCUSIÓN

#### 4.1. Efecto de la aplicación de dos fuentes de $\text{Ca}^{2+}$ en el peso de los tubérculos de papa

Se observó un efecto de la fuente de  $\text{Ca}^{2+}$  usada como fertilizante sobre la altura de plantas medida a los 30 y 90 días después de la siembra (dds), mientras que, a los 60 y 120 días no se observó ningún efecto (Tabla 2). A los 30 días dds la mayor altura fue alcanzada por plantas de papa fertilizadas con nitrato de calcio (21.5 cm), seguido de las plantas tratadas con sulfato de calcio (19.7 cm), mientras que la menor altura se observó en plantas del tratamiento control (18.0 cm). La misma tendencia fue observada a los 90 dds, cuando el máximo valor también fue alcanzado con la aplicación de nitrato de calcio.

A los 60 y 120 días no se observaron diferencias significativas entre los diferentes tratamientos, variando de 37.1 a 41.6 cm a los 60 dds y desde 85.5 a 92.7 cm a los 120 días (Tabla 2).

**Tabla 2**

*Altura de plantas de papa variedad Super Chola tratadas con dos fuentes de  $\text{Ca}^{2+}$*

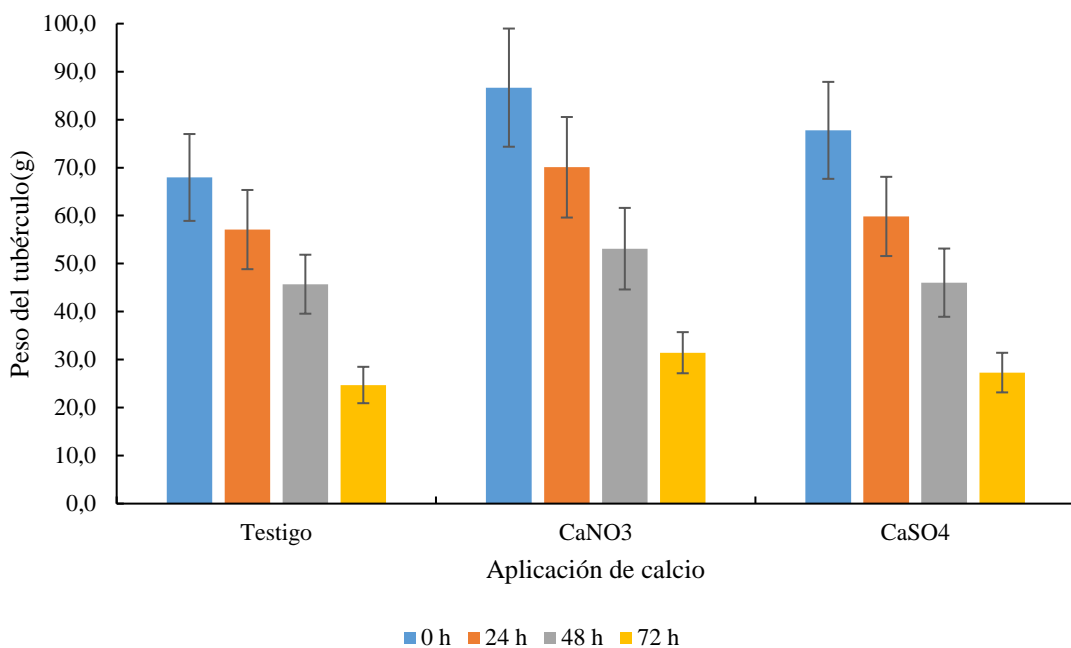
	Días después de la siembra			
	30	60	90	120
T1 (control)	18.0±2.58 b (14.0-22.0)	37.1±4.58 a (30.0-45.0)	63.4±4.15b (56.0-70.0)	85.5±6.48a (78.0-94.0)
T2	21.5±2.58 a (17.5-25.5)	41.6±4.58 a (34.5-49.5)	68.5±4.11a (61.1-75.1)	92.7±6.40a (85.2-101.29)
T3	19.7±2.58 ab (15.7- 23.7)	39.4±4.58 a (32.3-47.3)	66.2±4.10ab (58.8-72.8)	88.6±6.45a (81.1-97.1)

Valores en una columna seguidos de letras diferentes mostraron diferencias significativas según prueba de Tukey ( $p < 0.05$ )

Valores entre paréntesis indican los mínimos y máximos valores observados dentro de las variables

Con relación al efecto sobre el peso de los tubérculos de papa, aunque no se observaron diferencias significativas en el peso, por efecto de la fuente de  $\text{Ca}^{2+}$  aplicada, se encontró que las plantas tratadas con nitrato de calcio produjeron tubérculos con mayor peso fresco de 86.7 g en promedio, seguido de los tubérculos obtenidos de plantas tratadas con sulfato de calcio con un peso promedio de 77.8 g, finalmente, los tubérculos de las plantas sin fuente extra de  $\text{Ca}^{2+}$  (testigo) produjeron tubérculos de 68.0 g (Fig. 4).

Así mismo, después de que los tubérculos fueron sometidos a estufa para determinar el peso seco, nuevamente el mayor valor fue observado en tubérculos obtenidos de plantas fertilizadas con nitrato de calcio con 31.4 g, mientras que los tubérculos de plantas tratadas con sulfato de calcio mostraron un peso seco de 27.3 g. Por último, el peso seco de los tubérculos del tratamiento testigo se ubicó en 24.7 g (Fig. 4).



**Figura 4**

*Peso promedio de los tubérculos de papa variedad Super Chola por efecto de la fuente de  $\text{Ca}^{2+}$*

Con relación a los diferentes grupos de tubérculos de papa, de acuerdo con el peso, se obtuvieron 4 categorías de peso: tubérculos de más de 150 g (categoría 1), tubérculos entre



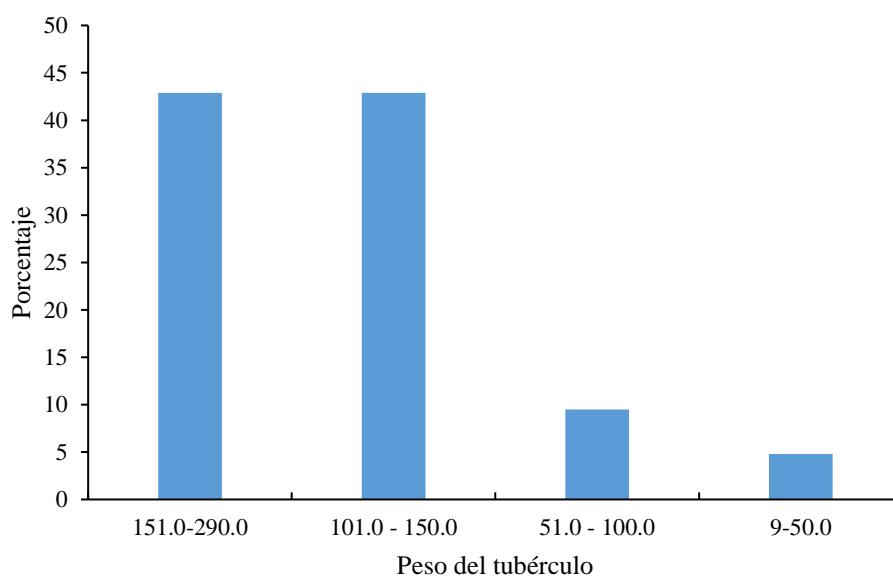
101-150 g (categoría 2); tubérculos entre 51 y 100 g (categoría 3) y tubérculos de menos de 50 g (categoría 4).

En plantas de papa provenientes del tratamiento testigo, la mayor parte de los tubérculos se ubicaron en las categorías 1 y 2, cada uno con 42.9% de los tubérculos, mientras que solo 9.4% alcanzaron entre 51,0 – 100,0 g (categoría 3) y apenas 4.8 % alcanzaron menos de 50 g (categoría 4) (Tabla 3, fig. 5).

**Tabla 3**

*Categorización de los tubérculos de papa variedad Super Chola del tratamiento control*

	Peso (g)	Porcentaje	Porcentaje acumulado
Categoría 1	151.0-290.0	42,9	42,9
Categoría 2	101.0 - 150.0	42,9	85,8
Categoría 3	51.0 - 100.0	9,4	95,2
Categoría 4	9-50.0	4,8	100,0



**Figura 5**

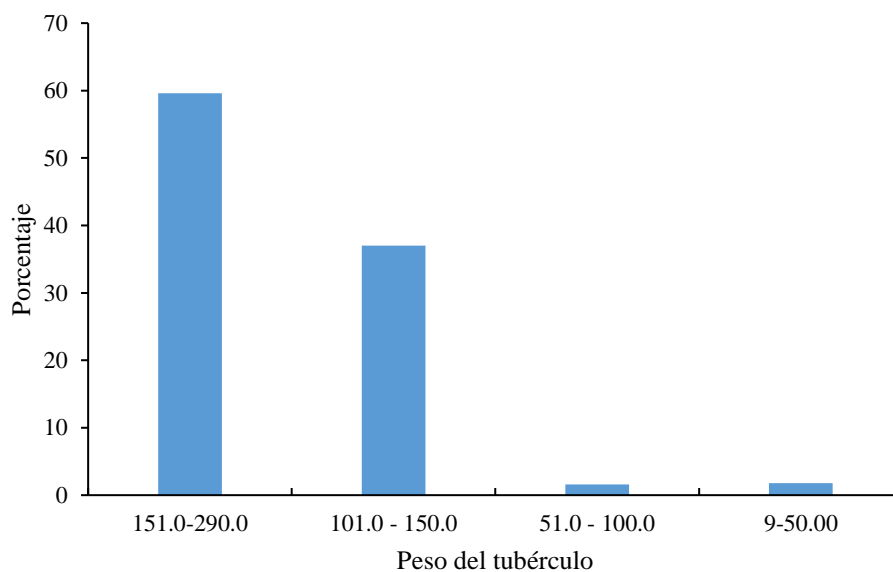
*Categorías de tubérculos de papa variedad Super Chola de acuerdo al peso en el tratamiento control*

En cuanto a la clasificación de los tubérculos obtenidos de plantas fertilizadas con nitrato de calcio, la proporción de tubérculos ubicados dentro de las categorías 1 y 2 fue relativamente mayor (59,6 y 37,0 %, respectivamente) que en el tratamiento testigo y además disminuyó la proporción dentro de las categorías 3 y 4, puesto que se obtuvo un 1,6 y 1,8 % (Tabla 4, fig. 6).

**Tabla 4**

*Categorización de los tubérculos de papa variedad Super Chola fertilizadas con nitrato de calcio*

	Peso (g)	Porcentaje	Porcentaje acumulado
Categoría 1	151.0-290.0	59,6	59,6
Categoría 2	101.0 - 150.0	37,0	96,6
Categoría 3	51.0 - 100.0	1,6	98,2
Categoría 4	9-50.00	1,8	100,0



**Figura 6**

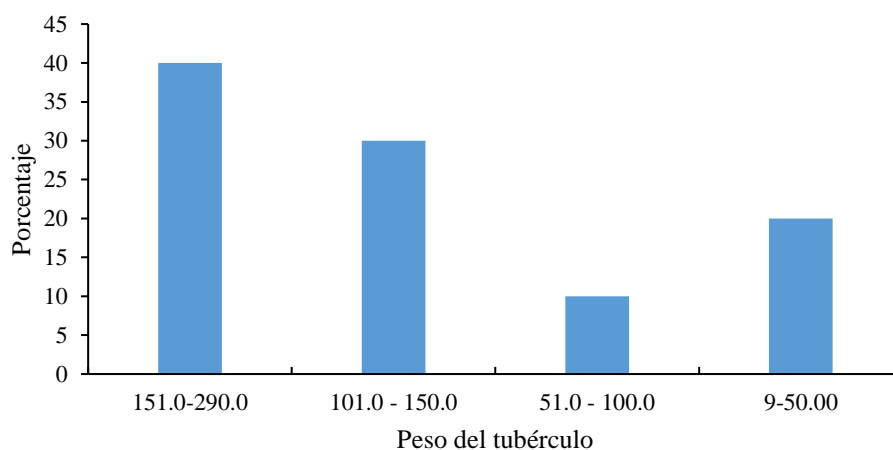
*Categorías de tubérculos de papa variedad Super Chola de acuerdo al peso en plantas tratadas con nitrato de calcio*

Finalmente, en plantas tratadas con sulfato de calcio, la proporción de tubérculos entre las categorías 1 y 2 alcanzó valores de 40 y 30% del total, mientras que en las categorías 3 y 4, el porcentaje sumó el 30% restante (Tabla 5, fig. 7).

**Tabla 5**

*Categorización de los tubérculos de papa variedad Super Chola fertilizadas con sulfato de calcio*

	Peso (g)	Porcentaje	Porcentaje acumulado
Categoría 1	151.0-290.0	40	40,0
Categoría 2	101.0 - 150.0	30	70,0
Categoría 3	51.0 - 100.0	10	80,0
Categoría 4	9-50.00	20	100,0

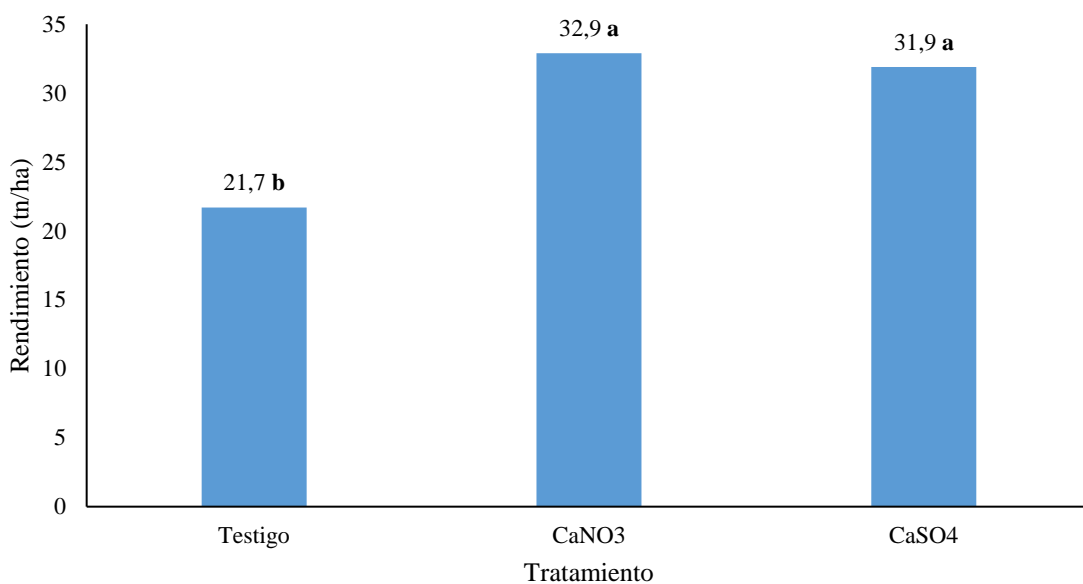


**Figura 7**

*Categorías de tubérculos de papa variedad Super Chola de acuerdo al peso en plantas tratadas con sulfato de calcio*

*Rendimiento*

Aunque el rendimiento de las plantas de papa variedad Super Chola no fue significativamente afectado por la fuente de  $\text{Ca}^{2+}$  utilizada, ambas fuentes provocaron mayor rendimiento cuando fueron comparadas con las plantas del tratamiento testigo (Fig. 8). En plantas tratadas con sulfato y nitrato de calcio, el rendimiento varió desde 31.9 y 32.9 tn/ha, respectivamente, mientras que en las plantas del tratamiento testigo el rendimiento fue significativamente menor (21.7 tn/ha), lo cual indica que las plantas tratadas con fertilizantes a base de  $\text{Ca}^{2+}$  alcanzaron un rendimiento entre 47.0 y 51.6% mayor con respecto al testigo.



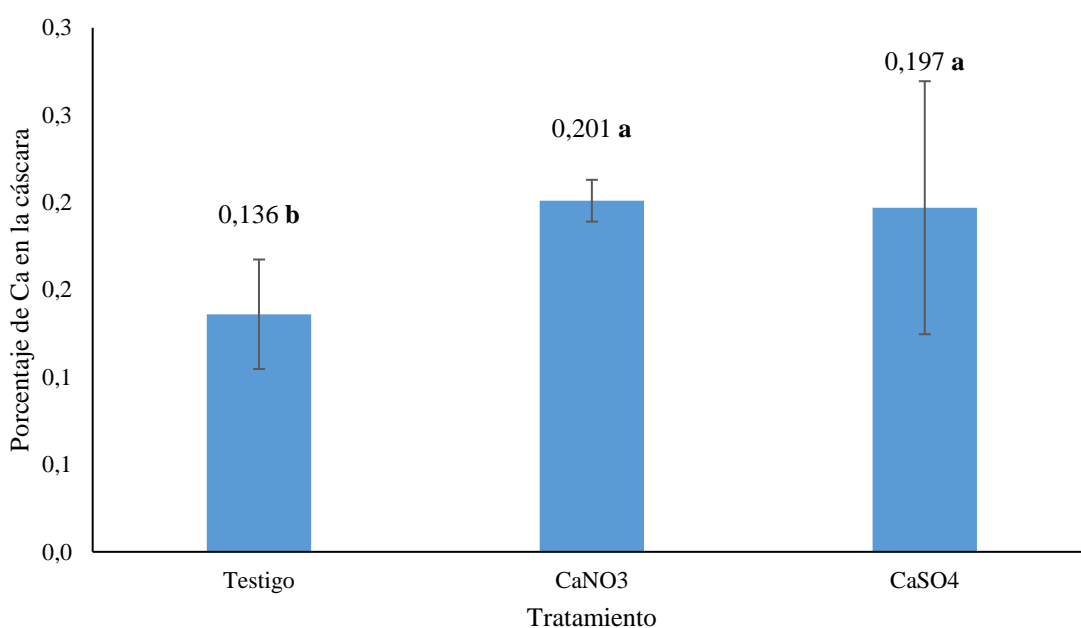
**Figura 8**

*Rendimiento de plantas de papa variedad Super Chola tratadas con dos fuentes de  $Ca^{2+}$*

Resultados similares fueron mostrados por Martínez & Acuña (2021) quienes observaron que la fertilización con NPK durante la siembra complementada con  $CaNO_3$  durante el periodo de tuberización provocó el incremento del rendimiento de plantas de papa variedad Pukará-INIA. De acuerdo con las autoras, la aplicación de  $CaNO_3$  durante la fase de tuberización fue capaz de provocar hasta un 30% de incremento en el peso fresco de los tubérculos comparado con la fertilización únicamente con NPK.

## 4.2. Contenido de $\text{Ca}^{2+}$ en cáscara de papa

El contenido de  $\text{Ca}^{2+}$  en la cáscara de los tubérculos de papa varió con el tratamiento, siendo mayor en tubérculos obtenidos de plantas tratadas con nitrato y sulfato de calcio, alcanzando valores de 0.201 y 0.197%, respectivamente, los cuales no mostraron diferencias significativas entre ellos, mientras que en los tubérculos de plantas del tratamiento testigo fue 32.3% menor que cuando se usó nitrato de calcio (Fig. 9).



**Figura 9**

*Variación en el contenido de  $\text{Ca}^{2+}$  en cáscaras de tubérculos de papa variedad Super Chola tratados con dos fuentes de calcio*

De acuerdo con los resultados de Martínez & Acuña (2021), la aplicación de  $\text{CaNO}_3$  indujo un mayor y mejor desarrollo de la biomasa de la raíz, lo que aumenta la capacidad de absorción del  $\text{Ca}^{2+}$  del suelo, favoreciendo la acumulación del  $\text{Ca}^{2+}$  en los tubérculos. La concentración de  $\text{Ca}^{2+}$  en los tubérculos es una característica genética y puede variar entre variedades, sin embargo, todas las variedades responden positivamente a la fertilización con  $\text{Ca}^{2+}$  y se considera que una concentración de  $\text{Ca}^{2+}$  de aproximadamente 200 ppm resulta ideal en el tejido interno del tubérculo (Palta, 2018).

Adicionalmente, la aplicación de calcio y boro tiene un efecto positivo en el rendimiento y calidad de la papa. Ilyas et al. (2021) encontraron que la aplicación de  $\text{Ca}^{2+}$  solo al 0,06 % aumentó significativamente los tubérculos grandes por planta, el rendimiento total (18,6 t/ha), la supervivencia (78 %), el contenido de materia seca (18,3 %) y el contenido de almidón (14,6 %) en comparación con el tratamiento de control. El calcio y el boro produjeron la máxima cantidad de tubérculos de gran tamaño, lo que finalmente resultó en un mayor rendimiento total de los tubérculos debido a su papel en el mantenimiento de la integridad de la membrana celular, la cual tiene un papel clave en el movimiento de agua y nutrientes a través de la célula (Ilyas et al., 2021).

Adicionalmente, Rosliani et al. (2023) señalaron que el uso de fertilizantes nitrogenados junto con fuentes de  $\text{Ca}^{2+}$  aumentan el crecimiento de las plantas de papa y así la aplicación de fertilizante compuesto al 75% del estándar de N (300 kg/ha de fertilizante CaN) fue la dosis más efectiva para la fertilización de plantas de papa en un Andisol, la cual permitió ahorrar el uso de N en un 25% con un valor de Efectividad Agronómica Relativa (EAR) del 140%.

Evidencia reciente señala que el sistema antioxidante es fortalecido por la acumulación de fenoles en las plántulas suplementadas con  $\text{Ca}^{2+}$ , por lo que la disponibilidad de este macronutriente secundario afecta potencialmente los mecanismos de crecimiento y tolerancia en plantas ejerciendo un efecto positivo en el aumento de la productividad y el rendimiento (Elkelish et al., 2019).

## CAPÍTULO V

### CONCLUSIONES, RECOMENDACIONES, BIBLIOGRAFÍA

#### Conclusiones

El crecimiento de las plantas de papa variedad Super Chola fue afectado positivamente por la adición de fuentes de  $\text{Ca}^{2+}$  como fertilizante y esto tuvo una influencia tanto en el peso fresco y seco de los tubérculos de papa, lo que finalmente incidió en el incremento del rendimiento del cultivo.

Por otra parte, el efecto de la adición de fuentes de fertilización a base de  $\text{Ca}^{2+}$  fue evidenciado en el contenido de este nutriente en la cáscara del tubérculo, lo cual incide sobre la calidad del tubérculo, lo que, por una parte, podría conferir una mayor resistencia al ataque de agentes patogénicos habitantes del suelo y, por otra parte, mejoraría su capacidad de resistir a las condiciones ambientales en postcosecha, lo que incrementa su tiempo de vida útil.

#### Recomendaciones

Debido al efecto positivo obtenido a partir de la fertilización con  $\text{Ca}^{2+}$  se recomienda incluir estas fuentes de nutrientes como parte de los programas de fertilización del cultivo. Además, es recomendable que se evalúen diferentes momentos de aplicación para determinar su influencia sobre el rendimiento.

Se sugiere desarrollar estudios similares donde se evalúen estas fuentes de  $\text{Ca}^{2+}$  para determinar su potencial en otras variedades de papa de consumo masivo en las zona sierra del país.

## 5.1. Bibliografía

- Askew, M. F. (2001). The Economic Importance of the Potato. In G. Loebenstein, P. H. Berger, A. A. Brunt, & R. H. Lawson (Eds.), *Virus and Virus-like Diseases of Potatoes and Production of Seed-Potatoes* (pp. 1–18). Springer.
- Creswell, J. W. (2012). *Planning, Conducting, and Evaluating Quantitative and Qualitative Research* (Cuarta). Pearson Education Limited.
- El Habbasha, S. F., & Ibrahim, F. M. (2015). Calcium: Physiological function, deficiency and absorption. *International Journal of ChemTech Research*, 8(12), 196–202.
- Elkelish, A. A., Alnusaire, T. S., Soliman, M. H., Gowayed, S., Senousy, H. H., & Fahad, S. (2019). Calcium availability regulates antioxidant system, physio-biochemical activities and alleviates salinity stress mediated oxidative damage in soybean seedlings. *Journal of Applied Botany and Food Quality*, 92, 258–266.  
<https://doi.org/10.5073/JABFQ.2019.092.036>
- Feng, D., Wang, X., Gao, J., Zhang, C., Liu, H., Liu, P., & Sun, X. (2023). Exogenous calcium: Its mechanisms and research advances involved in plant stress tolerance. *Frontiers in Plant Science*, 14, 1–17. <https://doi.org/10.3389/fpls.2023.1143963>
- Hamdi, W., Helali, L., Beji, R., Zhani, K., Ouertatani, S., & Gharbi, A. (2015). Effect of levels calcium nitrate addition on potatoes fertilizer. *International Research Journal of Engineering and Technology*, 2(3), 2006–2013.
- Helal, N., & Abdelhady, S. (2015). Calcium and Potassium Fertilization May Enhance Potato Tuber Yield and Quality. *Middle East J*, 4(4), 991–998.
- Hernández-Sampieri, R., Fernández-Collado, C., & Baptista-Lucio, P. (2014). *Metodología de la Investigación* (Sexta). McGraw-Hill/Interamericana Editores, S.A.
- Hirschi, K. D. (2004). The calcium conundrum. Both versatile nutrient and specific signal. *Plant Physiology*, 136(1), 2348–2442. <https://doi.org/10.1104/pp.104.046490>
- Ibraheem, F. F. R., & Hussein, A. M. (2023). Impact of Varieties and Spraying with Nano Calcium Fertilizer on the Anatomical Traits of Potato Tubers. *Annals of the Romanian Society for Cell Biology*, 27(1), 234–238.



- Ilyas, M., Ayub, G., Imran, Ali Awan, A., & Ahmad, M. (2021). Calcium and Boron Effect on Production and Quality of Autumn Potato Crop Under Chilling Temperature. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 52(4), 375–388.  
<https://doi.org/10.1080/00103624.2020.1854286>
- Kamran, M., Wang, D., Xie, K., Lu, Y., Shi, C., EL Sabagh, A., Gu, W., & Xu, P. (2021). Pre-sowing seed treatment with kinetin and calcium mitigates salt induced inhibition of seed germination and seedling growth of choysum (*Brassica rapa* var. *parachinensis*). *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 227, 112921.  
<https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2021.112921>
- Koch, M., Naumann, M., & Pawelzik, E. (2019). Cracking and fracture properties of potato (*Solanum tuberosum* L.) tubers and their relation to dry matter, starch, and mineral distribution. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 99(6), 3149–3156.  
<https://doi.org/10.1002/jsfa.9530>
- Kratzke, M. G., & Palta, J. P. (2022). Calcium Accumulation in Potato Tubers: Role of the Basal Roots. *HortScience*, 21(4), 1022–1024. <https://doi.org/10.21273/hortsci.21.4.1022>
- Ku, Y. S., Sintaha, M., Cheung, M. Y., & Lam, H. M. (2018). Plant hormone signaling crosstalks between biotic and abiotic stress responses. In *International Journal of Molecular Sciences* (Vol. 19, Issue 10). <https://doi.org/10.3390/ijms19103206>
- Kudla, J., Becker, D., Grill, E., Hedrich, R., Hippler, M., Kummer, U., Parniske, M., Romeis, T., & Schumacher, K. (2018). Advances and current challenges in calcium signaling. *New Phytologist*, 218(2), 414–431. <https://doi.org/10.1111/nph.14966>
- Kumar, S., Kumar, S., & Mohapatra, T. (2021). Interaction Between Macro- and Micro-Nutrients in Plants. *Frontiers in Plant Science*, 12, 1–9.  
<https://doi.org/10.3389/fpls.2021.665583>
- Künstler, A., Gullner, G., Ádám, A. L., Kolozsváriné Nagy, J., & Király, L. (2020). The versatile roles of sulfur-containing biomolecules in plant defense—a road to disease resistance. *Current Opinion in Biotechnology*, 59(3–4), 8–15.  
<https://doi.org/10.1016/j.copbio.2019.01.009>
- Lagos-Regalado, J. J., Lagos-Burbano, T. C., Duarte-Alvarado, D., & Lagos-Santander, L. K. (2021). Selection of potato genotypes *solanum tuberosum* group andigena by their

- tolerance to phytophthora infestans (Mont.) of Bary. *Revista Facultad Nacional de Agronomía Medellín*, 74(1), 9361–9372. <https://doi.org/10.15446/rfnam.v74n1.87566>
- Li, H., Huang, S., Ren, C., Weng, X., Zhang, S., Liu, L., & Pei, J. (2022). Optimal exogenous calcium alleviates the damage of Snow-melting agent to *Salix matsudana* seedlings. *Frontiers in Plant Science*, 13, 1–19. <https://doi.org/10.3389/fpls.2022.928092>
- Liu, H., Song, S., Zhang, H., Li, Y., Niu, L., Zhang, J., & Wang, W. (2022). Signaling Transduction of ABA, ROS, and Ca<sup>2+</sup> in Plant Stomatal Closure in Response to Drought. *International Journal of Molecular Sciences*, 23, 1–13. <https://doi.org/10.3390/ijms232314824>
- Martínez, I., & Acuña, I. (2021). Aplicación de calcio durante la tuberización incrementa el rendimiento en el cultivo de la papa. *Informativo INIA REMEHUE*, 281, 1–4.
- Mesejo, C., Yuste, R., Martínez-Fuentes, A., Reig, C., Iglesias, D. J., Primo-Millo, E., & Agustí, M. (2013). Self-pollination and parthenocarpic ability in developing ovaries of self-incompatible Clementine mandarins (*Citrus clementina*). *Physiologia Plantarum*, 148(1), 87–96. <https://doi.org/10.1111/j.1399-3054.2012.01697.x>
- Min, K., Liu, B., Lee, S. R., & Arora, R. (2021). Supplemental calcium improves freezing tolerance of spinach (*Spinacia oleracea* L.) by mitigating membrane and photosynthetic damage, and bolstering anti-oxidant and cell-wall status. *Scientia Horticulturae*, 288, 110212. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2021.110212>
- Naeem, M., Traub, J. R., Athar, H. ur R., & Loescher, W. (2020). Exogenous calcium mitigates heat stress effects in common bean: a coordinated impact of photoprotection of PSII, up-regulating antioxidants, and carbohydrate metabolism. *Acta Physiologiae Plantarum*, 42(12), 1–13. <https://doi.org/10.1007/s11738-020-03171-4>
- Oldham, L. (2019). Secondary Plant Nutrients : calcium, magnesium and sulphur. In *Secondary Plant Nutrient*.
- Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. (2023). *Datos de cultivos*. FAOSTAT. <http://www.fao.org/faostat/es/#data/QC>
- Ortiz-Ramírez, C., Michard, E., Simon, A. A., Damineli, D. S. C., Hernández-Coronado, M., Becker, J. D., & Feijó, J. A. (2017). Glutamate receptor-like channels are essential for

chemotaxis and reproduction in mosses. *Nature*, 549(7670), 91–95.

<https://doi.org/10.1038/nature23478>

Palta, J. W. (2018). *Role of Calcium in Potato Quality and Production*.

Román, M., & Hurtado, G. (2002). Cultivo de la Papa. In *Centro Nacional De Tecnología Agropecuariay Forestal*.

Rosliani, R., Saadah, I. R., Musaddad, D., & Khaririyatun, N. (2023). Potato growth, yield and quality affected by calcium and nitrogen (CaN) compound fertilizers on andisol soil type in Lembang. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 1172(1), 26–30. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1172/1/012019>

Sedlacek, C. J., Giguere, A. T., & Pjevac, P. (2020). Is Too Much Fertilizer a Problem? *Frontiers: The Earth and Its Resources*, 8, 1–8.

<https://kids.frontiersin.org/articles/10.3389/frym.2020.00063#:~:text=Fertilizers provide crops with nutrients,of every organism on Earth>.

Senbayram, M., Gransee, A., Wahle, V., & Thiel, H. (2015). Role of magnesium fertilisers in agriculture: Plant-soil continuum. *Crop and Pasture Science*, 66(12), 1219–1229.

<https://doi.org/10.1071/CP15104>

Smyth, A., Laughinghouse, H. D., Havens, K., & Frazer, T. (2022). Rethinking the Role of Nitrogen and Phosphorus in the Eutrophication of Aquatic Ecosystems. In *UF/IFAS Extension* (Vol. SGEF190). <https://doi.org/10.32473/edis-sg118-2022>

Tan, W., Meng, Q. wei, Brestic, M., Olsovska, K., & Yang, X. (2011). Photosynthesis is improved by exogenous calcium in heat-stressed tobacco plants. *Journal of Plant Physiology*, 168(17), 2063–2071. <https://doi.org/10.1016/j.jplph.2011.06.009>

Thor, K. (2019). Calcium—nutrient and messenger. *Frontiers in Plant Science*, 10, 1–7. <https://doi.org/10.3389/fpls.2019.00440>

Thor, K., & Peiter, E. (2014). Cytosolic calcium signals elicited by the pathogen-associated molecular pattern flg22 in stomatal guard cells are of an oscillatory nature. *New Phytologist*, 204(4), 873–881. <https://doi.org/10.1111/nph.13064>

- Torres-Hernández, D. F., Pinzón-Sandoval, E. H., Balaguera-López, H. E., & Silva-Parra, A. (2023). Responses of growth and yield of “Diacol Capiro” potatoes to application of silicate fertilizer amendments. *Revista Colombiana de Ciencias Hortícolas*, 17(3), 1–21.
- Torres, L., Cuesta, X., Monteros, C., & Rivadeneira, J. (2011). *Variedades de papa*. Inventario de Tecnologías e Información Para El Cultivo de Papa En Ecuador. [https://cipotato.org/papaenecuador/2017/10/12/19-superchola/#:~:text=La variedad Superchola es una,amarilla pálida \(Fotografía 19\).](https://cipotato.org/papaenecuador/2017/10/12/19-superchola/#:~:text=La variedad Superchola es una,amarilla pálida (Fotografía 19).)
- Vanneste, S., & Friml, J. (2013). Calcium: The missing link in auxin action. *Plants*, 2(4), 650–675. <https://doi.org/10.3390/plants2040650>
- Vignola, R., Watler, W., Vargas Céspedes, A., & Morales, M. (2017). *Ficha técnica: Cultivo de Papa*. <http://www.mag.go.cr/bibliotecavirtual/reduccion-impacto-por-eventos-climaticos/Informe-final-papa.pdf>
- Wang, H., Shen, Y., Wang, K., He, S., Kim, W. S., Shang, W., Wang, Z., & Shi, L. (2022). Effect of Exogenous Calcium on the Heat Tolerance in *Rosa hybrida* ‘Carolla.’ *Horticulturae*, 8(10), 1–13. <https://doi.org/10.3390/horticulturae8100980>
- Westermann, D. T. (2005). Nutritional requirements of potatoes. *American Journal of Potato Research*, 82(4), 301–307. <https://doi.org/10.1007/BF02871960>
- White, P. J., & Broadley, M. R. (2003). Calcium in plants. *Annals of Botany*, 92(4), 487–511. <https://doi.org/10.1093/aob/mcg164>
- Yan, B., & Hou, Y. (2018). Effect of Soil Magnesium on Plants: A Review. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 170(2), 1–8. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/170/2/022168>
- Yang, S., Wang, F., Guo, F., Meng, J. J., Li, X. G., Dong, S. T., & Wan, S. B. (2013). Exogenous Calcium Alleviates Photoinhibition of PSII by Improving the Xanthophyll Cycle in Peanut (*Arachis Hypogaea*) Leaves during Heat Stress under High Irradiance. *PLoS ONE*, 8(8), 1–10. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0071214>
- Zhang, S., Pan, Y., Tian, W., Dong, M., Zhu, H., Luan, S., & Li, L. (2017). Arabidopsis CNGC14 Mediates Calcium Influx Required for Tip Growth in Root Hairs. *Molecular Plant*, 10(7), 1004–1006. <https://doi.org/10.1016/j.molp.2017.02.007>

Zhao, F., Tausz, M., & De Kok, L. J. (2008). Role of Sulfur for Plant Production in Agricultural and Natural Ecosystems. In R. Hell, C. Dahl, D. B. Knaff, & T. Leustek (Eds.), *Sulfur Metabolism in Phototropic Organisms* (Issue August 2020, pp. 425–443). Springer. [https://doi.org/10.1007/978-1-4020-6863-8\\_21](https://doi.org/10.1007/978-1-4020-6863-8_21)

# **Anexos**

# 1. Análisis estadístico

## 1.1. Altura de plantas

### ADEVA

Statistix 10,0

2/11/2023; 9:34:27

#### Completely Randomized AOV for Primera

Source	DF	SS	MS	F	P
Tratam	2	61,267	30,6333	4,60	0,0192
Error	27	180,000	6,6667		
Total	29	241,267			

Grand Mean 19,733 CV 13,08

Homogeneity of Variances		F	P
Levene's Test		0,00	1,0000
O'Brien's Test		0,00	1,0000
Brown and Forsythe Test		0,00	1,0000

#### Welch's Test for Mean Differences

Source	DF	F	P
Tratam	2,0	4,43	0,0272
Error	18,0		

Component of variance for between groups 2,39667  
Effective cell size 10,0

Tratam	Mean
1	18,000
2	21,500
3	19,700
Observations per Mean	10
Standard Error of a Mean	0,8165
Std Error (Diff of 2 Means)	1,1547

#### Completely Randomized AOV for Segunda

Source	DF	SS	MS	F	P
Tratam	2	101,267	50,6333	2,41	0,1087
Error	27	566,700	20,9889		
Total	29	667,967			

Grand Mean 39,367 CV 11,64

Homogeneity of Variances		F	P
Levene's Test		0,00	1,0000
O'Brien's Test		0,00	1,0000
Brown and Forsythe Test		0,00	1,0000

#### Welch's Test for Mean Differences

Source	DF	F	P
Tratam	2,0	2,33	0,1263
Error	18,0		

Component of variance for between groups 2,96444  
 Effective cell size 10,0

**Tratam Mean**

1 37,100  
 2 41,600  
 3 39,400

Observations per Mean 10  
 Standard Error of a Mean 1,4488  
 Std Error (Diff of 2 Means) 2,0488

**Completely Randomized AOV for Tercera**

Source	DF	SS	MS	F	P
Tratam	2	130,467	65,2333	3,85	0,0337
Error	27	457,200	16,9333		
Total	29	587,667			

Grand Mean 66,033 CV 6,23

**Homogeneity of Variances**

	F	P
Levene's Test	0,00	1,0000
O'Brien's Test	0,00	1,0000
Brown and Forsythe Test	0,00	1,0000

**Welch's Test for Mean Differences**

Source	DF	F	P
Tratam	2,0	3,71	0,0446
Error	18,0		

Component of variance for between groups 4,83000  
 Effective cell size 10,0

**Tratam Mean**

1 63,400  
 2 68,500  
 3 66,200

Observations per Mean 10  
 Standard Error of a Mean 1,3013  
 Std Error (Diff of 2 Means) 1,8403

**Completely Randomized AOV for Cuarta**

Source	DF	SS	MS	F	P
Tratam	2	260,11	130,057	3,09	0,0618
Error	27	1135,50	42,056		
Total	29	1395,61			

Grand Mean 88,930 CV 7,29

**Homogeneity of Variances**

	F	P
Levene's Test	0,00	1,0000
O'Brien's Test	0,00	1,0000
Brown and Forsythe Test	0,00	1,0000

**Welch's Test for Mean Differences**

Source	DF	F	P
Tratam	2,0	2,98	0,0761
Error	18,0		



Component of variance for between groups	8,80014
Effective cell size	10,0

Tratam	Mean
1	85,500
2	92,690
3	88,600
Observations per Mean	10
Standard Error of a Mean	2,0507
Std Error (Diff of 2 Means)	2,9002

## Prueba de medias

Statistix 10,0 2/11/2023; 9:36:10

### Tukey HSD All-Pairwise Comparisons Test of Primera by Tratam

Tratam	Mean	Homogeneous Groups
2	21,500	A
3	19,700	AB
1	18,000	B

Alpha	0,05	Standard Error for Comparison	1,1547
Critical Q Value	3,507	Critical Value for Comparison	2,8634

There are 2 groups (A and B) in which the means are not significantly different from one another.

### Tukey HSD All-Pairwise Comparisons Test of Segunda by Tratam

Tratam	Mean	Homogeneous Groups
2	41,600	A
3	39,400	A
1	37,100	A

Alpha	0,05	Standard Error for Comparison	2,0488
Critical Q Value	3,507	Critical Value for Comparison	5,0808

There are no significant pairwise differences among the means.

### Tukey HSD All-Pairwise Comparisons Test of Tercera by Tratam

Tratam	Mean	Homogeneous Groups
2	68,500	A
3	66,200	AB
1	63,400	B

Alpha	0,05	Standard Error for Comparison	1,8403
Critical Q Value	3,507	Critical Value for Comparison	4,5636

There are 2 groups (A and B) in which the means are not significantly different from one another.

### Tukey HSD All-Pairwise Comparisons Test of Cuarta by Tratam

Tratam	Mean	Homogeneous Groups
2	92,690	A
3	88,600	A
1	85,500	A

Alpha 0,05 Standard Error for Comparison 2,9002  
 Critical Q Value 3,507 Critical Value for Comparison 7,1919  
 There are no significant pairwise differences among the means.

## Resumen de los descriptivos estadísticos

Statistix 10,0

2/11/2023; 9:36:49

### Breakdown for Primera

Variable	Level	Mean	SD	SE	Minimum	Maximum
Tratam	1	18,000	2,5820	0,8165	14,000	22,000
Tratam	2	21,500	2,5820	0,8165	17,500	25,500
Tratam	3	19,700	2,5820	0,8165	15,700	23,700
Overall		19,733	2,8844	0,5266	14,000	25,500

Cases Included 30 Missing Cases 0

### Breakdown for Segunda

Variable	Level	Mean	SD	SE	Minimum	Maximum
Tratam	1	37,100	4,5814	1,4488	30,000	45,000
Tratam	2	41,600	4,5814	1,4488	34,500	49,500
Tratam	3	39,400	4,5814	1,4488	32,300	47,300
Overall		39,367	4,7993	0,8762	30,000	49,500

Cases Included 30 Missing Cases 0

### Breakdown for Tercera

Variable	Level	Mean	SD	SE	Minimum	Maximum
Tratam	1	63,400	4,1150	1,3013	56,000	70,000
Tratam	2	68,500	4,1150	1,3013	61,100	75,100
Tratam	3	66,200	4,1150	1,3013	58,800	72,800
Overall		66,033	4,5016	0,8219	56,000	75,100

Cases Included 30 Missing Cases 0

### Breakdown for Cuarta

Variable	Level	Mean	SD	SE	Minimum	Maximum
Tratam	1	85,500	6,4850	2,0507	78,000	94,000
Tratam	2	92,690	6,4850	2,0507	85,190	101,19
Tratam	3	88,600	6,4850	2,0507	81,100	97,100
Overall		88,930	6,9372	1,2666	78,000	101,19

Cases Included 30 Missing Cases 0

## 1.2. Peso de tubérculos (los datos fueron transformados por $\sqrt{(x + 3)}$ )

### ADEVA

**Completely Randomized AOV for Primsq**

Source	DF	SS	MS	F	P
Tratam	2	8,705	4,35252	0,49	0,6162
Error	75	669,755	8,93006		
Total	77	678,460			

Grand Mean 8,5151 CV 35,09

**Homogeneity of Variances**

	F	P
Levene's Test	1,75	0,1816
O'Brien's Test	1,62	0,2045
Brown and Forsythe Test	2,15	0,1238

**Welch's Test for Mean Differences**

Source	DF	F	P
Tratam	2,0	0,55	0,5815
Error	49,7		

Component of variance for between groups -0,17790  
 Effective cell size 25,7

Tratam	N	Mean	SE
1	21	8,1236	0,6521
2	27	8,9489	0,5751
3	30	8,3988	0,5456

**Completely Randomized AOV for Segsq**

Source	DF	SS	MS	F	P
Tratam	2	7,503	3,75142	0,47	0,6252
Error	75	595,246	7,93661		
Total	77	602,749			

Grand Mean 7,6101 CV 37,02

**Homogeneity of Variances**

	F	P
Levene's Test	1,65	0,1984
O'Brien's Test	1,53	0,2238
Brown and Forsythe Test	1,97	0,1469

**Welch's Test for Mean Differences**

Source	DF	F	P
Tratam	2,0	0,44	0,6495
Error	49,6		

Component of variance for between groups -0,16265  
 Effective cell size 25,7

Tratam	N	Mean	SE
1	21	7,4442	0,6148
2	27	8,0329	0,5422
3	30	7,3457	0,5143

**Completely Randomized AOV for Tercsq**

Source	DF	SS	MS	F	P
				38	

Tratam	2	4,443	2,22134	0,33	0,7181
Error	75	500,897	6,67863		
Total	77	505,340			

Grand Mean 6,7021 CV 38,56

<b>Homogeneity of Variances</b>		<b>F</b>	<b>P</b>
Levene's Test		2,34	0,1031
O'Brien's Test		2,20	0,1183
Brown and Forsythe Test		2,56	0,0844

#### Welch's Test for Mean Differences

Source	DF	F	P
Tratam	2,0	0,28	0,7561
Error	49,8		

Component of variance for between groups -0,17323  
Effective cell size 25,7

Tratam	N	Mean	SE
1	21	6,7351	0,5639
2	27	6,9833	0,4973
3	30	6,4261	0,4718

#### Completely Randomized AOV for Cuarsq

Source	DF	SS	MS	F	P
Tratam	2	4,070	2,03517	0,60	0,5531
Error	75	255,717	3,40956		
Total	77	259,787			

Grand Mean 5,2638 CV 35,08

<b>Homogeneity of Variances</b>		<b>F</b>	<b>P</b>
Levene's Test		1,31	0,2764
O'Brien's Test		1,20	0,3058
Brown and Forsythe Test		1,65	0,1990

#### Welch's Test for Mean Differences

Source	DF	F	P
Tratam	2,0	0,63	0,5378
Error	49,5		

Component of variance for between groups -0,05341  
Effective cell size 25,7

Tratam	N	Mean	SE
1	21	5,0551	0,4029
2	27	5,5751	0,3554
3	30	5,1298	0,3371

#### Prueba de medias

Statistix 10.0 Análisis atltura de...; 2/11/2023; 9:52:55

#### Tukey HSD All-Pairwise Comparisons Test of Primsq by Tratam

Tratam Mean Homogeneous Groups

2	8,9489	A
3	8,3988	A
1	8,1236	A

Alpha 0,05 Standard Error for Comparison 0,7927 TO 0,8695  
 Critical Q Value 3,382 Critical Value for Comparison 1,8958 TO 2,0793  
 There are no significant pairwise differences among the means.

**Tukey HSD All-Pairwise Comparisons Test of Segsq by Tratam**

Tratam	Mean	Homogeneous Groups
2	8,0329	A
1	7,4442	A
3	7,3457	A

Alpha 0,05 Standard Error for Comparison 0,7473 TO 0,8197  
 Critical Q Value 3,382 Critical Value for Comparison 1,7872 TO 1,9603  
 There are no significant pairwise differences among the means.

**Tukey HSD All-Pairwise Comparisons Test of Tercsq by Tratam**

Tratam	Mean	Homogeneous Groups
2	6,9833	A
1	6,7351	A
3	6,4261	A

Alpha 0,05 Standard Error for Comparison 0,6855 TO 0,7519  
 Critical Q Value 3,382 Critical Value for Comparison 1,6395 TO 1,7982  
 There are no significant pairwise differences among the means.

**Tukey HSD All-Pairwise Comparisons Test of Cuarsq by Tratam**

Tratam	Mean	Homogeneous Groups
2	5,5751	A
3	5,1298	A
1	5,0551	A

Alpha 0,05 Standard Error for Comparison 0,4898 TO 0,5373  
 Critical Q Value 3,382 Critical Value for Comparison 1,1714 TO 1,2848  
 There are no significant pairwise differences among the means.

**Resumen de los descriptivos estadísticos**

Statistix 10,0 Análisis atltura de...; 2/11/2023; 9:53:44

**Breakdown for Primera**

Variable	Level	Mean	SD	SE	Minimum	Maximum
Tratam	1	67,952	41,464	9,0481	23,000	199,00
Tratam	2	86,667	63,969	12,311	19,000	290,00
Tratam	3	77,767	55,335	10,103	9,0000	206,00
Overall		78,205	55,094	6,2382	9,0000	290,00

Cases Included 78 Missing Cases 0

**Breakdown for Segunda**

Variable	Level	Mean	SD	SE	Minimum	Maximum
Tratam	1	57,095	37,801	8,2488	18,000	156,00
Tratam	2	70,074	54,428	10,475	15,000	240,00
Tratam	3	59,833	45,205	8,2533	7,0000	162,00
Overall		62,641	46,604	5,2768	7,0000	240,00

Cases Included 78 Missing Cases 0

#### Breakdown for Tercera

Variable	Level	Mean	SD	SE	Minimum	Maximum
Tratam	1	45,714	28,155	6,1440	16,000	118,00
Tratam	2	53,111	44,158	8,4983	9,0000	190,00
Tratam	3	46,033	38,925	7,1067	5,0000	158,00
Overall		48,397	38,038	4,3070	5,0000	190,00

Cases Included 78 Missing Cases 0

#### Breakdown for Cuarta

Variable	Level	Mean	SD	SE	Minimum	Maximum
Tratam	1	24,714	17,373	3,7911	6,0000	72,000
Tratam	2	31,444	22,260	4,2839	5,0000	94,000
Tratam	3	27,300	22,594	4,1251	2,0000	97,000
Overall		28,038	21,101	2,3892	2,0000	97,000

Cases Included 78 Missing Cases 0

### 1.3. Rendimiento

#### ADEVA (Los datos fueron transformados por $y = \log x$ )

Statistix 10,0

2/11/2023; 14:01:07

#### Completely Randomized AOV for Rendimiento

Source	DF	SS	MS	F	P
Tratam	2	1,774E+09	8,870E+08	1,97	0,1470
Error	75	3,382E+10	4,510E+08		
Total	77	3,560E+10			

Grand Mean 29515 CV 71,95

#### Homogeneity of Variances

	F	P
Levene's Test	1,76	0,1787
O'Brien's Test	1,67	0,1949
Brown and Forsythe Test	3,10	0,0510

#### Welch's Test for Mean Differences

Source	DF	F	P
Tratam	2,0	3,14	0,0520
Error	49,4		

Component of variance for between groups 1,695E+07

Effective cell size

25,7

Tratam	N	Mean	SE
1	21	21690	4634,1
2	27	32933	4086,9
3	30	31915	3877,2

### Completely Randomized AOV for Rendlg

Source	DF	SS	MS	F	P
Tratam	2	0,23670	0,11835	1,02	0,03669
Error	75	8,73495	0,11647		
Total	77	8,97165			

Grand Mean 4,3497 CV 7,85

Homogeneity of Variances	F	P
Levene's Test	4,35	0,0163
O'Brien's Test	4,10	0,0205
Brown and Forsythe Test	2,90	0,0612

### Welch's Test for Mean Differences

Source	DF	F	P
Tratam	2,0	1,49	0,2355
Error	49,9		

Component of variance for between groups 7,313E-05  
Effective cell size 25,7

Tratam	N	Mean	SE
1	21	4,2670	0,0745
2	27	4,4082	0,0657
3	30	4,3549	0,0623

### Prueba de medias

Statistix 10,0

2/11/2023; 14:02:00

### Tukey HSD All-Pairwise Comparisons Test of Rendimien by Tratam

Tratam	Mean	Homogeneous Groups
2	32933	A
3	31915	A
1	21690	B

Alpha 0,05 Standard Error for Comparison 5633,4 TO 6178,8  
Critical Q Value 3,382 Critical Value for Comparison 13472 TO 14777  
There are no significant pairwise differences among the means.

### Tukey HSD All-Pairwise Comparisons Test of Rendlg by Tratam

Tratam	Mean	Homogeneous Groups
2	4,4082	A
3	4,3549	A
1	4,2670	B

Alpha 0,05 Standard Error for Comparison 0,0905 TO 0,0993  
Critical Q Value 3,382 Critical Value for Comparison 0,2165 TO 0,2375

There are no significant pairwise differences among the means.

### 1.4. Contenido de calcio

Statistix 10,0

2/11/2023; 14:34:28

#### Completely Randomized AOV for Ca

Source	DF	SS	MS	F	P
Tratamien	2	0,02654	0,01327	6,25	0,0059
Error	27	0,05734	0,00212		
Total	29	0,08388			

Grand Mean 0,1780 CV 25,89

#### Homogeneity of Variances

	F	P
Levene's Test	1,09	0,3498
O'Brien's Test	0,97	0,3928
Brown and Forsythe Test	0,72	0,4982

#### Welch's Test for Mean Differences

Source	DF	F	P
Tratamien	2,0	17,92	0,0001
Error	13,8		

Component of variance for between groups 1,115E-03  
Effective cell size 10,0

#### Tratamien Mean

1	0,1360
2	0,2010
3	0,1970
Observations per Mean	10
Standard Error of a Mean	0,0146
Std Error (Diff of 2 Means)	0,0206

Statistix 10,0

2/11/2023; 14:35:04

#### Tukey HSD All-Pairwise Comparisons Test of Ca by Tratamien

Tratamien	Mean	Homogeneous Groups
2	0,2010	A
3	0,1970	A
1	0,1360	B

Alpha 0,05 Standard Error for Comparison 0,0206  
Critical Q Value 3,507 Critical Value for Comparison 0,0511

There are 2 groups (A and B) in which the means are not significantly different from one another.

Statistix 10,0

2/11/2023; 14:36:03

#### Breakdown for Ca

Variable	Level	Mean	SD	Minimum	Maximum
Tratamien	1	0,1360	0,0313	0,1000	0,2000
Tratamien	2	0,2010	0,0120	0,1800	0,2200



Tratamien	3	0,1970	0,0724	0,1500	0,4000
Overall		0,1780	0,0538	0,1000	0,4000

Cases Included 30 Missing Cases 0

## 2. Fotos del ensayo



**Figura 10.** *Toma de datos sobre altura de planta*