



UNIVERSIDAD  
**NACIONAL**  
DE COLOMBIA

**Calcio, Magnesio y Azufre, consumo y  
distribución en papa (*Solanum tuberosum*  
L. Grupo Andigenum)**

**Kristal Castellanos Ruiz**

Universidad Nacional de Colombia  
Facultad de Ciencias Agrarias  
Maestría en Ciencias Agrarias, Línea: Fisiología Vegetal  
Bogotá, D.C.  
2021



**Calcio, Magnesio y Azufre, consumo y distribución  
en papa (*Solanum tuberosum* L. Grupo Andigena)**

**Calcium, Magnesium and Sulphur, uptake and  
distribution in potato (*Solanum tuberosum* L.  
Group Andigenum)**

**Kristal Castellanos Ruiz**

Tesis presentada como requisito para optar al título de:

**Magister en Ciencias Agrarias**

**Director:**

Luis Ernesto Rodríguez

**Codirector:**

Manuel Iván Gómez

Línea de Investigación:

**Fisiología Vegetal**

Universidad Nacional de Colombia

Facultad de Ciencias Agrarias

Escuela de Posgrados

Bogotá D.C.

2021



## *Dedicatoria*

*A Dios, por acompañarme en cada paso de este camino  
y por cada una de las maravillosas personas,  
momentos y enseñanzas que me brindó.*

*A mis padres Lida Ruiz Duarte y Carlos Alberto Castellanos  
por inculcarme con amor los mayores valores  
y la fortaleza para alcanzar mis metas.*

*A mi querida hermana, Gabriela Castellanos Ruiz,  
por ser mi mayor amiga y gran apoyo.*



## **Agradecimientos**

A los profesores Dr. Luis Ernesto Rodríguez y Dr. Manuel Ivan Gómez por ser excelentes tutores, por su dirección, aporte técnico y apoyo en el desarrollo de éste proyecto de de grado. Al I.A Johan Sebastian Urquijo por su apoyo incondicional durante la maestría y en el análisis estadístico de los dos artículos que componen este documento.

A la Facultad de Ciencias Agrarias de la Universidad Nacional de Colombia Sede Bogotá por brindar los espacios y equipos. A los profesores Teresa Mosquera, Roberto Villalobos, Stanislav Magnitsky, Elena Brochero y Joaquín Ramirez por sus aportes y correcciones en las asignaturas de Seminario I y II.

A la empresa privada Ingeplant Ingeniería en Nutrición de Cultivos SAS por la financiación y logística del proyecto y al equipo técnico que acompañó el proceso de campo y laboratorio.





## Resumen

Los nutrientes minerales calcio (Ca), magnesio (Mg) y azufre (S) tienen un impacto directo en el rendimiento y calidad del tubérculo en papa. Con frecuencia se encuentran problemas de sobre o sub-dosificación en los cultivos afectando negativamente el rendimiento y calidad de los tubérculos. Es necesario desarrollar herramientas de diagnóstico que permitan optimizar el manejo nutricional de Ca-Mg-S en papa. La investigación tuvo como objetivos para los nutrientes Ca, Mg y S en dos cultivares del Grupo Andigenum: i) establecer las curvas críticas de dilución, índices de cosecha y relación entre nutrientes, ii) caracterizar los patrones de acumulación, eficiencia de traslocación, uso eficiente y eficiencia de recuperación del fertilizante durante el ciclo productivo. Se establecieron cuatro experimentos en campo en dos ciclos de producción, en las localidades de Facatativá (suelos de alta fertilidad) y Chocontá (suelos de baja fertilidad). Se evaluaron dos cultivares (Diacol Capiro y Pastusa Suprema) y dos niveles de fertilización (0 y 100% de la dosis recomendada de macro y micronutrientes esenciales). Se midió la biomasa seca y contenido de Ca-Mg-S en tubérculos y parte aérea desde la formación de tallos principales hasta maduración del tubérculo. Las curvas críticas establecidas para Capiro fueron:  $Ca_c = 1.7326W^{-0.2956}$ ,  $Mg_c = 0.7191W^{-0.2803}$ ,  $S_c = 0.6461W^{-0.3904}$  y para Suprema:  $Ca_c = 1.523W^{-0.2559}$ ,  $Mg_c = 0.6507W^{-0.236}$ ,  $S_c = 0.7669W^{-0.3932}$ . Se establecieron niveles críticos para cinco etapas fenológicas críticas del cultivo. La acumulación total de nutrientes en  $kg\ ha^{-1}$  siguió el orden de Ca (147) > Mg (66) > S (52), mientras en la eficiencia de traslocación el orden fue S (44%) > Mg (32%) > Ca (6%). Capiro mostro una mayor fuerza vertedero, uso eficiente de los nutrientes y mayor capacidad de adaptación frente a Suprema. La mayor acumulación de Ca-Mg-S se obtuvo en la localidad de Facatativá, sin embargo, la mayor eficiencia de traslocación y de recuperación se observó en Chocontá. La eficiencia de recuperación del fertilizante fue baja en ambas localidades (<14%). Se concluye que Diacol Capiro presenta una mayor adaptación a suelos de alta fertilidad (Facatativá), y Suprema a suelos de baja fertilidad (Chocontá). Las curvas de  $Ca_c$ ,  $Mg_c$  y  $S_c$  proporcionan una herramienta para realizar el diagnóstico nutricional en etapas críticas del desarrollo, siendo las primeras reportadas para estos nutrientes y para cultivares de papa del Grupo Andigenum.

**Palabras clave:** Concentración crítica, curvas de absorción, eficiencia de traslocación.

## Abstract

Mineral nutrients calcium (Ca), magnesium (Mg) and sulfur (S) have a have direct impact on yield and quality of the potato tuber. Problems of over or under-dosage are common in crops and this affects negatively tubers yield and quality. It is necessary to develop diagnostic tools to optimize the management of Ca-Mg-S in potato crops. The objectives of this research, for the elements Ca, Mg and S in two cultivars of the Andigenum Group were: i) establish the critical dilution curves, harvest index and relationship between nutrients, ii) characterize accumulation patterns, translocation efficiency, use efficiency and fertilizer recovery efficiency during crop cycle. Four field experiments were established in two production cycles in the localities of Facatativá (high fertility soils) and Chocontá (low fertility soils). Two cultivars (Diacol Capiro and Pastusa Suprema) and two levels of fertilization (0 and 100% of the recommended dose of essential macro and micronutrients) were evaluated. The dry biomass and Ca-Mg-S content in tubers and aerial part were measured from the formation of main stems until the maturation of the tuber. The critical curves established for Capiro were:  $Ca_c = 1.7326W - 0.2956$ ,  $Mg_c = 0.7191W - 0.2803$ ,  $S_c = 0.6461W - 0.3904$  and for Suprema:  $Ca_c = 1.523W - 0.2559$ ,  $Mg_c = 0.6507W - 0.236$ ,  $S_c = 0.7669W - 0.3932$ . Critical levels were established for five critical phenological stages of the crop. Total nutrients accumulation in kg ha<sup>-1</sup> followed the order of Ca (147) > Mg (66) > S (52), while in translocation efficiency the order was S (44%) > Mg (32%) > Ca (6%). Capiro showed greater sink strength, efficient use of nutrients and greater adaptability compared to Suprema. The highest accumulation of Ca-Mg-S was obtained in Facatativá, however, the highest translocation and recovery efficiency was observed in Chocontá. Fertilizer recovery efficiency was low in both locations (<14%). It is concluded that Diacol Capiro has a better adaptation to high fertility soils (Facatativá), while Suprema has better performance in low fertility soils (Chocontá). The  $Ca_c$ ,  $Mg_c$  and  $S_c$  curves constitute a tool for the nutritional diagnosis in critical stages of development, being the first ones reported for these nutrients and for potato cultivars of the Andigenum Group.

**Key words:** Critical concentration, absorption curves, efficiency translocation,

# Contenido

	Pág.
<b>Resumen.....</b>	<b>IX</b>
<b>Lista de figuras .....</b>	<b>XIII</b>
<b>Lista de tablas.....</b>	<b>XV</b>
<b>Introducción .....</b>	<b>1</b>
Objetivo general .....	4
Objetivos específicos .....	4
Bibliografía.....	5
<b>Capítulo 1. Curvas críticas de dilución para calcio, magnesio y azufre en papa (<i>Solanum tuberosum</i> L. Grupo Andigenum).....</b>	<b>100</b>
Resumen.....	100
Abstract.....	111
1.1 Introducción .....	122
1.2 Materiales y Métodos.....	144
1.2.1 Sitio de estudio.....	144
1.2.2 Diseño experimental y manejo del cultivo.....	15
1. 2.3 Muestreo y mediciones .....	16
1.2.4 Análisis estadístico .....	16
1.3 Consideraciones éticas .....	18
1.4 Resultados.....	18
1.4.1 Curvas críticas de dilución .....	18
1.4.2 Índices de Cosecha.....	20
1.4.3 Relación entre nutrientes Ca-Mg-S.....	23
1.5 Discusión .....	27
1.6 Conclusiones .....	32
1.7 Agradecimientos .....	32
1.8 Bibliografía .....	32
<b>Capítulo 2. Acumulación y distribución de calcio, magnesio y azufre en papa (<i>Solanum tuberosum</i> Grupo Andigenum).....</b>	<b>39</b>
Resumen.....	39
Abstract.....	40
2.1 Introducción .....	40
2.2 Materiales y Métodos.....	42
2.2.1 Sitio de estudio.....	42
2.2.2 Diseño experimental y manejo del cultivo.....	43

---

2.2.3 Muestreo y mediciones.....	44
2.2.4 Análisis estadístico .....	45
2.3 Consideraciones éticas .....	47
2.4 Resultados.....	47
2.4.1 Curvas de crecimiento.....	47
2.4.2 Curvas de consumo.....	48
2.4.3 Eficiencia de traslocación .....	52
2.4.4. Uso eficiente de los nutrientes.....	54
2.4.5 Eficiencia de adquisición o recuperación .....	55
2.5 Discusión .....	56
2.6 Conclusiones .....	60
2.7 Agradecimientos .....	60
2.8 Bibliografía .....	60
<b>Conclusión general.....</b>	<b>65</b>

## Lista de figuras

	Pág.
<b>Capítulo 1.</b>	
<b>Figura 1.</b> Curvas críticas de dilución de Ca (a), Mg (b) y S (c) para dos cv. de <i>Solanum tuberosum</i> L. grupo Andigenum (Diacol Capiro y Pastusa Suprema), bajo condiciones no limitantes de nutrición. Los puntos constituyen los datos a partir de los cuales se desarrollaron las curvas críticas. Cada punto representa el promedio de 13 valores tomados por cv. y etapa fenológica. Las líneas punteadas representan las CDC para biomasa mayor a 1 t ha <sup>-1</sup> .	19
<b>Figura 2.</b> Índices de cosecha (IC) para Ca, Mg y S para Diacol Capiro y Pastusa Suprema en suelos de baja (Humic Dystrudepts, Chocontá) y alta (Andic Eutrudepts, Facatativá) fertilidad, en dos ciclos productivos (2013-2016). La primera letra indica diferencias significativas entre cultivares dentro del mismo ciclo y localidad; la segunda letra, diferencia entre localidades dentro del mismo cultivar y ciclo; la tercera letra, diferencia entre ciclos dentro del mismo cultivar y localidad. Diferencias significativas según test de Tukey ( $p < 0,05$ ). Las barras de error indican el error estándar.	21
<b>Figura 3.</b> Relación entre los índices de cosecha de calcio (CaIC), magnesio (MgIC) y azufre (SIC) para Diacol Capiro y Pastusa Suprema (n=130 para cada cv). Las líneas representan el modelo ajustado de cada cv. R <sup>2</sup> : coeficiente de determinación.	23
<b>Figura 4.</b> Relación entre el contenido total de calcio (Ca), magnesio (Mg) y azufre (S) para Diacol Capiro y Pastusa Suprema (n=130 para cada cv). Las líneas representan el modelo ajustado de cada cv. R <sup>2</sup> : coeficiente de determinación.	24
<b>Figura 5.</b> Relación entre el contenido de calcio (Ca) (a), magnesio (Mg) (b) y azufre (c) en el tubérculo, con el peso fresco del tubérculo (rendimiento) para Diacol Capiro y Pastusa Suprema (n=130 para cada cv.). Las líneas representan el modelo ajustado de cada cv. R <sup>2</sup> : coeficiente de determinación. <i>“Ajuste a dos columnas”</i>	26

**Capítulo 2.**

<b>Figura 1.</b> Modelo de crecimiento en papa, cultivares Diacol Capiro y Pastusa Suprema en dos localidades con condiciones edafoclimáticas contrastantes	47
<b>Figura 2.</b> Curvas de acumulación total de Calcio, Magnesio y Azufre en papa cultivares Diacol Capiro y Pastusa Suprema en dos localidades con condiciones edafoclimáticas contrastantes	49
<b>Figura 3.</b> Curvas de acumulación de Calcio, Magnesio y Azufre en el tubérculo de papa cultivares Diacol Capiro y Pastusa Suprema en dos localidades con condiciones edafoclimáticas contrastantes	50
<b>Figura 4.</b> Eficiencia de traslocación (ET) de Ca (a), Mg (b) y S (c) en papa, cultivares Diacol Capiro y Pastusa Suprema en dos localidades con condiciones edafoclimáticas contrastantes.	53
<b>Figura 5.</b> Uso eficiente (UE) de los nutrientes Ca, Mg y S en papa, cultivares Diacol Capiro y Pastusa Suprema en dos localidades con condiciones edafoclimáticas contrastantes. La primera letra indica diferencia entre cultivares dentro de una misma localidad; la segunda letra indica diferencias significativas entre localidades para un mismo cultivar	55
<b>Figura 6.</b> Eficiencia de recuperación (RF) de los nutrientes Ca, Mg y S en papa, cultivares Diacol Capiro y Pastusa Suprema en dos localidades con condiciones edafoclimáticas contrastantes. La primera letra indica diferencia entre cultivares dentro de una misma localidad y la segunda letra indica diferencias significativas entre localidades para un mismo cultivar	56

## Lista de tablas

	<b>Pág</b>
<b>Capítulo 1.</b>	
<b>Tabla 1.</b> Variables climáticas y características de suelos en las localidades del ensayo	14
<b>Tabla 2.</b> Aportes nutricionales por localidad y ciclo para tratamiento fertilizado 100%	16
<b>Tabla 3.</b> Coeficientes de curvas críticas de dilución de Ca, Mg y S desarrolladas para Diacol Capiro y Pastusa Suprema a partir de la biomasa seca total (W) en condiciones no limitantes de nutrición mineral.	20
<b>Tabla 4.</b> Concentraciones críticas de Ca, Mg y S por etapa fenológica en condiciones no limitantes de nutrición mineral para Diacol Capiro y Pastusa Suprema	20
<b>Tabla 5.</b> Proporción entre los contenidos totales de Ca-Mg-S en papa cv. Diacol Capiro y Pastusa Suprema	26
<b>Tabla 6.</b> Intervalos de confianza para los modelos lineales de relación entre nutrientes Ca-Mg-S en los cultivares Diacol Capiro y Pastusa Suprema	27
<b>Capítulo 2</b>	
<b>Tabla 1.</b> Variables climáticas y características de suelos en las localidades de evaluación	43
<b>Tabla 2.</b> Aportes nutricionales (kg ha <sup>1</sup> ) por localidad y ciclo para los tratamientos fertilizados (100%)	44
<b>Tabla 3.</b> Puntos de muestreo en relación con los días después de siembra (DDS) y etapa fenológica	45
<b>Tabla 4.</b> Coeficientes de modelos de crecimiento en papa, cultivares Diacol Capiro y Pastusa Suprema en dos localidades del altiplano Cundiboyacense	48
<b>Tabla 5.</b> Coeficientes de curvas de acumulación total de Ca, Mg y S en papa a partir de biomasa seca, cultivares Diacol Capiro y Pastusa Suprema en dos localidades con condiciones edafoclimáticas contrastantes	51
<b>Tabla 6.</b> Coeficientes de curvas de acumulación de Ca, Mg y S en el tubérculo de papa a partir de días después de siembra, cultivares Diacol Capiro y Pastusa Suprema en dos	

---

localidades con condiciones edafoclimáticas contrastantes	51
<b>Tabla 7.</b> Pronóstico de acumulación total y en el tubérculo de Ca, Mg y S en papa por etapa fenológica, cultivares Diacol Capiro y Pastusa Suprema en dos localidades con condiciones edafoclimáticas contrastantes.	52
<b>Tabla 8.</b> Coeficientes de modelos de eficiencia de traslocación de Ca, Mg y S en papa, cultivares Diacol Capiro y Pastusa Suprema en dos localidades con condiciones edafoclimáticas contrastantes	54



## Introducción

El cultivo de papa posee una alta demanda de nutrientes en comparación a otros cultivos de ciclo corto (Gómez et al., 2017). Se estima que el rubro de fertilización puede estar alrededor del 20-24% de los costos totales del cultivo de papa (Fedepapa, 2018; Tabares et al., 2009). En el país existe una amplia oferta tecnológica de fertilizantes, a partir de los cuales se busca realizar un eficiente y eficaz manejo nutricional del cultivo. Aun así, debido al desconocimiento sobre los requerimientos del cultivo y del manejo de fuentes fertilizantes en interacción con los factores suelo, clima y genotipo, el aporte de nutrientes con frecuencia es inadecuado (Banerjee et al., 2017; Tabares et al., 2009).

Los componentes de rendimiento y calidad de la papa están directamente relacionados con un adecuado manejo de la nutrición de elementos mayores y menores (Koch et al., 2020; Naumann et al., 2020). La investigación en torno a la nutrición en papa se ha centrado en los elementos mayores N-P-K, existiendo información robusta en cuanto a su consumo, distribución y uso por parte de la planta (Gómez et al., 2019a; Naumann et al., 2020). Sin embargo, es escaso el conocimiento desarrollado para papas del grupo Andigenum sobre macronutrientes secundarios de gran importancia para el cultivo como lo son el Ca-Mg-S (Tabares et al., 2009).

El Ca es un nutriente mineral esencial para las plantas, componente de paredes y membranas celulares, participa en procesos de señalización, balance iónico y en la actividad de múltiples enzimas (Gondwe et al., 2019; Naumann et al., 2020). El Ca ingresa a la planta a través de canales ubicados en la membrana plasmática de la raíz (Thor, 2019). Una vez ingresa el nutriente se transporta como  $\text{Ca}^{+2}$  o en complejo con ácidos orgánicos. La mayor parte del Ca en su recorrido por el xilema es secuestrado y depositado localmente (Mitra, 2017). La concentración de Ca en el citosol es baja ( $< 1\mu\text{M}$ ) por lo cual el excedente es acumulado en las vacuolas (Koch et al., 2020).

Se ha reportado que la acumulación de Ca en la planta de papa, evaluada a partir de su curva de concentración, refleja un posible efecto de dilución de una cantidad fija, a medida que aumenta la materia seca (Addiscott, 1974). La suplementación del Ca determina de manera

importante la calidad del tubérculo por su papel estructural en las paredes celulares y por tanto en la resistencia mecánica de los tubérculos (Koch et al., 2019b). Son escasos los estudios sobre el comportamiento de distribución del Ca en la planta, sin embargo, se ha establecido que la mayor parte se encuentra en hojas y tallos y en menor proporción en los tubérculos. Este comportamiento se atribuye a que es un elemento de baja movilidad en el floema que se mueve por corriente de transpiración y a que los tubérculos son órganos con baja tasa de transpiración (respecto al resto de la planta) (Koch et al., 2020; Schabow y Palta, 2019).

Los tubérculos son más propensos a sufrir déficit de Ca, incluso en suelos con alto contenido y disponibilidad de este elemento (Schabow y Palta, 2019). El déficit de Ca genera diversos desordenes fisiológicos, como la aparición de manchas marrones internas, rajado y corazón hueco, los cuales afectan gravemente la calidad del tubérculo (Koch, 2018; Naumann et al., 2020). Palta, (2010) expuso que aumentando la concentración de Ca en el tubérculo se logra disminuir significativamente la aparición de desórdenes fisiológicos, daños mecánicos en cosecha e incidencia de plagas y enfermedades en el tubérculo. Otros autores han expuesto el efecto positivo de la aplicación foliar de nitrato de calcio (Seifu, 2017; Seifu y Deneke, 2017).

El Mg participa en el metabolismo energético, fotosíntesis, activación de enzimas, síntesis de proteínas, balance iónico, balance osmótico y transporte de fotoasimilados en las plantas (Altarugio et al., 2017; Koch, 2018). Debido a su alto radio de hidratación el Mg se adsorbe menos a las partículas del suelo y es fácilmente lavado. El Mg compite con Ca y K por los sitios de intercambio catiónico en el suelo y de entrada a la planta. Su ingreso a la planta se da por canales o transportadores siendo de importancia los de la familia MGT (Chen et al., 2018).

En papa, se sabe que un adecuado suplemento de Mg es esencial para el rendimiento y calidad del tubérculo, especialmente si tienen como destino el procesamiento industrial (Assunção et al., 2020; Gerendás y Führs, 2013). Silva et al., (2020) establecieron que durante la etapa vegetativa inicial el Mg se acumula principalmente en la parte aérea, sin embargo, al iniciar la tuberización la mayor del nutriente es movilizado para el crecimiento de los tubérculos. La concentración crítica de Mg en hojas (en peso seco) reportada en literatura, varía significativamente entre autores, estando en el rango de 0,14- 1,25% (Hauer-Jákli y Tränkner, 2019; Koch et al., 2019a; Walworth y Muniz, 1993).

---

Condiciones de déficit de Mg en el cultivo de papa genera una deficiente carga de sacarosa al floema, disminuyendo la translocación de fotoasimilados al tubérculo. En déficit, se puede evidenciar mayor acumulación de sacarosa en la parte aérea, disminución en el contenido de almidón, azúcares, en la resistencia mecánica del tubérculo, decoloración de la pulpa y aparición de puntos negros internos (Koch et al., 2019b, 2019a; Senbayram et al., 2015). Esta condición puede producirse especialmente en suelos ácidos o por exceso de K, dado que ambos elementos presentan antagonismo al competir por los canales de entrada a la planta (Koch, 2018; Wang et al., 2020). De acuerdo con lo anterior, Wang et al., (2020) plantean que una adecuada fertilización de Mg puede aumentar hasta en un 9,4% el rendimiento de los tubérculos.

El S participa en múltiples procesos celulares y es componente de aminoácidos (cisteína y metionina), glutatión, coenzimas, sulfolípidos y diversos metabolitos secundarios (Singh et al., 2016). La mayor parte del S la planta lo toma como  $\text{SO}_4^{2-}$ , sin embargo, las plantas también toman S de la atmósfera en las formas  $\text{SO}_2$  y  $\text{H}_2\text{S}$ . El S ingresa a la planta a través de transportadores de baja o alta afinidad como los de la familia SULTR (Bouranis et al., 2020). La expresión de transportadores varía en relación con la demanda de S la cual se encuentra coordinada con el metabolismo del nitrógeno y el carbono (Mitra, 2017).

Resultados positivos de un adecuado aporte de S sobre el rendimiento del cultivo de papa han sido reportados por diversos autores (Muthanna et al., 2017; Roy et al., 2014; Sharma et al., 2011; Singh et al., 2016). Aplicaciones de S entre 34 y 60 kg/ (Dhakad et al., 2019; Muthanna et al., 2017; Roy et al., 2014; Sharma et al., 2011; Singh et al., 2016, 2018) han aumentado significativamente el rendimiento y calidad del tubérculo. Dosis mayores han mostrado efectos negativos en el rendimiento del cultivo (Dhakad et al., 2019).

El efecto del S se ha atribuido al rol en la partición de fotoasimilados en la parte aérea y hacia los tubérculos (Sharma et al., 2011), en la síntesis de proteínas, almidón y al aumento en la tasa fotosintética (Dhakad et al., 2019). Se ha considerado la papa como una especie con baja demanda de S, teniendo concentraciones de alrededor de 1,2 a 2,8 g/kg de peso seco en tubérculos y tallos respectivamente (Dhakad et al., 2019). En plantas de papa con déficit de S se ha observado una baja utilización de nitrógeno, fósforo y potasio, así como menor peso seco en los tubérculos y bajo contenido de aminoácidos, especialmente cisteína y leucina (Eppendorfer, 1994).

Eventos de sobre o subdosificación de fertilizantes pueden generar desbalances nutricionales en el suelo y tener un impacto negativo en el rendimiento, calidad del tubérculo. Los sobrecostos que se generan y la menor rentabilidad del cultivo pueden limitar el desarrollo del sector de producción de papa. Profundizar en el conocimiento de la nutrición mineral de Ca, Mg y S es fundamental para maximizar el rendimiento de los cultivos y optimizar el uso de los recursos (Gómez et al., 2017).

Las curvas críticas de dilución (relación alométrica entre la concentración de un nutriente y la biomasa seca) son una herramienta que permite diagnosticar durante el ciclo productivo si el cultivo se encuentra en un nivel deficiente, excesivo o adecuado de un nutriente dado (Lemaire et al., 2019). Otras herramientas de utilidad para mejorar el manejo de los nutrientes son las curvas de acumulación, curvas de eficiencias de traslocación y el uso eficiente de los nutrientes. Adicionalmente es de utilidad considerar la eficiencia de recuperación o adquisición del fertilizante (Duarte et al., 2019; Silva et al., 2020). Entre cultivares de papa los patrones de acumulación de biomasa en parte aérea-tubérculos y la partición de nutrientes pueden variar ampliamente, siendo importante considerar el factor genético para el desarrollo de las anteriores variables (Giletto y Echeverría, 2015). Factores que influyen son la duración del ciclo del cultivar, la fuerza vertedero y su desempeño en una localidad determinada. De acuerdo con lo anterior a continuación se exponen los objetivos de la presente investigación:

## **Objetivo general**

Caracterizar el consumo y distribución de Ca, Mg y S en papa (*Solanum tuberosum* L. Grupo Andigena) cvs. Diacol Capiro y Pastusa Suprema en dos localidades con condiciones edafoclimáticas contrastantes del altiplano Cundi-Boyacense.

## **Objetivos específicos**

- Establecer las curvas críticas de dilución e índices de cosecha para Ca, Mg y S en papa (*Solanum tuberosum* L. Grupo Andigenum) y analizar la relación entre estos nutrientes.
- Caracterizar los patrones de acumulación, eficiencia de recuperación, uso y translocación de Ca-Mg-S en papa (cvs. Diacol Capiro y Pastusa Suprema) durante su ciclo productivo

El presente trabajo se elaboró como un compendio de dos artículos los cuales desarrollan los anteriores objetivos. Cada artículo corresponde a un capítulo y entre estos se encuentran diferencias de formato dado que se ajustaron a las especificaciones de las revistas a las cuales serán sometidos.

## **Bibliografía**

- Addiscott, T.M., 1974. Potassium and the distribution of calcium and magnesium in potato plants. *J. Sci. Food Agric.* 25, 1173–1183. <https://doi.org/10.1002/jsfa.2740250915>
- Altarugio, L.M., Loman, M.H., Nirschl, M.G., Silvano, R.G., Zavaschi, E., Carneiro, L. de M. e. S., Vitti, G.C., Luz, P.H. de C., Otto, R., 2017. Yield performance of soybean and corn subjected to magnesium foliar spray. *Pesqui. Agropecu. Bras.* 52, 1185–1191. <https://doi.org/10.1590/S0100-204X2017001200007>
- Assunção, N.S., Ribeiro, N.P., da Silva, R.M., Soratto, R.P., Fernandes, A.M., 2020. Tuber yield and allocation of nutrients and carbohydrates in potato plants as affected by limestone type and magnesium supply. *J. Plant Nutr.* 43, 51–63. <https://doi.org/10.1080/01904167.2019.1659345>
- Banerjee, H., Sarkar, S., Deb, P., Chakraborty, I., Sau, S., Ray, K., 2017. Zinc Fertilization in Potato: A Physiological and Bio-chemical Study. *Int. J. Plant Soil Sci.* 16, 1–13. <https://doi.org/10.9734/ijpss/2017/33844>
- Bouranis, D.L., Malagoli, M., Avice, J.C., Bloem, E., 2020. Advances in plant sulfur research. *Plants* 9, 4–9. <https://doi.org/10.3390/plants9020256>
- Chen, Z.C., Peng, W.T., Li, J., Liao, H., 2018. Functional dissection and transport mechanism of magnesium in plants. *Semin. Cell Dev. Biol.* 74, 142–152. <https://doi.org/10.1016/j.semcd.2017.08.005>
- Dhakad, H., Verma, S.K., Singh, S.P., Gaur, D., Arya, V., 2019. Effect of sulphur levels in combination of organic and inorganic sources of nutrient on plant growth and yield of potato (*Solanum tuberosum* L.) 8, 1855–1861.

- 
- Duarte, L.O., Clemente, J.M., Caixeta, I.A.B., Senoski, M.D.P., Aquino, L.A. De, 2019. Dry matter and nutrient accumulation curve in cabbage crop. *Rev. Caatinga* 32, 679–689. <https://doi.org/10.1590/1983-21252019v32n312rc>
- Eppendorfer, W.H., 1994. Sulphur deficiency of potatoes as reflected in chemical composition and in some measures of nutritive value. *Nor. J. Agric. Sci.* 15.
- Gerendás, J., Führs, H., 2013. The significance of magnesium for crop quality. *Plant Soil* 368, 101–128. <https://doi.org/10.1007/s11104-012-1555-2>
- Giletto, C.M., Echeverría, H.E., 2015. Critical Nitrogen Dilution Curve in Processing Potato Cultivars. *Am. J. Plant Sci.* 6, 3144–3156. <https://doi.org/10.1007/s12230-011-9226-z>
- Gómez, M.I., Magnitskiy, S., Rodríguez, L.E., 2019. Nitrogen, phosphorus and potassium accumulation and partitioning by the potato group *Andigenum* in Colombia. *Nutr. Cycl. Agroecosystems* 113, 349–363. <https://doi.org/10.1007/s10705-019-09986-z>
- Gómez, M.I., Magnitskiy, S., Rodríguez, L.E., Darghan, A.E., 2017. Accumulation of N , P , and K in the tubers of potato ( *Solanum tuberosum* L . ssp . *andigena* ) under contrasting soils of the Andean region of Colombia Acumulación de N , P y K en tubérculos de papa ( *Solanum tuberosum* L . ssp . 35, 59–67. <https://doi.org/10.15446/agron.colomb.v35n1.61068>
- Gondwe, R.L., Kinoshita, R., Suminoe, T., Aiuchi, D., Palta, J., Tani, M., 2019. Soil and tuber calcium affecting tuber quality of processing potato (*Solanum tuberosum* L.) cultivars grown in Hokkaido, Japan. *Soil Sci. Plant Nutr.* 65, 159–165. <https://doi.org/10.1080/00380768.2019.1579044>
- Hauer-Jákli, M., Tränkner, M., 2019. Critical leaf magnesium thresholds and the impact of magnesium on plant growth and photo-oxidative defense: A systematic review and meta-analysis from 70 years of research. *Front. Plant Sci.* 10, 1–15. <https://doi.org/10.3389/fpls.2019.00766>
- Koch, M., Busse, M., Naumann, M., Jákli, B., Smit, I., Cakmak, I., Hermans, C.,

- Pawelzik, E., 2019a. Differential effects of varied potassium and magnesium nutrition on production and partitioning of photoassimilates in potato plants. *Physiol. Plant.* 166, 921–935. <https://doi.org/10.1111/ppl.12846>
- Koch, M., Naumann, M., Pawelzik, E., 2019b. Cracking and fracture properties of potato (*Solanum tuberosum* L.) tubers and their relation to dry matter, starch, and mineral distribution. *J. Sci. Food Agric.* 99, 3149–3156. <https://doi.org/10.1002/jsfa.9530>
- Koch, M., Naumann, M., Pawelzik, E., Gransee, A., Hiel, H., 2020. The Importance of Nutrient Management for Potato Production Part I: Plant Nutrition and Yield. *Potato Res.* 63, 97–119. <https://doi.org/10.1007/s11540-019-09430-3>
- Koch, M.T., 2018. Effect of the potassium and magnesium nutrition on potato (*Solanum tuberosum* L.) tuber quality and plant development 142.
- Lemaire, G., Sinclair, T., Sadras, V., Bélanger, G., 2019. Allometric approach to crop nutrition and implications for crop diagnosis and phenotyping. A review. *Agron. Sustain. Dev.* 39, 1–17. <https://doi.org/10.1007/s13593-019-0570-6>
- Mitra, G., 2017. Essential plant nutrients: Uptake, use efficiency, and management, *Essential Plant Nutrients: Uptake, Use Efficiency, and Management.* <https://doi.org/10.1007/978-3-319-58841-4>
- Muthanna, M.A., K. Singh, A., Tiwari, A., Jain, V.K., Padhi, M., 2017. Effect of Boron and Sulphur Application on Plant Growth and Yield Attributes of Potato (*Solanum tuberosum* L.). *Int. J. Curr. Microbiol. Appl. Sci.* 6, 399–404. <https://doi.org/10.20546/ijcmas.2017.610.049>
- Naumann, M., Koch, M., Thiel, H., Gransee, A., Pawelzik, E., 2020. The Importance of Nutrient Management for Potato Production Part II: Plant Nutrition and Tuber Quality. *Potato Res.* 63, 121–137. <https://doi.org/10.1007/s11540-019-09430-3>
- Palta, J.P., 2010. Improving Potato Tuber Quality and Production by Targeted Calcium Nutrition: The Discovery of Tuber Roots Leading to a New Concept in Potato Nutrition. *Potato Res.* 53, 267–275. <https://doi.org/10.1007/s11540-010-9163-0>

- 
- Roy, T.S., Rahman, M., Pulok, I., 2014. Influence of potassium and sulfur on growth and yield of potato crop derived from tps seedling tuber. *J. Sustain. Agril. Tech.* 10, 15–21.
- Schabow, J.E., Palta, J.P., 2019. Intumescence Injury in the Leaves of Russet Burbank Potato Plants is Mitigated by Calcium Nutrition. *Am. J. Potato Res.* 96, 6–12. <https://doi.org/10.1007/s12230-018-9682-9>
- Seifu, Y.W., 2017. Reducing severity of late blight (*Phytophthora infestans*) and improving Potato (*Solanum tuberosum* L.) tuber yield with pre-harvest application of calcium nutrients. *Agronomy* 7. <https://doi.org/10.3390/agronomy7040069>
- Seifu, Y.W., Deneke, S., 2017. Effect of Calcium Chloride and Calcium Nitrate on Potato (*Solanum tuberosum* L.) Growth and Yield. *J. Hortic.* 04. <https://doi.org/10.4172/2376-0354.1000207>
- Senbayram, M., Gransee, A., Wahle, V., Thiel, H., 2015. Role of magnesium fertilisers in agriculture: Plant-soil continuum. *Crop Pasture Sci.* 66, 1219–1229. <https://doi.org/10.1071/CP15104>
- Sharma, D., Kushwah, S., Nema, P., Rathore, S., 2011. Effect of sulphur on yield and quality of potato (*Solanum tuberosum* L.). *Int. J. Agric. Res.* 6, 143–148.
- Silva, C.D., Soares, M.E.P., Ferreira, M.H., Cavalcante, A.C.P., Andrade, G.A.V. De, Aquino, L.A. De, 2020. Dry matter and macronutrient extraction curves of potato varieties in the Alto Paranaíba region , Brazil. *Rev. Bras. Eng. Agrícola e Ambient.* 24, 176–186.
- Singh, H., Sharma, M., Goyal, A., Bansal, M., 2016. Effect of Nitrogen and Sulphur on Growth and Yield Attributes of Potato (*Solanum tuberosum* L.). *Int. J. Plant Soil Sci.* 9, 1–8. <https://doi.org/10.9734/ijpss/2016/20237>
- Singh, S., Sharma, M., Reddy, K., Venkatesh, T., 2018. Integrated application of boron and sulphur to improve quality and economic yield in potato 39, 228–236.



- 
- Tabares, E., Villegas, S., González, L., Cotes, J., 2009. Respuesta de la papa (*Solanum tuberosum* L.) Variedad diacol capiro a la fertilización en un andisol del oriente antioqueño, Colombia. *Rev. Fac. Nac. Agron.* 62, 5099–5110.
- Thor, K., 2019. Calcium—nutrient and messenger. *Front. Plant Sci.* 10. <https://doi.org/10.3389/fpls.2019.00440>
- Walworth, J.L., Muniz, J.E., 1993. A compendium of tissue nutrient concentrations for field-grown potatoes. *Am. Potato J.* 70, 579–597. <https://doi.org/10.1007/BF02850848>
- Wang, Z., Hassan, M.U., Nadeem, F., Wu, L., Zhang, F., Li, X., 2020. Magnesium Fertilization Improves Crop Yield in Most Production Systems: A Meta-Analysis. *Front. Plant Sci.* 10, 1–10. <https://doi.org/10.3389/fpls.2019.01727>

# Capítulo 1. Curvas críticas de dilución para calcio, magnesio y azufre en papa (*Solanum tuberosum* L. Grupo Andigenum)

Kristal Castellanos Ruiz\* , Manuel Iván Gómez Sánchez , Luis Ernesto Rodríguez Molano 

Facultad de Ciencias Agrarias. Universidad Nacional de Colombia. Sede Bogotá

\*Autor para correspondencia: Kristal Castellanos Ruiz. Dirección postal: 111221, Bogotá, Colombia. Email: [kcastellanosr@unal.edu.co](mailto:kcastellanosr@unal.edu.co).

## Resumen

Los nutrientes minerales calcio (Ca), magnesio (Mg) y azufre (S), poseen un papel importante sobre el rendimiento y calidad del tubérculo en papa. Con frecuencia estos nutrientes no son manejados de forma adecuada en los planes de fertilización, siendo normal encontrar problemas de sobre o sub-dosificación. Es necesario el desarrollo de herramientas de diagnóstico que permitan optimizar el manejo de Ca-Mg-S en papa. La investigación tuvo como objetivos desarrollar las curvas críticas de dilución para Ca-Mg-S en papa (*Solanum tuberosum* L. Grupo Andigenum), establecer sus índices de cosecha y caracterizar la relación entre nutrientes. Se establecieron cuatro experimentos en campo en dos ciclos, en las localidades de Facatativá (suelos de alta fertilidad) y Chocontá (suelos de baja fertilidad). Se evaluaron dos cultivares (Diacol Capiro y Pastusa Suprema) y dos niveles de fertilización (0 y 100% de macro y micronutrientes esenciales). Se midió la biomasa seca y concentración de Ca-Mg-S en tubérculos y parte aérea desde la formación de tallos principales hasta maduración del tubérculo y se calcularon las concentraciones críticas ( $Ca_c$ ,  $Mg_c$ ,  $S_c$ ), índices de cosecha y correlaciones entre nutrientes. Las curvas críticas establecidas para Capiro fueron:  $Ca_c = 1.7326W^{-0.2956}$ ,  $Mg_c = 0.7191W^{-0.2803}$ ,  $S_c = 0.6461W^{-0.3904}$  y para Suprema:  $Ca_c = 1.523W^{-0.2559}$ ,  $Mg_c = 0.6507W^{-0.236}$ ,  $S_c = 0.7669W^{-0.3932}$ . Se establecieron niveles críticos para cinco etapas fenológicas del cultivo. Capiro presentó mayor acumulación de Ca, Mg y S en el tubérculo independiente de la localidad, mientras Suprema tuvo mejor desempeño en Chocontá. Se identificó

una relación entre los nutrientes Ca-Mg-S y se determinó que el orden de acumulación en el tubérculo es Ca<Mg<S. Capiro mostró ser un genotipo de mayor consumo de Ca-Mg-S y de mejor adaptación a localidades con condiciones edafoclimáticas contrastantes. Las curvas de  $C_{ac}$ ,  $M_{gc}$  y  $S_c$  proporcionan una herramienta para realizar el diagnóstico nutricional en etapas críticas del desarrollo, siendo las primeras reportadas en cultivos de papa del Grupo Andigenum.

**Palabras clave:** Concentración crítica, diagnóstico nutricional, índice de cosecha de nutrientes, nutrientes secundarios.

## Abstract

The mineral nutrients calcium (Ca), magnesium (Mg) and sulfur (S), plays an important role in yield and quality of potato tuber. Usually, these nutrients are not adequately supplied in fertilization plans being normal to find problems of over or under-dosage. It is necessary to develop diagnostic tools to optimize the management of Ca-Mg-S in potato crops. The research aimed to develop the critical dilution curves for Ca-Mg-S in potato (*Solanum tuberosum* L. Group Andigenum), establish its harvest indices and characterize the relationship between nutrients. Four field experiments were established in two cycles in the localities of Facatativá (high fertility soils) and Chocontá (low fertility soils). Two cultivars (Diacol Capiro and Pastusa Suprema) and two levels of fertilization (0 and 100% of macro and micronutrients) were evaluated. The dry biomass and Ca-Mg-S concentration in tubers and aerial part were measured from the formation of main stems until tuber maturation and this information was used to calculate the critical concentrations ( $C_{ac}$ ,  $M_{gc}$ ,  $S_c$ ), harvest indices and correlations between nutrients. The critical curves established for Capiro were:  $C_{ac} = 1.7326W^{-0.2956}$ ,  $M_{gc} = 0.7191W^{-0.2803}$ ,  $S_c = 0.6461W^{-0.3904}$  and for Suprema:  $C_{ac} = 1.523W^{-0.2559}$ ,  $M_{gc} = 0.6507W^{-0.236}$ ,  $S_c = 0.7669W^{-0.3932}$ . Critical levels were established for five phenological stages of the crop. Capiro presented higher accumulation of Ca, Mg and S in the tuber independently of locality, while Suprema had better performance in Chocontá. A close relationship was established between Ca-Mg-S nutrients and it was determined that the accumulation in the tuber follows the order Ca < Mg < S. Capiro shows to be a genotype with greater Ca-Mg-S uptake and better adaptation to localities with contrasting edaphoclimatic conditions. The  $C_{ac}$ ,  $M_{gc}$  and  $S_c$  curves provide a tool to carry out the nutritional diagnosis in critical stages of development, being the first ones reported for potatoes of Group Andigenum.

**Keywords:** Critical concentration, nutritional diagnosis, nutrient harvest index, secondary nutrients.

## 1.1 Introducción

La papa (*Solanum tuberosum* L), especie originaria de Suramérica, presenta una amplia adaptabilidad a diferentes condiciones edafoclimáticas y es cultivada en países de regiones templadas, tropicales y subtropicales (Campos and Ortiz, 2020). Los tubérculos de la papa son ricos en carbohidratos, bajos en grasas y tienen un adecuado balance de vitaminas y minerales (Gaj et al., 2020; Handayani et al., 2019). Debido a su alta calidad nutricional y potencial de rendimiento, la papa es una especie de gran importancia para la seguridad alimentaria en el mundo (Raymundo et al., 2018). En los últimos años, ha habido un aumento progresivo en el área cultivada de papa, siendo actualmente de 19 millones de hectáreas con una producción aproximada de 378 millones de toneladas (Campos y Ortiz, 2020). En Colombia, los departamentos que mayor participación tienen en su producción son: Cundinamarca, con el 37 %; Boyacá, con el 27 %, y Nariño, con el 20% (Minagricultura, 2019).

Los cultivares (cvs.) Diacol Capiro y Pastusa Suprema, del grupo Andigenum, son de los de mayor consumo en Colombia siendo apreciados por sus cualidades para procesamiento industrial (chips o bastón) y consumo en fresco (Barrientos y Núñez, 2014; Gómez et al., 2019a). Ambos cvs. son tetraploides, producen tubérculos en condiciones de día corto, tienen buen comportamiento en fritura y un rendimiento potencial superior a 40 ton ha<sup>-1</sup> (Campos y Ortiz, 2020; Guerrero-Guio et al., 2019).

El cultivo de papa posee una alta demanda de nutrientes respecto a otros cultivos de ciclo corto (Helal y AbdElhady, 2015), la fertilización puede representar cerca del 24% de los costos totales (Fedepapa, 2018). La investigación en nutrición es extensa para nitrógeno (N), fósforo (P) y potasio (K) (Koch et al., 2020). Sin embargo, la información sobre calcio (Ca), magnesio (Mg) y azufre (S), necesarios para obtener un óptimo rendimiento y calidad del tubérculo, es escasa (Hauer-Jákli y Tränkner, 2019; Koch et al., 2020; Naumann et al., 2020). Estos elementos cumplen papeles fundamentales por ejemplo en paredes y membranas celulares, en señalización, activación de enzimas, metabolismo energético, formando aminoácidos, sulfolípidos, entre otros (Koch et al., 2020).

El manejo tradicional de los cultivos con aportes enfocados a N-P-K en ciclos continuos de producción, sumado a los procesos naturales de pérdida de nutrientes (lixiviación, erosión, fijación, entre otros), han llevado a la disminución de los contenidos naturales de macronutrientes

secundarios en el suelo y generado desbalances que limitan la disponibilidad de Ca, Mg y S (Aula et al., 2019; Wang et al., 2020). El aporte de Ca-Mg-S, con frecuencia se realiza frecuentemente por recomendaciones generales, implicando sobre o sub-dosificación de los nutrientes (Koch et al., 2019a). Este problema no necesariamente es detectado durante el ciclo productivo, advirtiendo su efecto negativo hasta la cosecha en el rendimiento y calidad del tubérculo. En este contexto, es necesario desarrollar una herramienta de diagnóstico que permita realizar la evaluación nutricional de Ca-Mg-S durante el ciclo productivo, con el fin de detectar y corregir excesos o déficit de forma oportuna.

Un adecuado aporte de Ca-Mg-S tiene efectos positivos sobre el rendimiento (Muthanna et al., 2017; Seifu y Deneke, 2017; Wang et al., 2020) y calidad del tubérculo (Assunção et al., 2020; Koch et al., 2019b; Singh et al., 2018). En condiciones de déficit de éstos nutrientes, se presenta menor traslocación de fotoasimilados al tubérculo, baja resistencia mecánica, gravedad específica y múltiples desordenes fisiológicos como el corazón hueco (Koch et al., 2019a; Schabow y Palta, 2019). Por el contrario, dosis superiores al óptimo pueden conllevar a efectos negativos por exceso, desbalance de otros nutrientes, pérdida de fertilizante y sobrecostos (Barroso et al., 2021; Wang et al., 2018).

La curva crítica de dilución (CDC) de un nutriente mineral, es una relación alométrica entre su concentración en la planta y la biomasa o el área foliar (Lemaire et al., 2019). Esta herramienta, se basa en el principio de la existencia de una concentración mínima requerida para alcanzar el máximo crecimiento del cultivo, la cual varía con la edad de la planta y su biomasa (Carciochi et al., 2019; Wang et al., 2018). La CDC es una herramienta útil para realizar un diagnóstico nutricional *in situ*, rápido y en diferentes etapas del cultivo, permitiendo hacer correcciones oportunas en la nutrición y alcanzar el máximo desarrollo (Giletto y Echeverría, 2015; Greenwood et al., 1990; Lemaire et al., 2019). El enfoque de CDC ha sido utilizado para el manejo de N en diversos cultivos, teniendo un alto avance en cereales (Chen et al., 2021; Lemaire et al., 2019). Asimismo, se ha construido la CDC de P, K y S en cultivos como maíz, canola y trigo (Carciochi et al., 2019; Lemaire et al., 2019). En papa, se ha establecido CDC para N (Giletto y Echeverría, 2015; Gómez et al., 2019b), P (Zamuner et al., 2016; Gómez et al., 2019b) y K (Cogo et al., 2006; Gómez et al., 2019b), sin embargo, no se encuentran reportes para Ca-Mg-S.

Con el fin de profundizar en el conocimiento de la nutrición del Ca-Mg-S en papa, también es de interés establecer qué tipo de relación existe entre los nutrientes mencionados al desarrollarse el

cultivo y conocer la dinámica de acumulación en los órganos de cosecha (Duarte et al., 2019; Naumann et al., 2020). El objetivo de la investigación fue desarrollar las curvas críticas de dilución e índices de cosecha de Ca, Mg y S en papa (*Solanum tuberosum* L. Grupo Andigenum) y analizar la relación entre estos nutrientes. Los resultados proveerán una nueva herramienta, útil a los productores de papa, para el diagnóstico nutricional y manejo de Ca-Mg-S durante el ciclo productivo de dos cultivares de importancia en Colombia.

## 1.2 Materiales y Métodos

### 1.2.1 Sitio de estudio

La investigación se realizó en dos localidades del altiplano Cundiboyacense (Colombia): Facatativá con suelos Andic Eutrudepts (saturados en bases, de alta fertilidad) y Chocontá con suelos Humic Distrudepts, (desaturados en bases, ácidos, de baja fertilidad) (Tabla 1). Las localidades fueron seleccionadas por ser representativas del sistema productivo de papa en Colombia, presentar alto potencial productivo ( $>50 \text{ t ha}^{-1}$ ) y tener condiciones edafoclimáticas contrastantes. Se evaluaron dos ciclos de producción en cada localidad (2013-2016), cada uno con una duración total de 150 días después de siembra (DDS). Los análisis de suelos se realizaron en cada ciclo-localidad para la capa arable (0-30 cm), previo al establecimiento del cultivo.

**Tabla 1.** Variables climáticas y características de suelos en las localidades del ensayo

Variables climáticas*	Localidad	Facatativá		Chocontá	
		Ciclo 1 (2013-I)	Ciclo 2 (2015-I)	Ciclo 1 (2013-II)	Ciclo 2 (2016-I)
Altitud (m.s.n.m)		2597	2597	2780	2710
Latitud		4°49' 26,9"	4°49' 39,9"	5°5' 30,37"	5°6' 23,94"
Longitud		74°22'29,7"	74°22' 49,3"	73°43' 2,04"	73°40' 48,53"
PPT anual (mm)		951	850	1295	1058
PPT/ciclo (mm)		397	415	712	803
ET por ciclo (mm)		454	382	640	603
Max temperatura aire (°C)		18.1	18.5	16.2	16.5
Min temperatura aire (°C)		7	7.2	4.4	10.1
Temperatura media (°C)		12.7	12.5	10.6	12.9
Propiedades del suelo**		Andic Eutrudepts		Humic Dystrudepts	

<b>Textura</b>	Franco	Franco	Franco arcilloso	Franco arcilloso
<b>Fertilidad del suelo</b>	Alto	Alto	Bajo	Bajo
<b>pH</b>	6.4	5.8	5.5	5.3
<b>Al (cmolc kg<sup>-1</sup>)</b>	0	<0.1	0.1	0.5
<b>Materia orgánica (g kg<sup>-1</sup>)</b>	166.7	127.1	67.7	85.9
<b>CEC (cmolc kg<sup>-1</sup>)</b>	31.95	19.14	9.52	7.90
<b>N (g kg<sup>-1</sup>)</b>	8.3	6.4	3.3	4.3
<b>P (mg kg<sup>-1</sup>)</b>	39.64	70.16	18.18	41.50
<b>K (cmolc kg<sup>-1</sup>)</b>	3.14	0.87	0.68	0.84
<b>Ca (cmolc kg<sup>-1</sup>)</b>	24.26	15.98	7.20	5.90
<b>Mg (cmolc kg<sup>-1</sup>)</b>	4.36	2.14	1.57	1.40
<b>S (cmolc kg<sup>-1</sup>)</b>	29.53	29.53	11.52	11.52

\* Los datos de variables climáticas fueron tomados del IDEAM. PPT: precipitación \*\* El análisis físico químico del suelo se realizó según IGAC (2006). Las metodologías utilizadas fueron: Al: método de Yuang; Mo: Walkley-Black; P: Bray II-colorimetría; K, Ca, Mg y Na: acetato de amonio-absorción atómica; S: fosfato monobásico-colorimetría. Clasificación de suelo según el sistema establecido por USDA (Soil Survey Staff, 2014).

## 1.2.2 Diseño experimental y manejo del cultivo

Para cada localidad y ciclo de producción, se estableció un experimento en parcelas divididas con cuatro repeticiones distribuidas en bloques completos al azar. La parcela principal correspondió al cultivar (Capiro y Suprema) y las subparcelas a los niveles de fertilización (0 y 100% de macro y micronutrientes esenciales). Cada unidad experimental presentó un tamaño de 5 m x 10 m, con una distancia entre hileras de 1 m y 0.37 m entre las plantas. Como material vegetal, se utilizaron tubérculos de 70 g en promedio, los cuales fueron sembrados manualmente. En total se sembraron 135 plantas por parcela con una densidad de 27 000 plantas ha<sup>-1</sup>. Las dosis de fertilización (nivel 100%), para cada localidad-ciclo se establecieron mediante el método de balance suelo-planta (Castro y Gómez, 2013) (Tabla 2). El nivel 0% correspondió a tratamiento sin fertilización y representó las condiciones de fertilidad natural del suelo. El fraccionamiento se realizó de acuerdo con el manejo histórico en los sitios de estudio (historial de rendimiento >50 t ha<sup>-1</sup>) de la siguiente forma: N 55% en siembra y el 45% a los 45 DDS; P 80% en siembra y el 20% a los 45 DDS; K 12% en siembra y el 88% a los 45 DDS; para Ca, Mg, S y menores se aplicó el 63% en la siembra y el 37% a los 45 DDS. El manejo fitosanitario del cultivo se realizó según las prácticas locales.

**Tabla 2.** Aportes nutricionales por localidad y ciclo para tratamiento fertilizado 100%

Localidad	Ciclo cultivo	Dosis fertilización total* (kg ha <sup>-1</sup> )	Dosis de nutrientes minerales (kg ha <sup>-1</sup> )										
			N	P	K	Ca	Mg	S	B	Zn	Mn	Fe	Cu
Facatativá	1	1582	171	113	149	23.2	70	74	3.4	5.6	7	2.8	0.56
	2	1900	164	126	195	34.1	80	150	2.3	4.6	5.6	2.2	0.45
Chocontá	1	2175	192	148	289	46.3	56	120	1.2	2.4	3	1.2	0.24
	2	2000	191	165	262	46.3	40	38	4.4	4.8	5.4	2.2	0.43

\*Las fuentes fertilizantes utilizadas fueron fosfato diamónico ((NH<sub>4</sub>)<sub>2</sub>HPO<sub>4</sub>), cloruro de potasio (KCl), sulfato de potasio (K<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>), nitrato de calcio (Ca (NO<sub>3</sub>)<sub>2</sub>), sulfato de magnesio monohidratado (MgSO<sub>4</sub>H<sub>2</sub>O) y Nutricomplet® (Ingeplant, Colombia. Fuente de B, Zn, Mn, Fe y Cu)

### 1. 2.3 Muestreo y mediciones

Se realizaron cinco muestreos destructivos en el tiempo asociados con cinco etapas fenológicas (Valbuena y Roveda, 2010): etapa I, 50 a 55 DDS (formación de tallos primarios); etapa II, 70 a 75 DDS (formación de tallos secundarios e inicio de la tuberización); etapa III, 90 a 100 DDS (floración, tuberización máxima, y comienzo del llenado de tubérculos); etapa IV, 120 a 125 DDS (final de la floración, llenado de tubérculos); etapa V, 150 a 160 DDS (senescencia de hojas, llenado máximo y maduración de tubérculos). En cada muestreo se cosecharon cuatro plantas por unidad experimental y se seccionaron en sus órganos (hojas, tallos (aéreos + subterráneos) y tubérculos). Para la cuantificación de los nutrientes minerales, se realizó el lavado del material vegetal con agua desionizada, después se mezclaron los mismos órganos de las cuatro plantas y se separó una submuestra de 200 g la cual se secó en horno a 70°C hasta peso constante para determinar el peso seco (Gómez et al., 2019a). La concentración de Ca, Mg y S por órgano fue determinado mediante análisis químicos según IGAC (2006). Los contenidos totales de Ca, Mg y S fueron estimados multiplicando las concentraciones de nutrientes en el órgano (g 100 g<sup>-1</sup> peso seco), por la cantidad de biomasa seca acumulada en cada etapa (Abdallah et al., 2016).

### 1.2.4 Análisis estadístico

#### 1.2.4.1 Curvas críticas de dilución

La curva crítica dilución a partir de la materia seca (DW) para Ca (Ca<sub>c</sub>), Mg (Mg<sub>c</sub>), y S (S<sub>c</sub>) se construyó según la ecuación (1) propuesta por Greenwood et al. (1990), donde  $Nut_c$  corresponde a la concentración crítica del nutriente en la biomasa (g 100 g<sup>-1</sup>),  $W$  es el peso seco total de la biomasa (t ha<sup>-1</sup>), el coeficiente  $a$  representa la concentración del nutriente cuando la biomasa es  $\leq 1$  t ha<sup>-1</sup> y



el coeficiente  $b$  (adimensional) es un coeficiente de dilución que describe la curvatura o la disminución del nutriente al aumentar la biomasa total (Giletto y Echeverría, 2015).

$$Nut_c = aW^{-b} \quad (1)$$

Para la calibración de las curvas críticas se realizó la identificación y selección de datos para los cuales la fertilización no limitara significativamente el crecimiento del cultivo (biomasa seca total). Se siguieron los siguientes pasos: i) se evaluaron los principios de normalidad y homocedasticidad; ii) se realizó el análisis de varianza (ANOVA) de la biomasa total bajo los diferentes niveles de fertilización para cada combinación de factores (ciclo x localidad x cultivar x etapa fenológica) iii) se hizo la comparación de medias mediante la prueba de mínima de diferencia significativa (LSD) ( $p < 0.05$ ); iv) se seleccionaron los datos del nivel de fertilización con mayor producción de biomasa. Cuando no se presentaron diferencias significativas, se escogió la menor dosis (Abdallah et al., 2016; Wang et al., 2017). A partir de los datos seleccionados, se construyó la curva de dilución para cada nutriente calculando los coeficientes  $a$  y  $b$ , sus errores estándar e intervalos de confianza al 95% usando el procedimiento PROC NLIN (SAS Institute, 2017).

#### ***1.2.4.2 Índices de cosecha***

Los índices de cosecha para Ca (CaIC), Mg (MgIC), y S (SIC) se calcularon a los 150 DDS al momento de la cosecha, dividiendo la cantidad de nutriente acumulado en el tubérculo ( $Nut_{tub}$ , kg  $ha^{-1}$ ) por la acumulación total (hojas, tallos aéreos, estolones, tubérculos) en la planta ( $Nut_{tot}$ , kg  $ha^{-1}$ ) (ecuación 2) (Giletto y Echeverría, 2015). En el análisis no se tomaron en cuenta las raíces. Para el análisis se utilizó el procedimiento PROC MIXED (SAS Institute, 2017), tomando las repeticiones como efecto aleatorio y el cultivar, localidad, ciclo y nivel de fertilización como efectos fijos. Para cada nivel de interacción entre factores, se calcularon las medias de mínimos cuadrados y con base en estas medias se realizaron las comparaciones con el estadístico ajustado de Tukey ( $p < 0.05$ ) para modelos mixtos.

$$NutIC: (Nut_{tub} / Nut_{tot}). \quad (2)$$

#### ***1.2.4.3 Correlación y regresión lineal***

Las correlaciones entre variables se calcularon a partir del coeficiente de correlación de Spearman utilizando el procedimiento PROC CORR (SAS Institute, 2017). Se utilizó un total de observaciones  $n=130$  para cada cultivar y se estableció la significancia con un límite de confianza de 95%. Se establecieron modelos lineales de la forma “ $y = bx+a$ ”, mediante regresión lineal, donde  $a$  es el intercepto en el eje  $y$  y  $b$  es la pendiente de la recta. Para cada modelo se calculó el coeficiente de determinación ( $R^2$ ). La proporción entre nutrientes en la planta se determinó a partir

de las ecuaciones establecidas para el modelo lineal entre los contenidos totales de los nutrientes, dividiendo 1 entre el coeficiente  $b$  (pendiente de la curva).

Para todas las variables se evaluaron los principios de normalidad y homocedasticidad utilizando PROC UNIVARIATE y se hizo un análisis de varianza (ANOVA) usando PROC GLM en el software SAS 9.4 (SAS Institute, 2017). Las gráficas se desarrollaron con ggplot2 (Wickham, 2016).

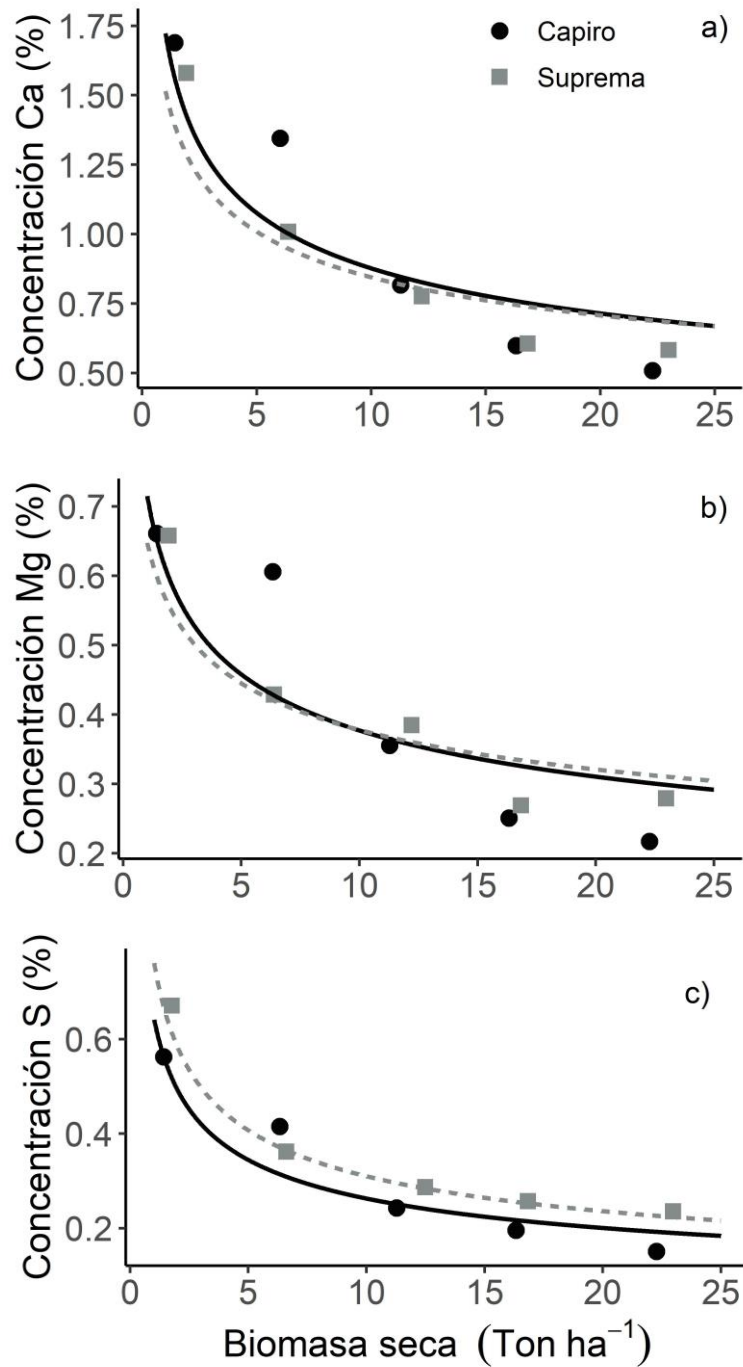
### **1.3 Consideraciones éticas**

Las actividades realizadas en laboratorio y el manejo de residuos químicos y biodegradables, se realizaron según el protocolo de la Universidad Nacional de Colombia B-FT-15-003.033 y la Guía técnica Colombiana 53-7 para el aprovechamiento de residuos sólidos orgánicos no peligrosos.

## **1.4 Resultados**

### **1.4.1 Curvas críticas de dilución**

Las curvas de dilución de  $Ca_c$ ,  $Mg_c$  y  $S_c$  siguieron un modelo negativo potencial en relación con el aumento de la biomasa seca total en los dos cultivares (Figura 1). La biomasa seca promedio durante el ciclo de evaluación estuvo en el rango de 1.7 a 22.6 t ha<sup>-1</sup>. Los coeficientes  $a$  y  $b$  de las curvas críticas de los tres nutrientes no presentaron diferencias significativas entre cultivares (Tabla 3), sin embargo, los dos modelos de  $S_c$  muestran un comportamiento diferencial teniendo Capiro en promedio 0.05% menor concentración respecto a Suprema durante todo el ciclo (Figura 1c). Para biomasa de 6 t ha<sup>-1</sup>, las concentraciones reales promedio de Ca, Mg y S en Capiro fueron 0.3, 0.2 y 0.1 % más altos de los establecidos por el modelo (Figura 1).



**Figura 1.** Curvas críticas de dilución de Ca (a), Mg (b) y S (c) para dos cv. de *Solanum tuberosum* L. grupo Andigenum (Diacol Capiro y Pastusa Suprema), bajo condiciones no limitantes de nutrición. Los puntos constituyen los datos a partir de los cuales se desarrollaron las curvas críticas. Cada punto representa el promedio de 13 valores tomados por cv. y etapa fenológica. Las líneas punteadas representan las CDC para biomasa mayor a 1 t ha<sup>-1</sup>.

**Tabla 3.** Coeficientes de curvas críticas de dilución de Ca, Mg y S desarrolladas para Diacol Capiro y Pastusa Suprema a partir de la biomasa seca total (W) en condiciones no limitantes de nutrición mineral.

Nutriente	Cultivar	CDC ( $N_c = aW^{-b}$ )	RMSE	InC (a)		InC (b)		SE a	SE b
				95%		95%			
Calcio	Capiro	$1.7326W^{-0.2956}$	0.2133	1.3862- 2.0790 ns		0.1797- 0.4115 ns		0.1733	0.058
	Suprema	$1.523W^{-0.2559}$	0.1622	1.2172- 1.8288 ns		0.1508- 0.3610 ns		0.153	0.0526
Magnesio	Capiro	$0.7191W^{-0.2803}$	0.5493	0.5812 - 0.8570 ns		0.1731- 0.3875 ns		0.069	0.0536
	Suprema	$0.6507W^{-0.236}$	0.4199	0.5341- 0.7673 ns		0.1440- 0.3280 ns		0.0584	0.0460
Azufre	Capiro	$0.6461W^{-0.3904}$	0.1480	0.5465- 0.7458 ns		0.2915- 0.4893 ns		0.0499	0.0495
	Suprema	$0.7669W^{-0.3932}$	0.2152	0.6090- 0.9249 ns		0.2660- 0.5204 ns		0.0791	0.0636

InC: intervalo de confianza. SE: error estándar. RMSE: raíz del error cuadrático medio. ns: sin diferencias significativas

La mayor “dilución” de los nutrientes minerales se observó cuando la biomasa seca total estuvo entre 1 y 6 t ha<sup>-1</sup> (Figura 1), en la etapa de inicio de tuberización (Tabla 4). La concentración promedio de Ca en las plantas disminuyó de un máximo de 1.6% (Capiro) y 1.3 % (Suprema) en etapa de crecimiento vegetativo, a un mínimo de 0.7% en la etapa maduración de tubérculos (Figura 1a, Tabla 4). Para Mg los valores fueron de 0.7 % (Capiro) y 0.6 % (Suprema), a 0.3% (Figura 1b, Tabla 4) y para S de 0.6 a 0.2% (Figura 1c, Tabla 4). Las curvas de Ca<sub>c</sub> y S<sub>c</sub> presentaron un mayor ajuste, teniendo valores de raíz del error cuadrado medio (RMSE) en el rango de 0.1 a 0.2, mientras Mg<sub>c</sub> tuvo un RMSE de 0.4 a 0.5 (Tabla 3). La concentración de Ca y Mg de Capiro en la etapa inicial (etapa I: formación tallos principales) fue 17% y 14% más alta frente a Suprema, mientras que de S fue 8% mayor en Suprema (Tabla 4).

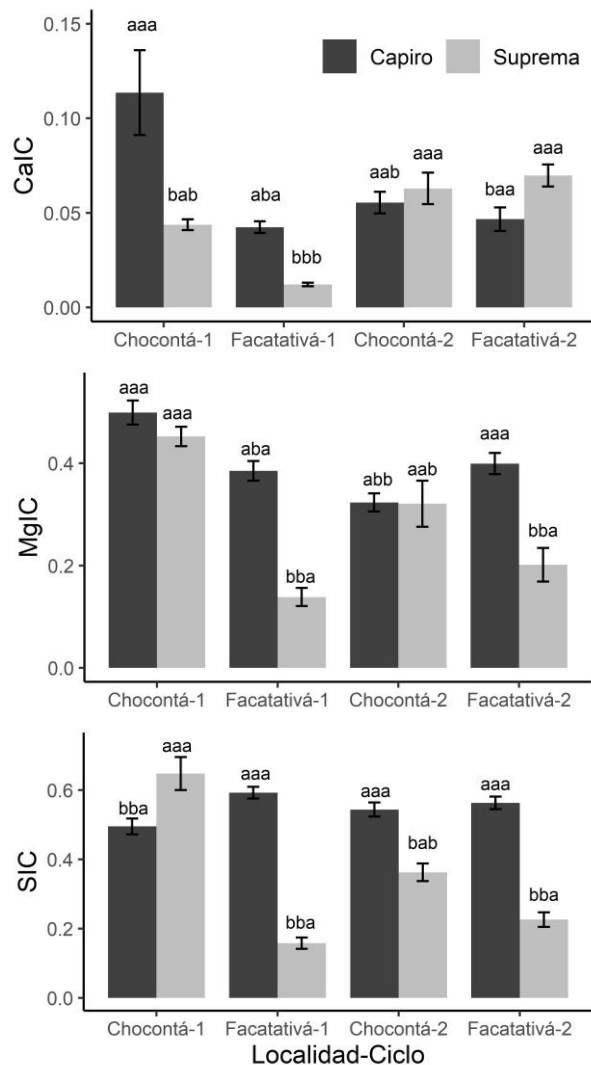
**Tabla 4.** Concentraciones críticas de Ca, Mg y S (%) por etapa fenológica en condiciones no limitantes de nutrición mineral para Diacol Capiro y Pastusa Suprema

Etapa fenológica	Capiro			Suprema		
	Ca <sub>c</sub>	Mg <sub>c</sub>	S <sub>c</sub>	Ca <sub>c</sub>	Mg <sub>c</sub>	S <sub>c</sub>
Formación de tallos principales	1.56	0.65	0.56	1.29	0.56	0.61
Inicio de la tuberización	1.02	0.43	0.31	0.95	0.42	0.36
Floración-Máxima tuberización	0.85	0.36	0.25	0.80	0.36	0.28
Final de floración- Llenado de tubérculos	0.76	0.33	0.22	0.74	0.33	0.25
Máximo llenado-Maduración de tubérculos	0.69	0.30	0.19	0.68	0.31	0.22

### 1.4.2 Índices de Cosecha

Los valores de CaIC estuvieron en el rango de 0.01 a 0.11 con un promedio de 0.06. MgIC y SIC estuvieron en el rango de 0.13-0.50 y 0.16-0.65 con promedios de 0.34 y 0.45 respectivamente (Figura 2). Los índices de cosecha presentaron diferencias entre localidades, ciclos y cultivares

( $p < 0.001$ ). Capiro presentó en promedio, valores de CaIC, MgIC y SIC más altos en 37, 44 y 57% (respectivamente) frente a Suprema. Los índices de Mg y S de Suprema presentaron alta variación entre localidades con una desviación estándar (DE) de 0.14 y 0.20. Los valores más altos se observaron en Chocontá (CaIC:0.05, MgIC:0.39 y SIC:0.50). Capiro presentó valores de MgIC y SIC similares en ambas localidades, con una DE de 0.08 y 0.06 respectivamente. Capiro presentó el máximo valor de CaIC en Chocontá-1 y Suprema presento el menor valor en Facatativá-1.

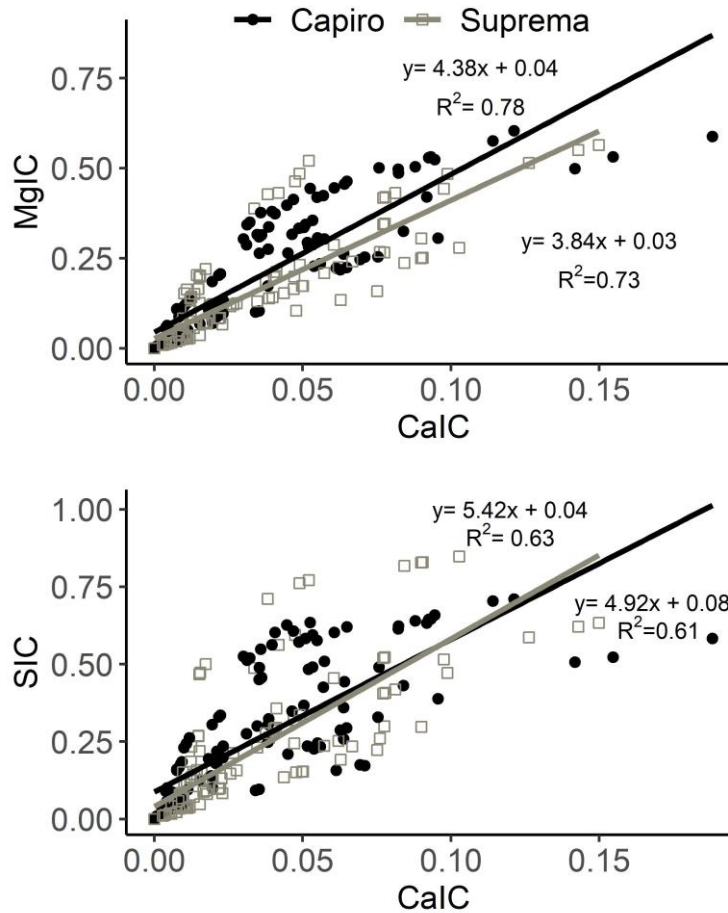


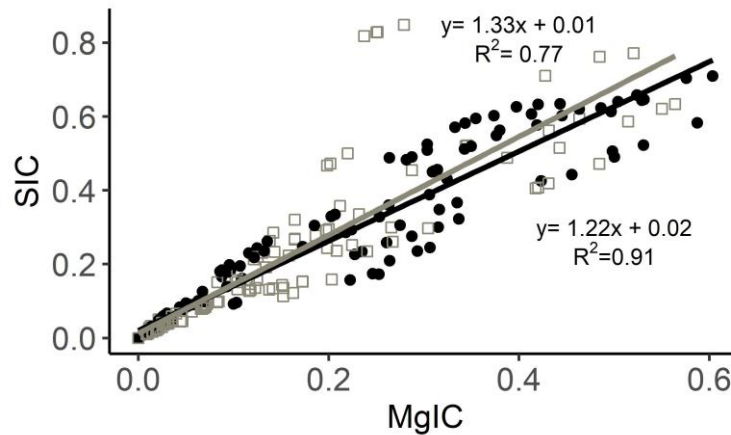
**Figura 2.** Índices de cosecha (IC) para Ca, Mg y S para Diacol Capiro y Pastusa Suprema en suelos de baja (Humic Dystrudepts, Chocontá) y alta (Andic Eutrudepts, Facatativá) fertilidad, en dos ciclos productivos (2013-2016). La primera letra indica diferencias significativas entre cultivares dentro del mismo ciclo y localidad; la segunda letra, diferencia entre localidades dentro del mismo cultivar y ciclo; la tercera letra, diferencia entre ciclos dentro del mismo cultivar y localidad. Diferencias significativas según test de Tukey ( $p < 0,05$ ). Las barras de error indican el error estándar.



### 1.4.3 Relación entre nutrientes Ca-Mg-S

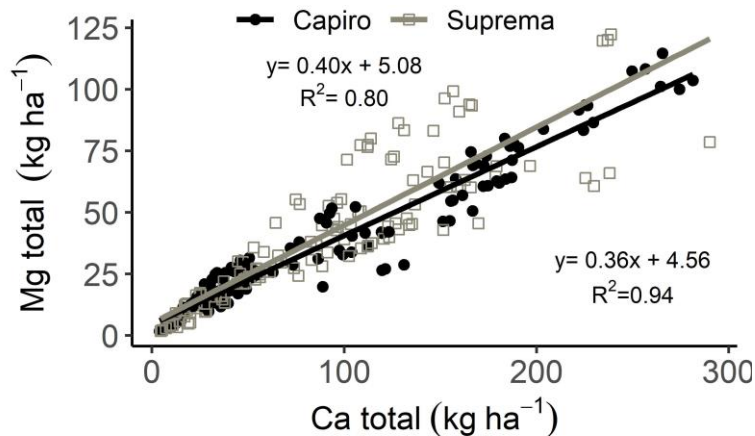
La relación de MgIC-SIC presentó la mayor correlación ( $r=0.97$ ) seguido de CaIC-MgIC ( $r=0.94$ ) y CaIC-SIC ( $r=0.91$ ). A partir de los modelos, se establece que MgIC y SIC aumentan en 4.38 y 4.92 unidades por cada unidad de CaIC en Capiro y en 3.84 y 5.42 en Suprema. Por cada unidad de MgIC el SIC aumenta en 1.33 y 1.22 unidades en Capiro y Suprema respectivamente. Los coeficientes de determinación ( $R^2$ ) fueron mayores a 0.7 excepto para la relación CaIC-SIC. Los valores obtenidos para Capiro presentaron menor dispersión y mayor ajuste al modelo lineal respecto a Suprema. Entre índices de cosecha presentaron un comportamiento lineal positivo (Figura 3, tabla 6).



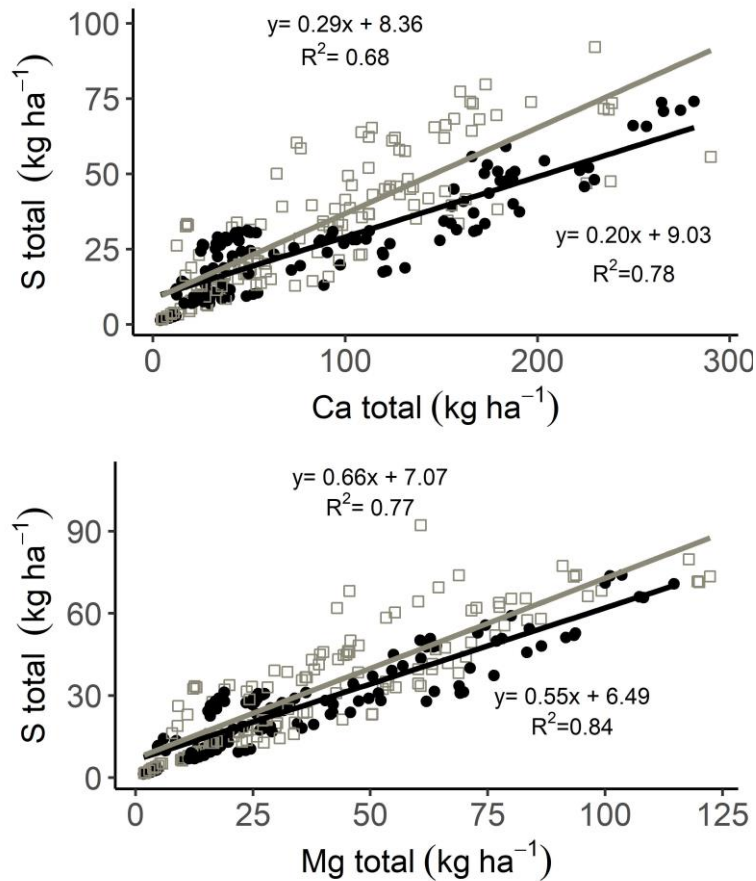


**Figura 3.** Relación entre los índices de cosecha de calcio (CaIC), magnesio (MgIC) y azufre (SIC) para Diacol Capiro y Pastusa Suprema (n=130 para cada cv). Las líneas representan el modelo ajustado de cada cv.  $R^2$ : coeficiente de determinación.

La correlación entre el contenido de nutrientes en la parte aérea de la planta y el tubérculo fue de 0.46, 0.41 y 0.29 para Ca-Mg-S respectivamente. Entre los contenidos totales de nutrientes, la mayor correlación se presentó entre Ca-Mg ( $r= 0.95$ ), seguido de Mg-S ( $r= 0.88$ ) y Ca-S ( $r= 0.85$ ). Los modelos siguieron un comportamiento lineal positivo (tabla 6), presentando nivel de ajuste mayor a 0.7 ( $R^2$ ) (Figura 4). Se presentaron diferencias significativas entre cultivares para la relación Ca-S total y Mg-S total. Se estableció que por cada unidad de Mg se presenta un aumento de 0.55 y 0.66 unidades de S en Capiro y Suprema respectivamente. Por otra parte, cada unidad de Ca, aumenta 0.40 y 0.36 unidades de Mg y de S 0.29 y 0.20 para Capiro y Suprema respectivamente.





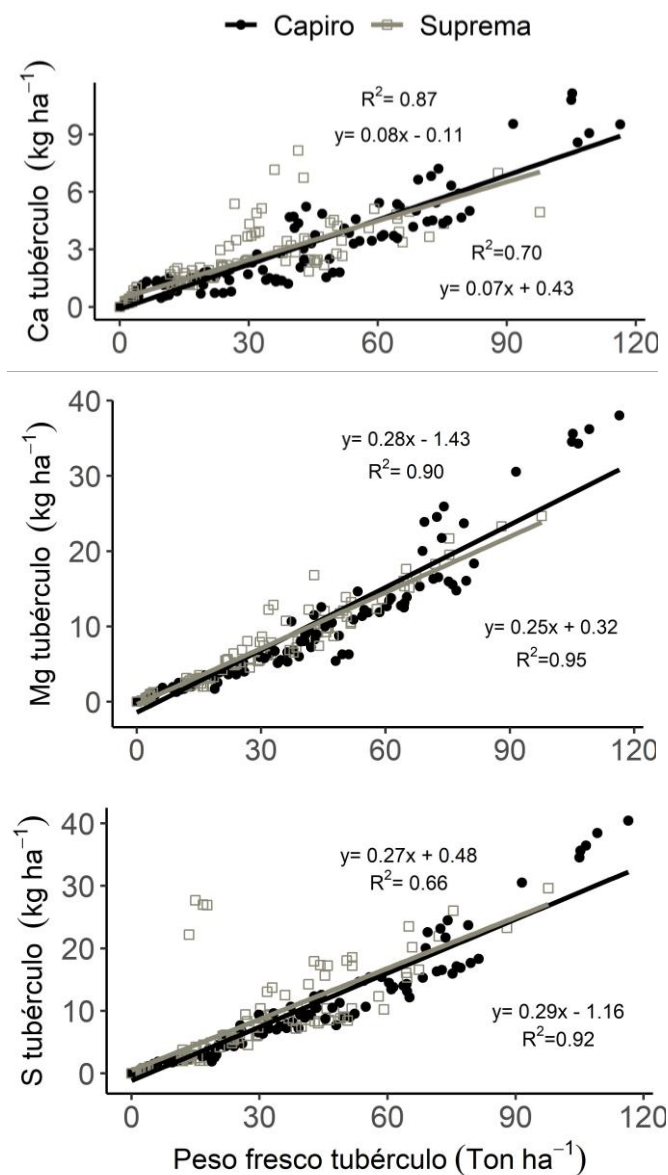


**Figura 4.** Relación entre el contenido total de calcio (Ca), magnesio (Mg) y azufre (S) para Diacol Capiro y Pastusa Suprema (n=130 para cada cv). Las líneas representan el modelo ajustado de cada cv.  $R^2$ : coeficiente de determinación.

La proporción Ca:S fue la más alta, seguida de Ca: Mg y S: Mg (Tabla 5), teniendo Capiro mayores valores respecto a Suprema (Tabla 5). La correlación ( $r$ ) entre el rendimiento (peso fresco del tubérculo) y el contenido de Ca, Mg y S en el tubérculo fue de 0.94, 0.99 y 0.95 respectivamente. Los modelos presentaron un comportamiento lineal positivo y tuvieron un  $R^2$  mayor a 0.6. Todos los modelos presentaron diferencias significativas entre cultivares. Por cada  $t\ ha^{-1}$  de aumento en el rendimiento, se estableció un aumento de 0.08, 0.28 y 0.27  $kg\ ha^{-1}$  de Ca-Mg-S acumulado en los tubérculos para Capiro y de 0.07, 0.25 y 0.29  $kg\ ha^{-1}$  para Suprema (Figura 5, tabla 6).

**Tabla 5.** Proporción entre los contenidos totales de Ca-Mg-S en papa cv. Diacol Capiro y Pastusa Suprema

Relación	Capiro	Suprema
Ca: Mg	2.8:1	2.5:1
Ca:S	5.0:1	3.4:1
Mg:S	1.8:1	1.5:1

**Figura 5.** Relación entre el contenido de calcio (Ca) (a), magnesio (Mg) (b) y azufre (c) en el tubérculo, con el peso fresco del tubérculo (rendimiento) para Diacol Capiro y Pastusa Suprema (n=130 para cada cv.). Las líneas representan el modelo ajustado de cada cv. R<sup>2</sup>: coeficiente de determinación.

**Tabla 6.** Intervalos de confianza para los modelos lineales de relación entre nutrientes Ca-Mg-S en los cultivares Diacol Capiro y Pastusa Suprema

<b>Correlación</b>	<b>Cultivar</b>	<b>InC (m) 95%</b>	<b>InC (b) 95%</b>
<b>CaIC-MgIC</b>	Capiro	3.98 - 4.78 ns	0.02 - 0.06 ns
	Suprema	3.43 - 4.25 ns	0.01 - 0.04 ns
<b>CaIC-SIC</b>	Capiro	4.22 - 5.61 ns	0.05 - 0.12 *
	Suprema	4.70 - 6.14 ns	0.01 - 0.07 *
<b>MgIC-SIC</b>	Capiro	1.15 - 1.28 ns	0.003 - 0.04 ns
	Suprema	1.21 - 1.46 ns	(-0.01) - 0.04 ns
<b>Ca total-Mg total</b>	Capiro	0.34 - 0.38 ns	2.68 - 6.44 ns
	Suprema	0.36 - 0.44 ns	0.81 - 9.35 ns
<b>Ca total- S total</b>	Capiro	0.18 - 0.22 **	6.90 - 11.16 ns
	Suprema	0.25 - 0.32 **	4.66 - 12.07 ns
<b>Mg total-S total</b>	Capiro	0.51 - 0.60 *	4.52 - 8.46 ns
	Suprema	0.59 - 0.72 *	3.87 - 10.28 ns
<b>FTubW-Catub</b>	Capiro	0.07-0.08 ns	(-0.34) - 0,12 **
	Suprema	0.06 - 0.08 ns	0.18 - 0.68 **
<b>FTubW-Mgtub</b>	Capiro	0.26 - 0.29 **	(-2.12) - (-0.73) **
	Suprema	0.24 - 0.26 **	(-0.66) - 0.001 **
<b>FTubW-Stub</b>	Capiro	0.27 - 0.30 ns	(-1.79) - (-0.53) *
	Suprema	0.24 - 0.31 ns	(-0.62) - 1.58 *

*InC: intervalo de confianza; CaIC: índice de cosecha de calcio; MgIC: índice de cosecha de magnesio; SIC: índice de cosecha de azufre; FTubW: peso fresco de tubérculo; Catub: contenido de calcio en el tubérculo; Mgtub: contenido de magnesio en el tubérculo; Stub: contenido de azufre en el tubérculo. ns: no significativo. \*: significancia  $p < 0,05$ . \*\*: significancia  $p < 0,01$*

## 1.5 Discusión

El efecto de “dilución” de Ca observado en papa, concuerda con Addiscott, (1974) quien reportó un posible efecto de dilución de una cantidad fija de Ca en papa y contrastan con Walworth y Muniz, (1993) quienes plantean que la concentración de Ca tiende a aumentar con la edad en toda la planta y a disminuir en el tubérculo. La concentración de Ca requerida en el citoplasma es menor a  $1 \mu M$  y el Ca que no es utilizado y está en exceso es almacenado en las vacuolas para permitir una correcta actividad celular (Koch et al., 2020). En este caso, el Ca almacenado en la vacuola no tendría un efecto significativo en el cambio de su concentración en la planta al considerar un escenario estable en la disponibilidad del nutriente. Aunque se podría esperar que la concentración

de Ca aumente a medida que crece la planta debido a su función estructural, una mayor y más rápida acumulación de otros nutrientes, proteínas, carbohidratos y otras moléculas explican porque si se evidencia un efecto de dilución (Koch et al., 2020).

La concentración de Ca en maduración de tubérculos (0.68%) fue menor respecto a lo reportado por Jahanzad et al., (2017) para tubérculos de *S. tuberosum* “Dark Red Norland” (0,8%) y “Superior” (1,4%) al momento de cosecha. Los valores de Mg<sub>c</sub> durante el ciclo productivo (0.30-0.65%) son superiores a lo reportado por Hauer-Jákli y Tränkner, (2019) en hojas (0.14%) y por Walworth y Muniz, (1993) en tubérculos (0.25%). Lo anterior se debe a que la mayoría de los estudios no establecen la concentración en toda la planta y además no tienen en cuenta que la concentración crítica varía durante el desarrollo del cultivo, planteando un único valor crítico. Así mismo, se debe considerar la variación natural en consumo de nutrientes entre cultivares. Debe mencionarse que el concepto de concentración crítica de Mg en plantas ha sido poco estudiado, por lo que los valores aquí establecidos por etapa fenológica son una propuesta nueva que complementa lo publicado con anterioridad por autores como Walworth y Muniz, (1993).

El valor de S<sub>c</sub> para la etapa de floración y máximo llenado (0.25% y 0.28%), concuerda con lo reportado por Walworth y Muniz, (1993) en papa. La curva de S<sub>c</sub> tuvo un coeficiente de dilución ( $b=0.39$ ) alto, mayor al establecido para otros cultivos C3 como trigo ( $b= 0.17$ ; Reussi et al., 2012), colza ( $b=0.18$ ; Ferreira y Ernst, 2014) y soya ( $b= 0.11$ ; Divito et al., 2016). El alto coeficiente  $a$  en papa (0.6-0.7) podría indicar que el cultivo tiene un alto requerimiento de S en etapas iniciales de desarrollo ( $< 1 \text{ t ha}^{-1}$ ) lo cual se explica por la rápida y alta generación de follaje donde el S se necesita para síntesis de proteínas y sulfolípidos.

La rápida disminución en la concentración de los nutrientes minerales observada para biomasa de  $1-6 \text{ t ha}^{-1}$ , es causada por el inicio de la tuberización y llenado de tubérculos donde la biomasa total en papa aumenta significativamente, se presenta alta demanda de fotoasimilados y acumulación de almidón en los órganos cosechables (Gómez et al., 2019b), diluyendo la concentración de los nutrientes minerales. El nutriente con mayor dilución fue S, esto podría deberse a que los requerimientos de Ca y Mg se mantienen más altos durante el crecimiento y desarrollo, por sus funciones estructurales en paredes celulares, clorofilas y en el metabolismo energético (Maathuis, 2009) y al final del ciclo por su papel estructural y en el llenado de tubérculos. Por otra parte, el S se encuentra principalmente en aminoácidos, proteínas y como parte del glutatión, cuya necesidad

y tasa de síntesis puede ser menor que la tasa de crecimiento (Sameh A.M. Moussa, 2019). La mayor pendiente de  $S_c$  para Capiro puede indicar que esta variedad es más eficiente en el uso de S que Suprema (Santana et al., 2020). La dilución en la curva de  $S_c$  fue similar a la establecida previamente para N (Gómez et al., 2019b), corroborando la interacción entre la asimilación de S y N en relación a su función en la formación de proteínas (Kopriva y Rennenberg, 2004).

La mayor concentración de Ca y Mg de Capiro durante todo el ciclo concuerdan con su mayor calidad para procesamiento industrial. La mayor proporción y concentración de S en suprema está relacionado a su hábito de crecimiento indeterminado que demanda una mayor síntesis de proteínas. Debe considerarse también las diferencias nutricionales en la semilla entre variedades, lo cual afectaría directamente la concentración de nutrientes en las primeras etapas. Para futuras investigaciones es de interés establecer los contenidos de nutrientes de la semilla de papa.

Las curvas de dilución de  $Ca_c$ ,  $Mg_c$  y  $S_c$ , constituyen una herramienta útil para realizar el diagnóstico nutricional de estos nutrientes en etapas críticas del cultivo de papa a partir de una muestra de tejido vegetal. Si el muestreo de plantas arroja valores de concentración por encima o por debajo de la curva de dilución (en la etapa fenológica que corresponda), indicará que las plantas están creciendo con exceso o déficit del nutriente, respectivamente. Valores cercanos o sobre la curva indican suficiencia (Carciochi et al., 2019; Marouani et al., 2014).

Los bajos índices de cosecha de Ca-Mg-S exponen que su movilidad al tubérculo es baja y es menor respecto a lo previamente reportado para los nutrientes N-P-K (IC superior al 0,6) (Gómez et al., 2019a). Los mayores índices para Capiro y su homogeneidad entre localidades, indican que este cultivar presenta una mejor capacidad de acumulación y plasticidad fenotípica en diferentes ambientes, favoreciendo su potencial productivo, lo cual concuerda con los resultados en rendimiento previamente publicados por Gómez et al., (2019a). El mayor valor de CaIC de Capiro en el primero ciclo de Chocontá se puede relacionar a la mayor evapotranspiración registrada, lo cual favorece el movimiento de Ca. Por otra parte, Suprema mostró mejor adaptación a las condiciones de Chocontá (suelos ácidos y de baja fertilidad), posiblemente debido a que las condiciones ambientales de mayor precipitación y menor temperatura favorecieron la solubilidad de nutrientes en el suelo y disminuyó la tasa de respiración de las plantas. Por el contrario, en condiciones de Facatativá con suelos de alta fertilidad y mayores temperaturas, Suprema presentó

consumo de lujo de N (Gómez et al., 2019a) lo cual afectó la tuberización, la traslocación y acumulación de Ca-Mg-S.

La mayor traslocación de Mg y S de Capiro en Facatativá pudo tener un efecto indirecto sobre su cantidad acumulada en el tubérculo al haber favorecido un mayor desarrollo de raíces en los tubérculos y estolones las cuales participan en la toma de nutrientes directamente del suelo para su posterior acumulación en éstos órganos (Kratzke y Palta, 1985; Palta, 1996), afectando positivamente los índices de cosecha en el cultivar. Estos resultados están en relación al mayor rendimiento de éste cultivar y a su calidad para usos industriales (Gómez et al., 2018), lo cual se debe a que estos nutrientes participan en la traslocación de fotoasimilados y síntesis de proteínas. Adicionalmente debe considerarse el efecto positivo del porte de la planta de Capiro, dado que sus hojas tienen folíolos más grandes y se disponen de forma paralela al suelo en comparación a Suprema que tiene disposición más perpendicular. Esta característica favorece la incidencia de radiación y por tanto la tasa fotosintética, rendimiento y traslocación de nutrientes en Capiro.

Para los nutrientes evaluados, la acumulación en el tubérculo siguió el orden de  $Ca < Mg < S$ , resultado que es acorde con su movilidad en el floema en papa (Subramanian et al., 2011). La movilidad de Ca por corriente de transpiración, afectó su translocación a órganos con baja transpiración como los tubérculos (Schabow y Palta, 2019). En comparación a otros cultivos, el CaIC en papa (0.05), fue menor al reportado para trigo (0.09) (Shen et al., 2019) y similar para maíz (0.05) (Szczeplaniak, 2016). Los altos índices de cosecha de Mg y S (mayor al 0.5 para S y 0.3-0.4 para Mg), ratifican la alta movilidad y acumulación en el tubérculo planteado por Silva et al., (2020) y Subramanian et al., (2011). La alta acumulación de S en el tubérculo se explica por su rol en la partición de fotoasimilados hacia los tubérculos y al ser un elemento estructural en aminoácidos (metionina y cisteína) y proteínas (Dhakad et al., 2019). Por otra parte, el MgIC de papa fue menor en comparación con cultivos cereales como arroz (0.52)(Sánchez et al., 2019) o trigo (0.46)(Shen et al., 2019).

A partir de los modelos desarrollados se establece que el valor de SIC puede ser estimado con un buen nivel de confiabilidad a partir del MgIC, teniendo mayor confianza de predicción respecto a la estimación a partir CaIC. Así mismo, el contenido de S en toda la planta se puede establecer a partir del contenido de Ca o Mg total. La mayor proporción entre nutrientes (contenidos totales) en Capiro puede estar relacionado a que su crecimiento es determinado respecto a Suprema que es

indeterminado, teniendo Capiro una más rápida tuberización y acumulación de reservas. Así mismo, la menor proporción Ca:S en Suprema puede estar relacionado a un mayor requerimiento de S por su hábito de crecimiento indeterminado. Es de interés en futuras investigaciones establecer la relación entre estos resultados y la calidad en términos de resistencia mecánica, incidencia de enfermedades y ocurrencia de fisiopatías en ambos cultivares. Las diferencias entre cultivares pueden indicar variación en los procesos de acumulación o utilización, ratificando que Capiro y Suprema presentan requerimientos diferentes de Ca, Mg y S. Los modelos establecidos para la interacción entre nutrientes son válidos para las condiciones experimentales evaluadas para los cultivares Diacol Capiro y Pastusa Suprema del grupo Andigenum.

La interacción entre Ca, Mg y S en su contenido total y de Ca-Mg en el tubérculo se explica debido a que estos nutrientes participan en procesos ligados durante el crecimiento del cultivo: el Mg participa en la fotosíntesis, en el metabolismo energético, síntesis de proteínas, actividad enzimática y transporte de fotoasimilados, el Ca participa en procesos de señalización y es estructural en membranas y paredes celulares y el S hace parte de sulfolípidos, proteínas y participa en procesos de oxido-reducción (Koch et al., 2020). Los resultados en la interacción Mg-S concuerdan y los de Ca-S y Ca-Mg contrastan con lo reportado por Subramanian et al., (2011). Los resultados de ésta investigación no deben confundirse a lo reportado a nivel de suelo y entrada a la planta donde se puede presentar antagonismo entre Ca-Mg, sinergismo entre S-Mg y ninguna correlación entre S-Ca (Barczak y Nowak, 2015; Klikocka y Głowacka, 2013; Rhodes et al., 2018; Rietra et al., 2017).

La baja correlación entre el contenido de los nutrientes en la parte aérea y en el tubérculo, podría indicar una baja dependencia en la acumulación de nutrientes en la parte aérea respecto al crecimiento de los tubérculos, lo cual concuerda con lo planteado por Gómez et al. (2019a). Por otra parte, la correlación entre peso fresco del tubérculo y el contenido de Ca-Mg-S, corrobora la importancia de estos nutrientes en el rendimiento del cultivo como ha sido anteriormente reportado (Hamdi et al., 2015; Helal y AbdElhady, 2015; Muthanna et al., 2017; Seifu y Deneke, 2017; Wang et al., 2020). Los modelos planteados para esta relación son un primer acercamiento para estimar el contenido de Ca-Mg-S en el tubérculo, según su crecimiento.

## 1.6 Conclusiones

Las curvas de Ca<sub>c</sub>, Mg<sub>c</sub>, S<sub>c</sub> que se establecieron, son las primeras reportadas para dos cultivares de papa del Grupo Andigenum. Éstas proporcionan una guía para mejorar el diagnóstico nutricional y realizar ajustes según el crecimiento y desarrollo del cultivo. La herramienta desarrollada es válida para los genotipos evaluados. Los resultados en índices de cosecha amplían la información sobre la dinámica de acumulación de Ca-Mg-S en el tubérculo y se establece que Capiro presenta mayor plasticidad en condiciones edafoclimáticas contrastantes, mientras Suprema muestra mayor adaptación a suelos de baja fertilidad. Los nutrientes Ca-Mg-S presentan una alta correlación en la planta siendo posible estimar el contenido total o en el tubérculo en función de los otros. Los modelos lineales planteados son una primera aproximación para poder realizar estimaciones cuyo estudio debe ser ampliado en próximas investigaciones. Adicionalmente en un futuro es de interés evaluar un rango de dosis de fertilización que abarque desde moderada deficiencia, hasta exceso de Ca-Mg-S.

## 1.7 Agradecimientos

Los autores expresan su agradecimiento a INGEPLANT SAS, y la Universidad Nacional de Colombia – Bogotá por la financiación, soporte logístico y apoyo en la ejecución de actividades de la presente investigación.

## 1.8 Bibliografía

- Abdallah, F. Ben, Olivier, M., Goffart, J.P., Minet, O., 2016. Establishing the Nitrogen Dilution Curve for Potato Cultivar Bintje in Belgium. *Potato Res.* 59, 241–258. <https://doi.org/10.1007/s11540-016-9331-y>
- Addiscott, T.M., 1974. Potassium and the distribution of calcium and magnesium in potato plants. *J. Sci. Food Agric.* 25, 1173–1183. <https://doi.org/10.1002/jsfa.2740250915>
- Assunção, N.S., Ribeiro, N.P., da Silva, R.M., Soratto, R.P., Fernandes, A.M., 2020. Tuber yield and allocation of nutrients and carbohydrates in potato plants as affected by limestone type and magnesium supply. *J. Plant Nutr.* 43, 51–63. <https://doi.org/10.1080/01904167.2019.1659345>
- Aula, L., Dhillon, J.S., Omara, P., Wehmeyer, G.B., Freeman, K.W., Raun, W.R., 2019. World sulfur use efficiency for cereal crops. *Agron. J.* 111, 2485–2492. <https://doi.org/10.2134/agronj2019.02.0095>
- Barczak, B., Nowak, K., 2015. Effect of sulphur fertilisation on the content of macroelements and their ionic ratios in potato tubers. *J. Elem.* 20, 37–47.



- <https://doi.org/10.5601/jelem.2014.19.1.471>
- Barrientos, J.C., Núñez, C.E., 2014. Difusión de seis nuevas variedades de papa en Boyacá y Cundinamarca (Colombia) entre 2003 y 2010. *Rev. Colomb. Ciencias Hortícolas* 8, 126–141. <https://doi.org/10.17584/rcch.2014v8i1.2806>
- Barroso, F. de L., Milagres, C. do C., Fontes, P.C.R., Cecon, P.R., 2021. Magnesium-influenced seed potato development and yield. *J. Plant Nutr.* 44, 296–308. <https://doi.org/10.1080/01904167.2020.1822404>
- Campos, H., Ortiz, O., 2020. *The Potato Crop*, The Potato Crop. Springer International Publishing, Cham. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-28683-5>
- Carciochi, W.D., Wyngaard, N., Reussi Calvo, N.I., Pagani, A., Divito, G.A., Echeverría, H.E., Ciampitti, I.A., 2019. Critical sulfur dilution curve and sulfur nutrition index in maize. *Agron. J.* 111, 448–456. <https://doi.org/10.2134/agronj2018.07.0467>
- Castro, H., Gómez, M., 2013. Fertilidad y fertilizantes, in: Burbano, H., Silva, F. (Eds.), *Ciencia Del Suelo - Principios Básicos*. 2a Ed. Sociedad Colombiana de La Ciencia Del Suelo. pp. 231–304.
- Chen, R., Zhu, Y., Cao, W., Tang, L., 2021. A bibliometric analysis of research on plant critical dilution curve conducted between 1985 and 2019. *Eur. J. Agron.* 123, 126199. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2020.126199>
- Cogo, C.M., Andriolo, J.L., Bisognin, D.A., Godoi, R.D.S., Bortolotto, O.C., Da Luz, G.L., 2006. Relação potássio-nitrogênio para o diagnóstico e manejo nutricional da cultura da batata. *Pesqui. Agropecu. Bras.* 41, 1781–1786. <https://doi.org/10.1590/S0100-204X2006001200013>
- Dhakad, H., Verma, S.K., Singh, S.P., Gaur, D., Arya, V., 2019. Effect of sulphur levels in combination of organic and inorganic sources of nutrient on plant growth and yield of potato (*Solanum tuberosum* L.) 8, 1855–1861.
- Divito, G.A., Echeverría, H.E., Andrade, F.H., Sadras, V.O., 2016. N and S concentration and stoichiometry in soybean during vegetative growth: Dynamics of indices for diagnosing the S status. *F. Crop. Res.* 198, 140–147. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2016.08.018>
- Duarte, L.O., Clemente, J.M., Caixeta, I.A.B., Senoski, M.D.P., Aquino, L.A. De, 2019. Dry matter and nutrient accumulation curve in cabbage crop. *Rev. Caatinga* 32, 679–689. <https://doi.org/10.1590/1983-21252019v32n312rc>
- Fedepapa, 2018. Boletín mensual regional No 2. Fedepapa 2, 1–2.
- Ferreira, G., Ernst, O., 2014. Diagnóstico del estado nutricional del cultivo de colza (*Brassica napus*) en base a curvas de dilución de nitrógeno y azufre. *Agrociencia Uruguay* 18, 65–74. <https://doi.org/10.2477/vol18iss1pp75-85>

- Gaj, R., Chudzińska, E., Borowski-Beszta, J., Spychalski, W., 2020. Effect of potassium and micronutrient foliar fertilisation on the content and accumulation of macrolelements, yield and quality parameters of potato tubers. *J. Elem.* 25, 1213–1231. <https://doi.org/10.5601/jelem.2020.25.1.1990>
- Giletto, C.M., Echeverría, H.E., 2015. Critical Nitrogen Dilution Curve in Processing Potato Cultivars. *Am. J. Plant Sci.* 6, 3144–3156. <https://doi.org/10.1007/s12230-011-9226-z>
- Gómez, M.I., Magnitskiy, S., Rodríguez, L.E., 2019a. Nitrogen, phosphorus and potassium accumulation and partitioning by the potato group Andigenum in Colombia. *Nutr. Cycl. Agroecosystems* 113, 349–363. <https://doi.org/10.1007/s10705-019-09986-z>
- Gómez, M.I., Magnitskiy, S., Rodríguez, L.E., 2019b. Critical dilution curves for nitrogen, phosphorus, and potassium in potato group andigenum. *Agron. J.* 111, 419–427. <https://doi.org/10.2134/agronj2018.05.0357>
- Gómez, M.I., Magnitskiy, S., Rodríguez, L.E., 2018. Potential yield and efficiency of N and K uptake in tubers of cvs. Capiro and Suprema (*Solanum tuberosum* Group Andigenum). *Agron. Colomb.* 36, 126–134. <https://doi.org/10.15446/agron.colomb.v36n2.72766>
- Greenwood, D.J., Lemaire, G., Gosse, G., Cruz, P., Draycott, A., Neeteson, J.J., 1990. Decline in percentage N of C3 and C4 crops with increasing plant mass. *Ann. Bot.* 66, 425–436. <https://doi.org/10.1093/oxfordjournals.aob.a088044>
- Guerrero-Guio, J.C., Cabezas Gutiérrez, M., Galvis Quintero, J.H., 2019. Efecto de dos sistemas de riego sobre la producción y uso eficiente del agua en el cultivo de papa variedad diacol capiro. *Rev. Investig. Agrar. y Ambient.* 11, 41–52. <https://doi.org/10.22490/21456453.3080>
- Hamdi, W., Helali, L., Beji, R., Zhani, K., Ouertatani, S., Gharbi, A., 2015. Effect of levels calcium nitrate addition on potatoes fertilizer. *Int. Res. J. Eng. Technol.* 2, 2006–2013.
- Handayani, T., Gilani, S.A., Watanabe, K.N., 2019. Climatic changes and potatoes: How can we cope with the abiotic stresses? *Breed. Sci.* 69, 545–563. <https://doi.org/10.1270/jsbbs.19070>
- Hauer-Jákli, M., Tränkner, M., 2019. Critical leaf magnesium thresholds and the impact of magnesium on plant growth and photo-oxidative defense: A systematic review and meta-analysis from 70 years of research. *Front. Plant Sci.* 10, 1–15. <https://doi.org/10.3389/fpls.2019.00766>
- Helal, N., Abdelhady, S., 2015. Calcium and Potassium Fertilization May Enhance Potato Tuber Yield and Quality. *Middle East J* 4, 991–998.
- IGAC, 2006. Métodos analíticos del Laboratorio de Suelos. Instituto Geográfico Agustín Codazzi, 6th ed. Bogotá.
- Jahanzad, E., Barker, A. V., Hashemi, M., Sadeghpour, A., Eaton, T., Park, Y., 2017. Improving yield and mineral nutrient concentration of potato tubers through cover cropping. *F. Crop.*

- Res. 212, 45–51. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2017.06.023>
- Klikocka, H., Głowacka, A., 2013. Does the sulphur fertilization modify magnesium and calcium content in potato tubers (*Solanum tuberosum* L.)? *Acta Sci. Pol. Hortorum Cultus* 12, 41–53.
- Koch, M., Busse, M., Naumann, M., Jákli, B., Smit, I., Cakmak, I., Hermans, C., Pawelzik, E., 2019a. Differential effects of varied potassium and magnesium nutrition on production and partitioning of photoassimilates in potato plants. *Physiol. Plant.* 166, 921–935. <https://doi.org/10.1111/ppl.12846>
- Koch, M., Naumann, M., Pawelzik, E., 2019b. Cracking and fracture properties of potato (*Solanum tuberosum* L.) tubers and their relation to dry matter, starch, and mineral distribution. *J. Sci. Food Agric.* 99, 3149–3156. <https://doi.org/10.1002/jsfa.9530>
- Koch, M., Naumann, M., Pawelzik, E., Gransee, A., Hiel, H., 2020. The Importance of Nutrient Management for Potato Production Part I: Plant Nutrition and Yield. *Potato Res.* 63, 97–119. <https://doi.org/10.1007/s11540-019-09430-3>
- Kopriva, S., Rennenberg, H., 2004. Control of sulphate assimilation and glutathione synthesis: Interaction with N and C metabolism. *J. Exp. Bot.* 55, 1831–1842. <https://doi.org/10.1093/jxb/erh203>
- Kratzke, M., Palta, J., 1985. Evidence for the existence of functional roots on potato tubers and stolons: significance in water transport to the tuber. *Biol. Conserv.* 62, 227–236. [https://doi.org/10.1016/0006-3207\(72\)90131-0](https://doi.org/10.1016/0006-3207(72)90131-0)
- Lemaire, G., Sinclair, T., Sadras, V., Bélanger, G., 2019. Allometric approach to crop nutrition and implications for crop diagnosis and phenotyping. A review. *Agron. Sustain. Dev.* 39, 1–17. <https://doi.org/10.1007/s13593-019-0570-6>
- Maathuis, F.J., 2009. Physiological functions of mineral macronutrients. *Curr. Opin. Plant Biol.* 12, 250–258. <https://doi.org/10.1016/j.pbi.2009.04.003>
- Marouani, A., Behi, O., Sahli, A., Ben Jeddi, F., 2014. CRITICAL NITROGEN CURVE FOR TWO POTATO CULTIVARS UNDER SEMI- ARID CONDITIONS, in: Fifth International Scientific Agricultural Symposium „Agrosym 2014“. pp. 23–26.
- Minagricultura, 2019. Estrategia de ordenamiento de la producción cadena productiva de la papa y su industria. Minist. Agric. y Desarro. Rural. <https://doi.org/10.22201/fq.18708404e.2004.3.66178>
- Muthanna, M.A., K. Singh, A., Tiwari, A., Jain, V.K., Padhi, M., 2017. Effect of Boron and Sulphur Application on Plant Growth and Yield Attributes of Potato (*Solanum tuberosum* L.). *Int. J. Curr. Microbiol. Appl. Sci.* 6, 399–404. <https://doi.org/10.20546/ijcmas.2017.610.049>
- Naumann, M., Koch, M., Thiel, H., Gransee, A., Pawelzik, E., 2020. The Importance of Nutrient Management for Potato Production Part II: Plant Nutrition and Tuber Quality. *Potato Res.* 63,

121–137. <https://doi.org/10.1007/s11540-019-09430-3>

Palta, J., 1996. Role of Calcium in Plant Responses to Stresses: Linking Basic Research to the Solution of Practical Problems. *HortScience* 31, 51–57. <https://doi.org/10.21273/hortsci.31.1.31>

Raymundo, R., Asseng, S., Robertson, R., Petsakos, A., Hoogenboom, G., Quiroz, R., Hareau, G., Wolf, J., 2018. Climate change impact on global potato production. *Eur. J. Agron.* 100, 87–98. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2017.11.008>

Reussi, N., Echeverría, H.E., RozasHerná, H.S., 2012. Stability of foliar nitrogen: Sulfur ratio in spring red wheat and sulfur dilution curve. *J. Plant Nutr.* 35, 990–1003. <https://doi.org/10.1080/01904167.2012.671403>

Rhodes, R., Miles, N., Hughes, J.C., 2018. Interactions between potassium, calcium and magnesium in sugarcane grown on two contrasting soils in South Africa. *F. Crop. Res.* 223, 1–11. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2018.01.001>

Rietra, R.P.J.J., Heinen, M., Dimkpa, C.O., Bindraban, P.S., 2017. Effects of Nutrient Antagonism and Synergism on Yield and Fertilizer Use Efficiency. *Commun. Soil Sci. Plant Anal.* 48, 1895–1920. <https://doi.org/10.1080/00103624.2017.1407429>

Sameh A.M. Moussa, L.M.H. and N.I.A.E.-F., 2019. Effect of different levels of sulphur and nitrogen fertilizers on potato productivity , acrylamide formation and amino acids content in processed potatoes. *Middle East J. Agric. Res.* 07, 1626–1646.

Sánchez, A.D., Nieto, M.F., Dossmann, J., Camacho-Tamayo, J.H., Restrepo-Díaz, H., 2019. Nutrient uptake, partitioning, and removal in two modern high-yielding Colombian rice genotypes. *J. Plant Nutr.* 42, 2373–2387. <https://doi.org/10.1080/01904167.2019.1659334>

Santana, A.C.D.A., Oliveira, E.C.A. De, Silva, V.S.G., Santos, R.L., Silva, M.A., Freire, F.J., 2020. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental Critical nitrogen dilution curves and productivity assessments for plant cane Curvas de diluição do nitrogênio crítico e produtividade da cana planta 244–251.

SAS Institute, 2017. Base SAS 9.4 procedures guide : statistical procedures., 5th ed. SAS institute, Cary.

Schabow, J.E., Palta, J.P., 2019. Intumescence Injury in the Leaves of Russet Burbank Potato Plants is Mitigated by Calcium Nutrition. *Am. J. Potato Res.* 96, 6–12. <https://doi.org/10.1007/s12230-018-9682-9>

Seifu, Y.W., Deneke, S., 2017. Effect of Calcium Chloride and Calcium Nitrate on Potato (*Solanum tuberosum* L.) Growth and Yield. *J. Hortic.* 04. <https://doi.org/10.4172/2376-0354.1000207>

Shen, X., Yuan, Y., Zhang, H., Guo, Y., Zhao, Y., Li, S., Kong, F., 2019. The hot QTL locations

- for potassium, calcium, and magnesium nutrition and agronomic traits at seedling and maturity stages of wheat under different potassium treatments. *Genes* (Basel). 10. <https://doi.org/10.3390/genes10080607>
- Silva, C.D., Soares, M.E.P., Ferreira, M.H., Cavalcante, A.C.P., Andrade, G.A.V. De, Aquino, L.A. De, 2020. Dry matter and macronutrient extraction curves of potato varieties in the Alto Paranaíba region, Brazil. *Rev. Bras. Eng. Agrícola e Ambient.* 24, 176–186.
- Singh, S., Sharma, M., Reddy, K., Venkatesh, T., 2018. Integrated application of boron and sulphur to improve quality and economic yield in potato 39, 228–236.
- Soil Survey Staff, 2014. Keys to soil taxonomy. 12th ed. USDA-Natural Resources Conservation Service, Washington, DC.
- Subramanian, N.K., White, P.J., Broadley, M.R., Ramsay, G., 2011. The three-dimensional distribution of minerals in potato tubers. *Ann. Bot.* 107, 681–691. <https://doi.org/10.1093/aob/mcr009>
- Szczepaniak, W., 2016. Evaluating nitrogen use efficiency (NUE) indices on the background of mineral status of the seed crop at maturity: A case study of maize. *Polish J. Environ. Stud.* 25, 2129–2138. <https://doi.org/10.15244/pjoes/61817>
- Valbuena, R.I., Roveda, G., 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. *Produmedios*.
- Walworth, J.L., Muniz, J.E., 1993. A compendium of tissue nutrient concentrations for field-grown potatoes. *Am. Potato J.* 70, 579–597. <https://doi.org/10.1007/BF02850848>
- Wang, M., Wang, H., Hou, L., Zhu, Y., Zhang, Q., Chen, L., Mao, P., 2018. Development of a critical nitrogen dilution curve of Siberian wildrye for seed production. *F. Crop. Res.* 219, 250–255. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2018.01.030>
- Wang, X., Ye, T., Ata-Ul-Karim, S.T., Zhu, Y., Liu, L., Cao, W., Tang, L., 2017. Development of a critical nitrogen dilution curve based on leaf area duration in wheat. *Front. Plant Sci.* 8. <https://doi.org/10.3389/fpls.2017.01517>
- Wang, Z., Hassan, M.U., Nadeem, F., Wu, L., Zhang, F., Li, X., 2020. Magnesium Fertilization Improves Crop Yield in Most Production Systems: A Meta-Analysis. *Front. Plant Sci.* 10, 1–10. <https://doi.org/10.3389/fpls.2019.01727>
- Wickham, H., 2016. *ggplot2: Elegant Graphics for Data Analysis*. New York.
- Zamuner, E.C., Lloveras, J., Echeverría, H.E., 2016. Use of a Critical Phosphorus Dilution Curve to Improve Potato Crop Nutritional Management. *Am. J. Potato Res.* 93, 392–403. <https://doi.org/10.1007/s12230-016-9514-8>



## Capítulo 2. Acumulación y distribución de calcio, magnesio y azufre en papa (*Solanum tuberosum* Grupo Andigenum)

Kristal Castellanos Ruiz\* , Manuel Iván Gómez Sánchez , Luis Ernesto Rodríguez Molano 

Facultad de Ciencias Agrarias. Universidad Nacional de Colombia. Sede Bogotá

\*Autor para correspondencia: Kristal Castellanos Ruiz. Dirección postal: 111221, Bogotá, Colombia. Email: [kcastellanosr@unal.edu.co](mailto:kcastellanosr@unal.edu.co).

### Resumen

El cultivo de papa presenta una alta respuesta al manejo de la nutrición, sin embargo, el conocimiento sobre la fisiología de la nutrición de los elementos calcio (Ca), magnesio (Mg) y azufre (S) es escaso. Es necesario profundizar en los procesos de acumulación, traslocación y uso eficiente de estos nutrientes teniendo en cuenta la influencia del genotipo y el ambiente. El objetivo de la presente investigación fue establecer los requerimientos nutricionales, eficiencias de traslocación, uso y recuperación de Ca, Mg y S de dos cultivares de papa del grupo Andigenum en dos localidades, Chocontá y Facatativá con suelos de baja y alta fertilidad respectivamente. Se evaluaron los cultivares Diacol Capiro y Pastusa Suprema bajo dos regímenes de fertilización (0 y 100% de la recomendación para todos los nutrientes esenciales). Se registró información de peso fresco, seco y contenido de Ca, Mg y S desde la formación de tallos hasta la maduración de los tubérculos en cinco puntos de muestreo. La mayor acumulación de Ca-Mg-S se dió en Facatativá, sin embargo, la mayor eficiencia de traslocación, uso eficiente y recuperación de nutrientes se obtuvo en Chocontá. Capiro mostro una mayor fuerza vertedero al presentar una mejor eficiencia de traslocación respecto a suprema. La acumulación de nutrientes en kg ha<sup>-1</sup> siguió el orden de Ca (147) > Mg (66) > S (52), mientras la eficiencia de traslocación en cosecha fue del orden S (44%)> Mg (32%)>Ca (6%). Los cultivares evaluados presentan procesos diferentes de acumulación,

translocación y uso eficiente de Ca-Mg-S los cuales también varían con localidad. Capiro tiene mejor adaptación a las condiciones de suelo de alta fertilidad, mientras Suprema mostró mejor desempeño en condiciones de baja fertilidad.

**Palabras clave:** Curvas de absorción, eficiencia de traslocación, uso eficiente, eficiencia de recuperación

## Abstract

Potato crop has a high response to nutrition management, however, knowledge about nutrient physiology of calcium (Ca), magnesium (Mg) and sulfur (S) is scarce. It is important to research into the accumulation, translocation and efficiency use processes of these nutrients, considering the influence of the genotype and environment. The objective of this research was to establish the nutrient uptake, translocation, use and recovery efficiencies of Ca, Mg and S of two potato cultivars of the Andigenum group in two localities, Chocontá and Facatativá with low and high fertility soils respectively. Diacol Capiro and Pastusa Suprema cultivars were evaluated under two fertilization regimes (0 and 100% of the nutrient recommendation for all essential nutrients). Data of fresh and dry weight and Ca, Mg and S content was recorded from the formation of stems to the maturation of tubers at five sampling points. The highest accumulation of Ca-Mg-S was obtained in Facatativá, however the highest efficiency of translocation, use and recovery of nutrients was obtained in Chocontá. Capiro showed greater sink strength with a higher translocation efficiency compared to Suprema. Nutrient accumulation in tubers ( $\text{kg ha}^{-1}$ ) followed the order of Ca (147) > Mg (66) > S (52), while translocation efficiency in harvest had the order S (44%) > Mg (32%) > Ca (6%). The evaluated cultivars present different processes of accumulation, translocation and use of Ca-Mg-S which also vary with locality. Capiro has better adaptation to high fertility soil conditions and Suprema had better performance in low fertility.

**Keywords:** Absorption curves, translocation efficiency, efficient use, recovery efficiency

## 2.1 Introducción

Para el año 2050 se estima un aumento del 30% en la población mundial, generando la necesidad y el reto de aumentar la producción de alimentos para satisfacer sus necesidades nutricionales (Dahal et al., 2019). Lo anterior, cobra mayor importancia en el contexto del cambio climático en que se



prevé un impacto negativo en los rendimientos de los cultivos a causa de alteraciones en los patrones de temperatura y precipitación (Hameed et al., 2018; Handayani et al., 2019). En papa se estima que para el año 2040-2069 el rendimiento podría disminuir en un 18-32% por factores asociados al cambio climático (Dahal et al., 2019). Lo anterior es de importancia dado que por sus cualidades nutricionales y productivas, la papa es considerada base de la seguridad alimentaria de la humanidad (Gaj et al., 2020; Handayani et al., 2019).

El rendimiento potencial del cultivo de papa es alto (>40 ton/ha), sin embargo su expresión depende de diversos factores, entre los que se resalta la adecuada nutrición de las plantas (Campos y Ortiz, 2020). La disponibilidad de nutrientes en el suelo ha disminuido en diversas zonas productoras de papa debido a factores como bajos contenidos de materia orgánica, erosión, lavado, salinidad, desbalance de nutrientes, entre otros (Gaj et al., 2020). Este contexto junto con la alta respuesta de la papa a la nutrición, expone la necesidad de suplir los requerimientos nutricionales manteniendo un balance que potencie su crecimiento y desarrollo (Almeida et al., 2018).

La variación en las condiciones edafoclimáticas entre localidades, la adaptación diferencial de los cultivares a éstas y sus requerimientos nutricionales específicos, son causas de heterogeneidad en el rendimiento y la calidad de los tubérculos (Gaj et al., 2020; Villamil et al., 2005). Definir los requerimientos específicos de un cultivar en una localidad es deseable pues permite mejorar la productividad del cultivo, realizar un manejo más eficiente de las fuentes fertilizantes y disminuir el impacto ambiental de ésta práctica (Dahal et al., 2019).

Existen diferentes enfoques para determinar las necesidades nutricionales de los cultivos. Con frecuencia, los productores de papa utilizan dosis generales utilizadas tradicionalmente o reportados en la literatura. Sin embargo, esta información no toma en cuenta la variación de la necesidad de nutrientes entre localidades, cultivares o durante el ciclo de desarrollo de las plantas (Silva et al., 2020). Las curvas de acumulación y traslocación de nutrientes, se han desarrollado como una herramienta que permite aumentar la eficiencia de la fertilización al realizar aportes nutricionales específicos según cultivar, localidad y etapas críticas de absorción de nutrientes (Duarte et al., 2019; Silva et al., 2020). Adicionalmente, la comprensión de la fisiología de la nutrición del cultivo debe considerar el análisis de la eficiencia en la absorción, uso y distribución de los nutrientes (Lemaire et al., 2019).

Una adecuada fertilización de calcio (Ca), magnesio (Mg) y azufre (S) puede aumentar la producción de los cultivos, mejorar su calidad y disminuir la incidencia de problemas fitosanitarios y fisiopatías como el corazón hueco o rajado del tubérculo (Wendimu Seifu y Deneke, 2017). En la planta, la acumulación de Ca-Mg-S en los diferentes órganos se ve influenciada por su movilidad en el floema. Debido a su baja movilidad, los síntomas de deficiencias nutricionales de Ca y S se expresan en las hojas más jóvenes (Hamdi et al., 2015), mientras la de Mg se expresa en las hojas maduras de la planta por su alta movilidad (Senbayram et al., 2015). La mayor parte de Ca que toma la planta es acumulado en la parte aérea de la planta durante todo el ciclo, es decir que a diferencia del Mg y S, su traslocación al tubérculo es muy baja (Seling et al., 2000; Silva et al., 2020). Debe tenerse en cuenta también, que la relación fuente-vertedero en un cultivar determina la acumulación de materia seca y así mismo de nutrientes en los tubérculos (Bender et al., 2015).

Son escasos los estudios enfocados en el análisis del consumo, partición y uso de los elementos Ca, Mg y S en papa. Pereira et al., (2020) establecieron que la acumulación de Ca y S en parte aérea presenta un máximo hacia los 50 días después de siembra y luego disminuye coincidiendo con el llenado de los tubérculos y una acumulación creciente en estos. Así mismo, plantean que la acumulación de Mg es similar a la de S. El desarrollo de herramientas que permitan realizar un manejo nutricional eficiente y eficaz en el cultivo de papa es de gran interés para aumentar la productividad y calidad de los tubérculos. El objetivo de la presente investigación fue establecer las curvas de acumulación, eficiencias de traslocación, uso y recuperación de Ca, Mg y S en dos cultivares de papa *S. tuberosum* grupo Andigenum en dos zonas productoras del altiplano Cundiboyacense.

## 2.2 Materiales y Métodos

### 2.2.1 Sitio de estudio

La investigación se realizó en dos localidades con historial productivo alto ( $>50$  t ha<sup>-1</sup>) y representativas en la producción de papa en Colombia: Facatativá con suelos saturados en bases, de alta fertilidad (Andic Eutrudepts) y Chocontá con suelos desaturados en bases, ácidos, de baja fertilidad (Humic Distrudepts) (Tabla 1). Se hizo un seguimiento y registro de las variables climáticas y las características de los suelos para la capa arable (0-30 cm) en cada localidad y ciclo, previo al establecimiento del ensayo. En cada localidad se evaluaron dos ciclos de producción entre los años 2013-2016, cada uno con una duración total de 150 días después de siembra (DDS).

**Tabla 1.** Variables climáticas y características de suelos en las localidades de evaluación

Localidad	Año-Semestre	Altitud (m.s.n.m)	Latitud	Longitud	PPT	PPT/ciclo (mm)	ET/ciclo (mm)	Tmax (°C)	Tmin (°C)	Tmedia (°C)
Facatativá	(2013-I)	2597	4°49' 26,9"	74°22'29,7"	951	397	454	18.1	7	12.7
	(2015-I)	2597	4°49' 39,9"	74°22'49,3"	850	415	382	18.5	7.2	12.5
Chocontá	(2013-II)	2780	5°5' 30,37"	73°43'2,04"	1295	712	640	16.2	4.4	10.6
	(2016-I)	2710	5°6' 23,94"	73°40'48,5"	1058	803	603	16.5	10.1	12.9
Suelos	pH	Al (cmolc kg <sup>-1</sup> )	MO (g kg <sup>-1</sup> )	CEC (cmolc kg <sup>-1</sup> )	N (g kg <sup>-1</sup> )	P (mg kg <sup>-1</sup> )	K (cmolc kg <sup>-1</sup> )	Ca (cmolc kg <sup>-1</sup> )	Mg (cmolc kg <sup>-1</sup> )	S (cmolc kg <sup>-1</sup> )
Andic	6.4	0	166.7	31.95	8.3	39.64	3.14	24.26	4.36	29.53
Eutrudepts	5.8	<0.1	127.1	19.14	6.4	70.16	0.87	15.98	2.14	29.53
Humic	5.5	0.1	67.7	9.52	3.3	18.18	0.68	7.20	1.57	11.52
Dystrudepts	5.3	0.5	85.9	7.90	4.3	41.50	0.84	5.90	1.40	11.52

Los datos de variables climáticas fueron tomados del IDEAM. El análisis físico químico del suelo se realizó según IGAC (2006). Las metodologías utilizadas fueron: Al: método de Yuang; Mo: Walkley-Black; P: Bray II-colorimetría; K, Ca, Mg y Na: acetato de amonio-absorción atómica; S: fosfato monobásico-colorimetría. Clasificación de suelo según el sistema establecido por USDA (Soil Survey Staff, 2014).

## 2.2.2 Diseño experimental y manejo del cultivo

Se establecieron cuatro experimentos en un diseño en parcelas divididas con cuatro repeticiones distribuidas en bloques completos al azar. La parcela principal correspondió al cultivar (Diacol Capiro y Pastusa Suprema) y la subparcela al nivel de fertilización (0 y 100% de la recomendación de aporte de macro y micronutrientes). El tratamiento de fertilización 100% correspondió a la recomendación completa para cada localidad-ciclo la cual se estableció mediante el método de balance suelo-planta (Castro y Gómez, 2013) (Tabla 2), mientras que el tratamiento 0% no se fertilizó. El fraccionamiento se realizó de acuerdo con el manejo histórico en los sitios de estudio cuando se tuvo rendimientos  $>50 \text{ t ha}^{-1}$  de la siguiente forma: N 55% en siembra y el 45% a los 45 DDS; P 80% en siembra y el 20% a los 45 DDS; K 12% en siembra y el 88% a los 45 DDS; para Ca, Mg, S y menores se aplicó el 63% en la siembra y el 37% a los 45 DDS. Se establecieron unidades experimentales de 5 m x 10 m, con una distancia entre hileras de 1 m y 0.37 m entre las plantas para una densidad de 27 000 plantas  $\text{ha}^{-1}$ . Se utilizaron tubérculos de 70 g en promedio como semilla, los cuales fueron sembrados manualmente. Cada parcela tuvo un total de 135 plantas. El manejo fitosanitario del cultivo se realizó según las prácticas locales.

**Tabla 2.** Aportes nutricionales (kg ha<sup>1</sup>) por localidad y ciclo para los tratamientos fertilizados (100%)

Nutriente	Facatativá		Chocontá	
	Ciclo 1	Ciclo 2	Ciclo 1	Ciclo 2
N	171	164	192	191
P	113	126	148	165
K	149	195	289	262
Ca	23.2	34.1	46.3	46.3
Mg	70	80	56	40
S	74	150	120	38
B	3.4	2.3	1.2	4.4
Zn	5.6	4.6	2.4	4.8
Mn	7	5.6	3	5.4
Fe	2.8	2.2	1.2	2.2
Cu	0.56	0.45	0.24	0.43
Fertilización total	1582	1900	2175	2000

\*Las fuentes fertilizantes utilizadas fueron fosfato diamónico ((NH<sub>4</sub>)<sub>2</sub>HPO<sub>4</sub>), cloruro de potasio (KCl), sulfato de potasio (K<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>), nitrato de calcio (Ca (NO<sub>3</sub>)<sub>2</sub>), sulfato de magnesio monohidratado (MgSO<sub>4</sub>H<sub>2</sub>O) y Nutricomplet® (Ingeplant, Colombia. Fuente de B, Zn, Mn, Fe y Cu)

### 2.2.3 Muestreo y mediciones

Se realizaron cinco muestreos destructivos en el tiempo en relación a cinco etapas fenológicas (Valbuena y Roveda, 2010) (Tabla 3). Se cosecharon cuatro plantas por unidad experimental en cada muestreo, se seccionaron hojas, tallos y tubérculos y se tomó el peso fresco por separado. Para la cuantificación de los nutrientes minerales en cada órgano, se realizó el lavado del material vegetal con agua desionizada, después se mezclaron los mismos órganos de las cuatro plantas y se separó una submuestra de 200 g la cual se secó en horno a 70°C hasta peso constante para determinar el peso seco (Gómez et al., 2019a). A partir de análisis químicos según IGAC (2006) se determinó la concentración de Ca, Mg y S por órgano. Los contenidos totales de Ca, Mg y S se estimaron multiplicando las concentraciones de nutrientes en los órganos (g 100 g<sup>-1</sup> peso seco), por la cantidad de biomasa seca acumulada por órgano en cada etapa fenológica (Abdallah et al., 2016).

**Tabla 3.** Puntos de muestreo en relación con los días después de siembra (DDS) y etapa fenológica

Etapa	DDS	Etapa fenológica
I	50-55	Formación de tallos primarios
II	70-75	Formación de tallos secundarios e inicio de la tuberización
III	90-100	Floración, tuberización máxima, y comienzo del llenado de tubérculos
IV	120-125	Final de la floración, llenado de tubérculos
V	150-160	Senescencia de hojas, llenado máximo y maduración de tubérculos

## 2.2.4 Análisis estadístico

Para cada variable se realizó el análisis de varianza (ANOVA) mediante la función PROC GLM (SAS Institute, 2017), cuando se identificaron diferencias significativas se realizó una prueba de comparación de medias entre tratamientos utilizando el test de Tukey-Kramer ( $p < 0.05$ ). Todos los análisis estadísticos se realizaron en el software SAS 9.4 (SAS Institute, 2017) y las gráficas se construyeron con ggplot2 (Wickham, 2016).

### 2.2.4.1 Curvas de consumo

Las curvas de acumulación de nutrientes en el tubérculo (AC<sub>tub</sub>) y total (AC<sub>tot</sub>) se realizaron a partir de los valores de concentración de los nutrientes por unidad de peso seco en cada punto de muestreo. El modelo de AC<sub>tot</sub> y AC<sub>tub</sub> se desarrolló mediante el procedimiento NLIN en SAS (SAS Institute, 2017). Para AC<sub>tub</sub> se ajustó el modelo propuesto por Yin et al., (2003) (ecuación 1), donde  $C_{tub}$  representa la concentración del nutriente en el tubérculo,  $C_{max}$  es la máxima concentración del nutriente que se obtiene en el tiempo  $t_e$  (final de periodo de crecimiento),  $t_b$  es el tiempo de inicio del periodo de crecimiento y  $t_m$  es el tiempo donde se tiene la mayor tasa de acumulación del nutriente. Dado que para los datos de AC<sub>tot</sub> en la planta el anterior modelo tuvo un bajo nivel de ajuste y baja convergencia, para esta variable se ajustó el modelo propuesto por Belanger et al., (2001) (ecuación 2) donde  $C$  representa la acumulación total del nutriente,  $W$  es la biomasa seca total y  $a$  y  $b$  son coeficientes de ajuste. De acuerdo con la diferencia de modelos, la variable independiente del modelo de AC<sub>tub</sub>, fueron los días después de siembra y del modelo de

ACtot, la biomasa seca total. Se establecieron los intervalos de confianza al 95% y el error estándar de los coeficientes para evaluar la acumulación de nutrientes entre cultivares y localidades.

$$C_{tub} = C_{max} \left( 1 + \frac{te-t}{te-tm} \right) \left( \frac{t}{te} \right)^{\frac{te}{te-tm}} \text{ con } 0 < tm < te \quad (1)$$

$$C = aW^b \quad (2)$$

#### 2.2.4.2 Acumulación de nutrientes por etapa fenológica

A partir de los modelos de acumulación de nutrientes se estableció la acumulación de nutrientes total y en el tubérculo por etapa fenológica. Dado que el modelo de acumulación total utilizado se encuentra en función de la biomasa, se desarrolló un modelo de crecimiento logístico de tres parámetros (Ritz et al., 2015) en función de los días después de siembra (ecuación 3). A partir de este modelo se calculó la biomasa por día y posteriormente la acumulación total de cada nutriente por etapa fenológica.

$$W = 0 + \frac{d-0}{1+\exp(b(\log(x)-\log(e)))} \quad (3)$$

#### 1.2.4.3 Eficiencia de traslocación

La eficiencia de traslocación (CaET, MgET, SET) se calculó dividiendo la acumulación de nutrientes en los tubérculos (Ntub) (kg ha<sup>-1</sup>) entre la acumulación total de nutrientes en la planta (Nupt) (kg ha<sup>-1</sup>) en cada etapa fenológica muestreada (ecuación 4). El modelo de eficiencia de traslocación se realizó mediante el procedimiento NLIN en SAS (SAS Institute, 2017) ajustándolo a un modelo logarítmico según lo propuesto por Gómez et al., (2019).

$$\text{Nutrient ET} = (N_{tub} / N_{upt}) \times 100\% \quad (4)$$

#### 1.2.4.4 Eficiencia de adquisición o recuperación

La eficiencia de recuperación del nutriente del fertilizante o eficiencia de adquisición para Ca (RFCa), Mg (RFMg), y S (RFS) se calculó a partir de la ecuación 5 utilizada por Gómez et al., (2018), donde *Et1* es la extracción de nutrientes por tubérculos en suelos fertilizados (kg ha<sup>-1</sup>) y *Et0* es la extracción de nutrientes por tubérculos en suelos no fertilizados (kg ha<sup>-1</sup>).

$$RF = (Et1 - Et0 / \text{cantidad de nutrientes suministrados en el fertilizante}) * 100 \quad (5)$$

### 2.2.4.5 Uso eficiente de los nutrientes

El uso eficiente (UE) de los nutrientes Ca (CaUE), Mg (MgUE) y S (SUE) en el tubérculo se calculó como la materia seca acumulada en el tubérculo / kg total del nutriente extraído, según lo propuesto por (Poljak et al., 2011).

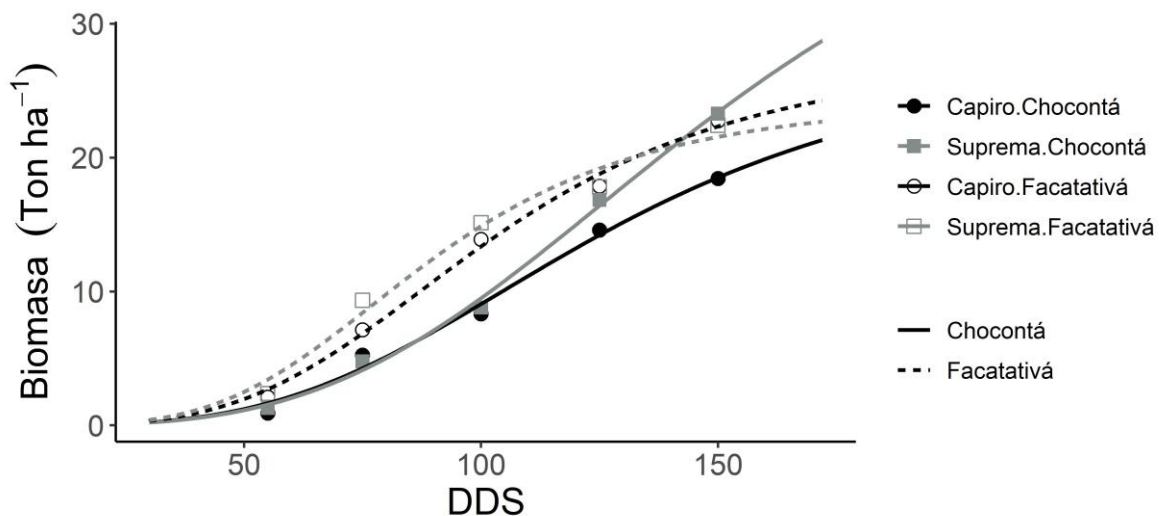
## 2.3 Consideraciones éticas

Las actividades realizadas en laboratorio y el manejo de residuos químicos y biodegradables, se realizaron según el protocolo de la Universidad Nacional de Colombia B-FT-15-003.033 y la Guía técnica Colombiana 53-7 para el aprovechamiento de residuos sólidos orgánicos no peligrosos.

## 2.4 Resultados

### 2.4.1 Curvas de crecimiento

Se establecieron los modelos de crecimiento en función de los DDS para cada cultivar-localidad (Figura 1). Los modelos presentaron un alto nivel de ajuste y no hubo diferencias significativas entre localidades o cultivares (Tabla 4). Se observó que la acumulación de biomasa seca fue más rápida en Facatativá y Suprema evidenció una mayor y más rápida acumulación de biomasa respecto a Capiro. La mayor acumulación de biomasa seca se presentó entre los 75 a 100 días coincidiendo con la formación de tallos secundarios e inicio de la tuberización (etapas I y II).



**Figura 1.** Modelo de crecimiento en papa, cultivares Diacol Capiro y Pastusa Suprema en dos localidades con condiciones edafoclimáticas contrastantes

**Tabla 4.** Coeficientes de modelos de crecimiento en papa, cultivares Diacol Capiro y Pastusa Suprema en dos localidades del altiplano Cundiboyacense

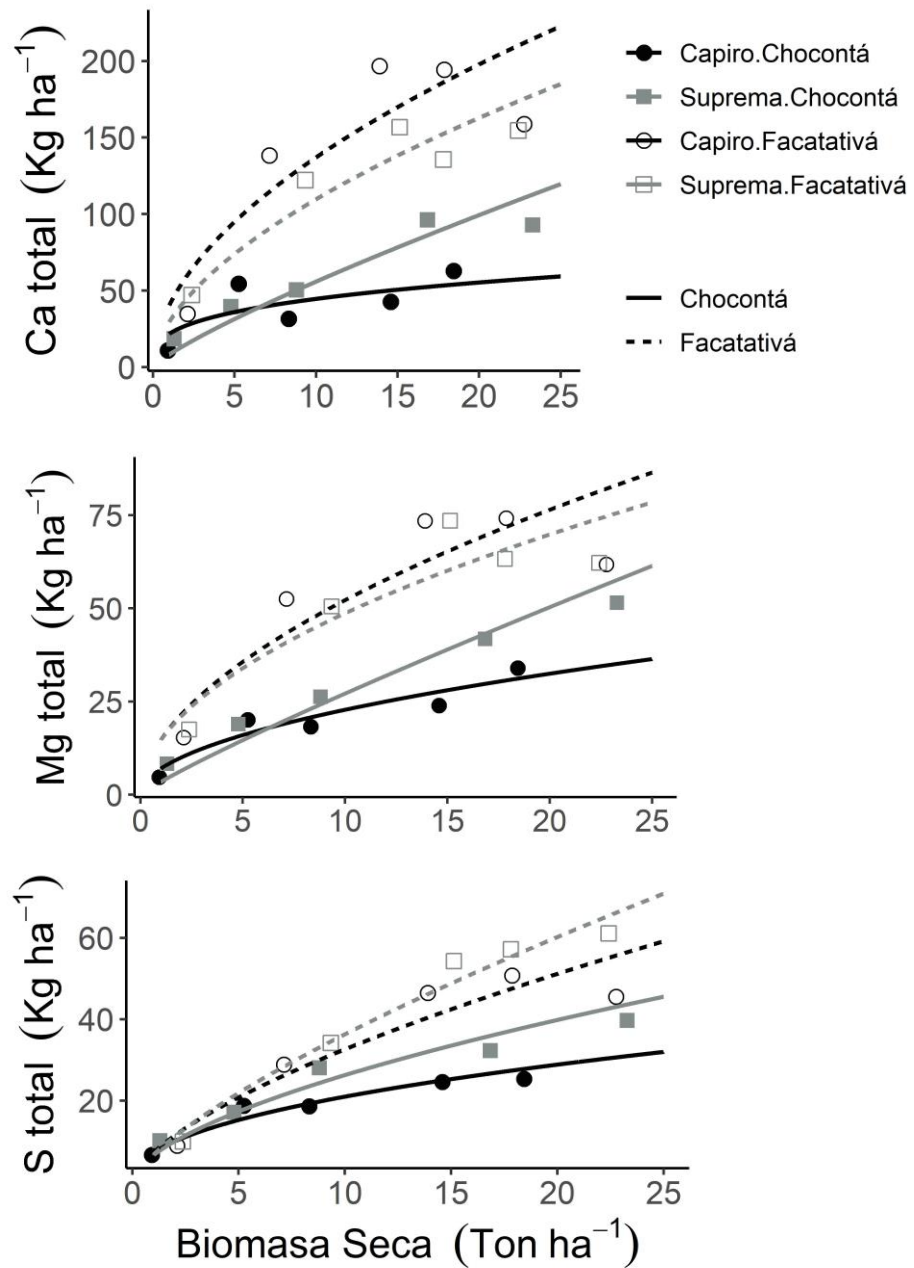
Cultivar	Localidad	b	d	e	SE b	SE d	SE e
Capiro	Facatativá	-3,59	28,07	102,69	0,66 ns	4,21 ns	22,40 ns
	Chocontá	-3,38	28,70	125,67	0,70 ns	7,96 ns	10,82 ns
Suprema	Facatativá	-3,76	24,62	89,32	0,77 ns	2,98 ns	8,07 ns
	Chocontá	-3,36	47,22	150,81	0,71 ns	21,10 ns	38,54 ns

*SE: error estándar. ns: sin diferencias significativas entre cultivares o localidades*

### 2.4.2 Curvas de consumo

Para la acumulación total de nutrientes se encontraron diferencias significativas entre localidades y en la interacción localidad x cultivar en los tres nutrientes ( $p < 0,001$ ); se observó efecto del cultivar en la acumulación de Mg y S. Los modelos del consumo de Ca y Mg presentaron diferencias significativas entre localidades (coeficiente *a* y *b* con  $p < 0,05$ ) para ambos cultivares (Tabla 5, Figura 2). Para S, únicamente el modelo de acumulación de Capiro evidenció diferencias entre localidades. Entre cultivares se presentaron diferencias significativas en los modelos para Chocontá (coeficientes *a* y *b* con  $p < 0,05$ ), siendo mayor la acumulación de Ca y Mg en Suprema (Figura 2). Para una biomasa seca de  $25 \text{ Mg ha}^{-1}$ , Capiro y Suprema presentan en Facatativá la mayor acumulación de Ca ( $223$  y  $185 \text{ kg ha}^{-1}$ ) y Mg ( $86$  y  $78 \text{ kg ha}^{-1}$ ) sin existir diferencias significativas entre cultivares. En Chocontá Suprema presentó significativamente mayor acumulación de Ca y Mg, con un  $50$  y  $59\%$  más respectivamente, respecto a Capiro. La acumulación de azufre en Capiro fue mayor en Facatativá ( $59 \text{ kg ha}^{-1}$ ), pero para Suprema no hubo diferencias entre localidades.

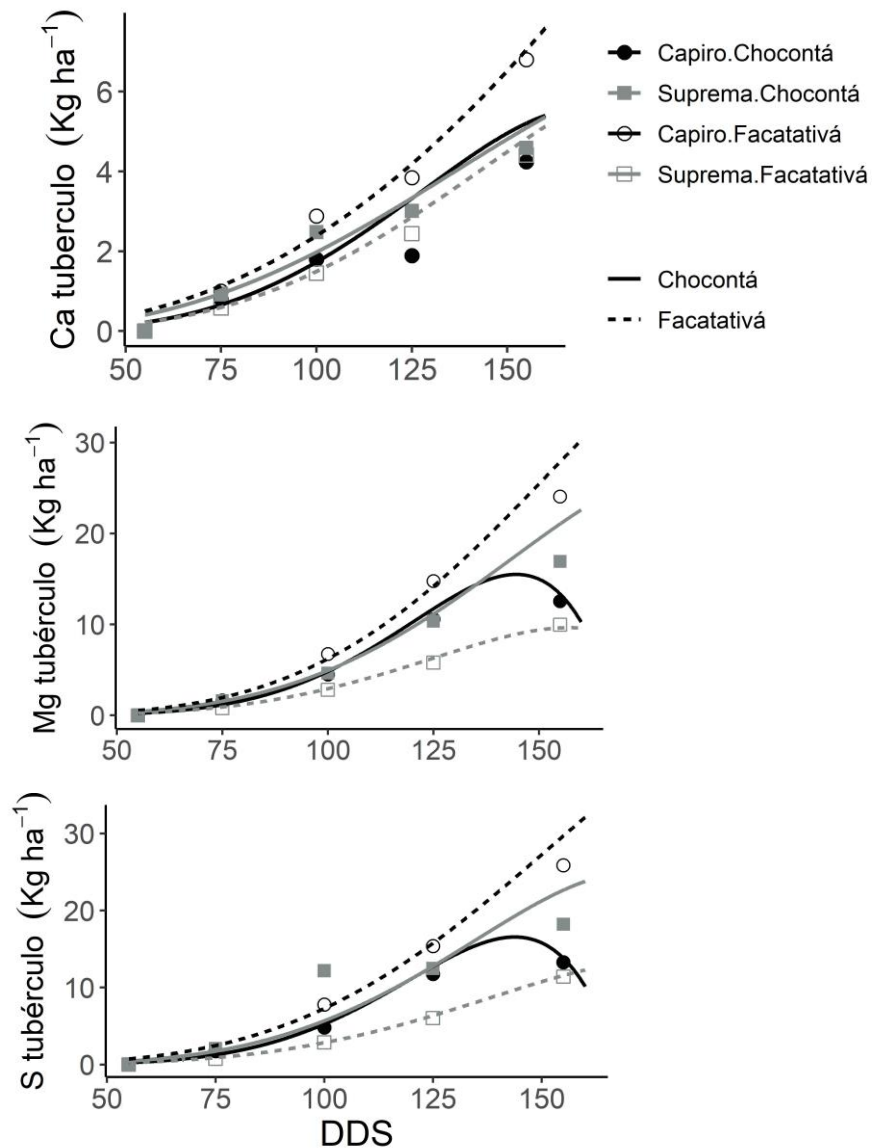




**Figura 2.** Curvas de acumulación total de Calcio, Magnesio y Azufre en papa cultivares Diacol Capiro y Pastusa Suprema en dos localidades con condiciones edafoclimáticas contrastantes

Los datos recopilados de acumulación de nutrientes en el tubérculo presentaron efecto del cultivar y localidad x cultivar ( $p < 0,001$ ). Los modelos de acumulación de Ca, Mg y S en el tubérculo no presentaron diferencias significativas entre cultivares ni localidades, sin embargo, se evidenció una menor acumulación de Mg y S en Suprema en la localidad de Facatativá (Tabla 6).

Adicionalmente, a partir de los modelos, se observó que la tasa de acumulación de Mg y S en el tubérculo de Capiro en Chocontá disminuye hacia el final del ciclo (Figura 3). A partir de los modelos se estableció la acumulación de Ca-Mg-S en el tubérculo y su proporción según la etapa fenológica (Tabla 7). La mayor acumulación de nutrientes coincidió con las etapas fenológicas de máxima tuberización y llenado de tubérculos (etapas III y IV).



**Figura 3.** Curvas de acumulación de Calcio, Magnesio y Azufre en el tubérculo de papa cultivares Diacol Capiro y Pastusa Suprema en dos localidades con condiciones edafoclimáticas contrastantes

**Tabla 5.** Coeficientes de curvas de acumulación total de Ca, Mg y S en papa a partir de biomasa seca, cultivares Diacol Capiro y Pastusa Suprema en dos localidades con condiciones edafoclimáticas contrastantes

Elemento	Localidad	Cultivar	Curva ( $N_{ac} = aW^b$ )	RMSE	InC (a) 95%	InC (b) 95%	SE a	SE b
Calcio	Chocontá	Capiro	21,84W <sup>0,31</sup>	26,24	11.35-32.32	0.12 -0.50	5,26 * **	0,10 *
		Suprema	8,27W <sup>0,83</sup>	28,22	3.30 -13.24	0.63 -1.04	2,49 * **	0,10 *
	Faca	Capiro	40,44W <sup>0,53</sup>	44,78	24.58-56.30	0.39 -0.67	7,92 **	0,07 ns
		Suprema	29,53W <sup>0,57</sup>	37,14	16.09-42.96	0.41 -0.73	6,71 **	0,08 ns
Magnesio	Chocontá	Capiro	7,05W <sup>0,51</sup>	7,66	4.50 - 9.61	0.37 -0.64	1,28 * **	0,07 *
		Suprema	3,50W <sup>0,89</sup>	11,91	1.61 -5.38	0.71- 1.07	0,94 * **	0,09 * **
	Faca	Capiro	14,72W <sup>0,55</sup>	18,78	8.29- 21.16	0.39 -0.70	3,21 **	0,08 ns
		Suprema	14,71W <sup>0,52</sup>	20,80	6.50 -22.91	0.32 -0.72	4,10 **	0,10 **
Azufre	Chocontá	Capiro	7,27W <sup>0,46</sup>	4,93	5.55 -8.99	0.37 -0.55	0,86 ns	0,05 **
		Suprema	6,60W <sup>0,60</sup>	11,25	3.62 -9.58	0.43 -0.75	1,49 ns	0,08 ns
	Faca	Capiro	7,30W <sup>0,65</sup>	9,20	4.69 -9.91	0.53 -0.77	1,30 ns	0,06 **
		Suprema	6,76W <sup>0,73</sup>	8,80	4.44 -9.08	0.61 -0.85	1,16 ns	0,06 ns

*InC: Intervalo de confianza. SE: error estándar \*diferencias significativas entre cultivares  $p < 0.05$ , \*\* diferencias significativas entre localidades  $p < 0.05$ , ns: sin diferencias significativas entre cultivares o localidades*

**Tabla 6.** Coeficientes de curvas de acumulación de Ca, Mg y S en el tubérculo de papa a partir de días después de siembra, cultivares Diacol Capiro y Pastusa Suprema en dos localidades con condiciones edafoclimáticas contrastantes

Elemento	Localidad	Cultivar	cm	E	M	RMSE	SE cm	SE e	SE m
Calcio	Chocontá	Capiro	5,58	170,10	128,10	0,69	1,73 ns	34,07 ns	16,65 ns
		Suprema	6,73	202,80	136,40	0,95	7,67 ns	146,20 ns	72,44 ns
	Faca	Capiro	32,85	382,00	245,10	1,74	501,80 ns	2772,20 ns	1636,10 ns
		Suprema	6,43	195,00	142,80	1,24	12,29 ns	195,10 ns	110,20 ns
Magnesio	Chocontá	Capiro	15,50	144,60	120,50	2,10	0,88 ns	3,29 ns	2,38 ns
		Suprema	26,61	182,80	143,70	2,43	20,37 ns	62,20 ns	38,00 ns
	Faca	Capiro	40,25	193,20	151,30	6,40	102,60 ns	201,20 ns	129,00 ns
		Suprema	9,64	157,10	125,00	1,05	1,06 ns	13,49 ns	5,95 ns
Azufre	Chocontá	Capiro	16,56	143,80	119,90	1,72	0,76 ns	2,17 ns	1,86 ns
		Suprema	24,83	170,00	134,90	3,53	12,56 ns	44,77 ns	24,81 ns
	Faca	Capiro	43,33	196,60	151,10	6,25	98,67 ns	193,50 ns	121,20 ns
		Suprema	13,44	175,70	138,50	1,12	6,36 ns	40,28 ns	23,37 ns

*SE: error estándar. ns: sin diferencias significativas entre localidad o cultivar*

**Tabla 7.** Pronóstico de acumulación total y en el tubérculo de Ca, Mg y S en papa por etapa fenológica, cultivares Diacol Capiro y Pastusa Suprema en dos localidades con condiciones edafoclimáticas contrastantes.

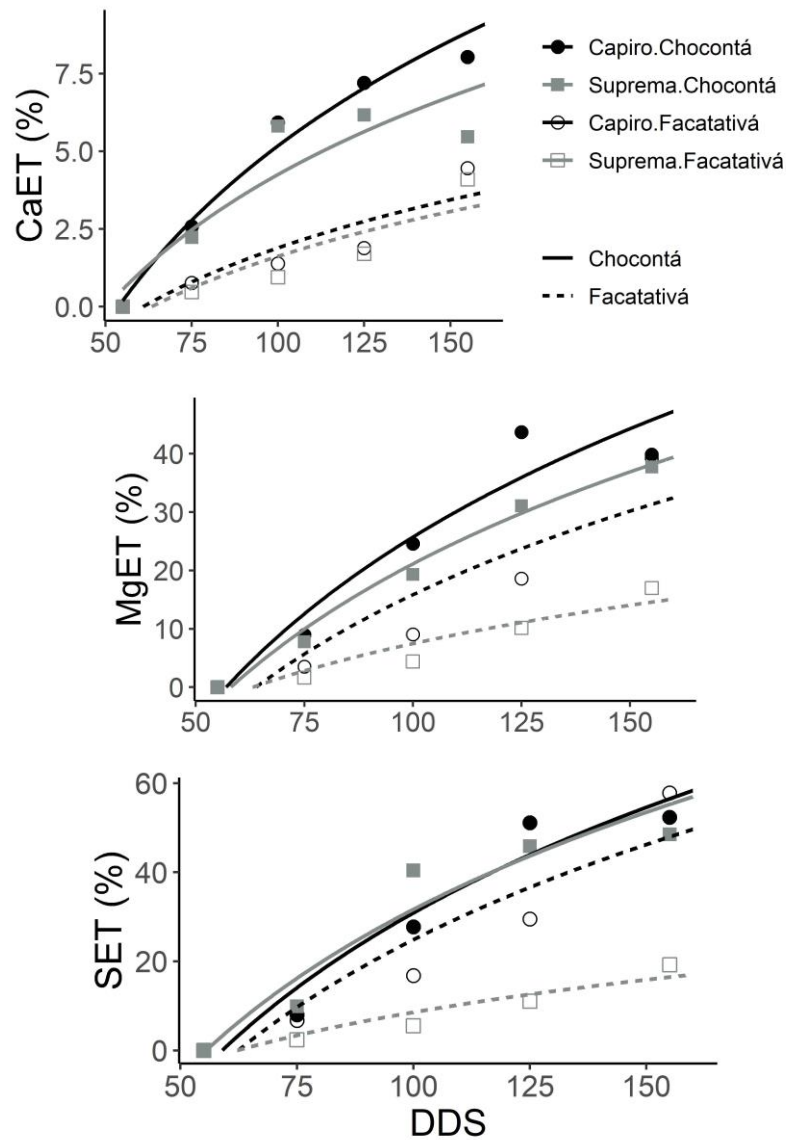
Cultivar	Localidad	EF	DDS	AC total (kg ha-1)			ACTub (kg ha-1)			ACTub etapa (%)		
				Ca	Mg	S	Ca	Mg	S	Ca	Mg	S
Capiro	Chocontá	I	0-55	25,5	9,1	9,2	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
		II	55-75	34,2	14,8	14,2	0,4	1,0	1,0	8,6	8,3	10,5
		III	75-100	43,3	21,7	20,0	1,1	3,7	4,0	32,0	40,1	32,3
		IV	100-125	49,7	27,3	24,7	1,6	6,9	7,5	65,5	77,9	80,2
		V	125-150	54,0	31,2	27,8	1,6	3,3	3,1	100	100	100
	Facatativá	I	0-55	68,4	25,4	13,9	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
		II	55-75	112,2	42,5	25,5	0,6	1,4	1,7	10,6	5,7	6,6
		III	75-100	159,8	61,3	39,4	1,3	4,3	4,8	31,4	22,9	24,8
		IV	100-125	191,4	73,9	49,1	1,8	8,0	8,5	61,2	54,9	56,7
		V	125-150	209,8	81,3	55,0	2,3	11,2	11,5	100	100	100
Suprema	Chocontá	I	0-55	11,9	5,2	8,6	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
		II	55-75	26,8	12,4	15,5	0,5	1,1	1,3	12,3	6,0	6,2
		III	75-100	53,6	26,0	25,5	1,0	3,4	3,9	35,8	23,8	25,2
		IV	100-125	84,3	42,2	35,4	1,4	6,2	7,1	66,5	56,5	59,3
		V	125-150	113,2	57,9	43,8	1,5	8,3	8,5	100	100	100
	Facatativá	I	0-55	59,6	27,9	16,6	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
		II	55-75	99,4	44,5	32,0	0,4	0,7	0,7	9,1	7,5	6,2
		III	75-100	137,6	59,9	48,5	0,9	2,0	2,0	30,0	29,5	24,8
		IV	100-125	159,1	68,4	58,4	1,4	3,4	3,5	61,8	66,2	58,1
		V	125-150	170,0	72,6	63,6	1,6	3,1	4,4	100	100	100

EF: Etapa fenológica. AC total: acumulación total. ACTub: acumulación en el tubérculo. I: Formación de tallos, II: Inicio de tuberización, III: Floración-máxima. Tuberización, IV: Llenado de tubérculos-cesa la floración, V: Máximo llenado-maduración tubérculos.

### 2.4.3 Eficiencia de traslocación

Se observó un efecto de la localidad ( $p < 0,01$ ) en la eficiencia de traslocación de los nutrientes, siendo significativamente mayor en Chocontá que en Facatativá (Figura 4). Para Mg y S se observó un efecto del cultivar ( $p < 0,01$ ) desde los 100 DDS a favor de Capiro. La eficiencia de traslocación durante el ciclo productivo se ajustó a un modelo logarítmico positivo. A partir del inicio de la tuberización (75 DDS) se presentó un aumento progresivo en los valores alcanzando su valor máximo en la cosecha (155 DDS). Ca presentó la menor eficiencia de traslocación con un valor promedio de 5,5%, seguido del magnesio con 33,5% y azufre con 44,5%.

Los modelos en Chocontá fueron significativamente diferentes respecto a los de Facatativá (parámetros  $a$  y  $b$  con  $p < 0,01$ ), a excepción del modelo de S en Capiro donde no se presentaron diferencias significativas entre localidades (Tabla 8). Para los modelos de MgET y SET en Facatativá se encontraron diferencias significativas entre cultivares (parámetros  $a$  y  $b$   $p < 0,01$ ), teniendo Capiro un 57% y 67% mayor eficiencia de traslocación de Mg y S a los 155 DDS respecto a Suprema. En Chocontá no hubo diferencias entre cultivares a diferencia de lo encontrado en la acumulación total de nutrientes. La eficiencia de traslocación de Ca no tuvo diferencias entre cultivares dentro de una misma localidad.



**Figura 4.** Eficiencia de traslocación (ET) de Ca (a), Mg (b) y S (c) en papa, cultivares Diacol Capiro y Pastusa Suprema en dos localidades con condiciones edafoclimáticas contrastantes.

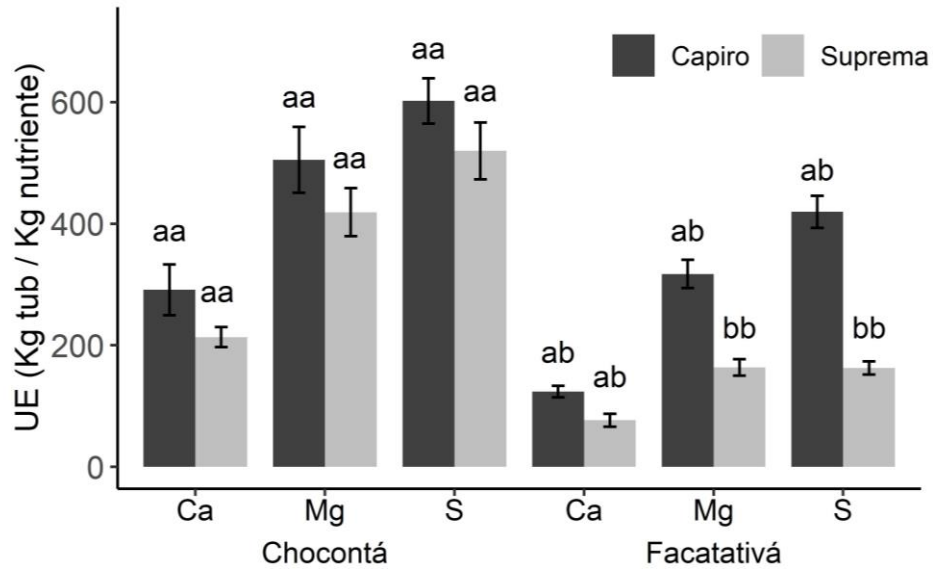
**Tabla 8.** Coeficientes de modelos de eficiencia de traslocación de Ca, Mg y S en papa, cultivares Diacol Capiro y Pastusa Suprema en dos localidades con condiciones edafoclimáticas contrastantes

Elemento	Localidad	Cultivar	Curva (NC = a (ln (x)+b)	RMSE	InC (a) 95%	InC (b) 95%	SE a	SE b
Calcio	Chocontá	Capiro	8,33 (ln (x)-33,20	2,86	6.43 - 10.24	(-41.89) - (-24.50)	0,96**	4,36**
		Suprema	6,18 (ln (x)-24,21	2,94	4.22 - 8.14	(-33.14) - (-15.28)	0,98**	4,48 ns
	Faca	Capiro	3,81 (ln (x)-15,66	1,05	3.05 - 4.57	(-19.13) - (-12.2)	0,38**	1,73**
		Suprema	3,55 (ln (x)-14,72	1,55	2.43 - 4.67	(-19.84) - (-9.59)	0,56**	2,56 ns
Magnesio	Chocontá	Capiro	45,78 (ln (x)-185,1	9,42	39.51 - 52.06	(-213.7) - (-156.4)	3,15**	14,37 ns
		Suprema	38,88 (ln (x)-157,9	9,37	32.64 - 45.12	(-186.4) - (-129.4)	3,13**	14,28**
	Faca	Capiro	35,34 (ln (x)-146,9	7,60	29.86 - 40.83	(-171.9) - (-121.8)	2,74* **	12,52*
		Suprema	16,21 (ln (x)-67,17	4,13	13.23 - 19.19	(-80.79) - (-53.56)	1,49* **	6,80* **
Azufre	Chocontá	Capiro	58,43 (ln (x)-238,2	10,38	51.52-65.34	(-269.8) - (-206.7)	3,46 ns	15,82 ns
		Suprema	53,78 (ln (x)-216,0	16,88	42.54- 65.02	(-267.3) - (-164.6)	5,63**	27,73**
	Faca	Capiro	52,69 (ln (x)-217,8	9,82	45.61-59.78	(-250.2) - (-185.4)	3,54*	16,17 *
		Suprema	18,0 (ln (x)-74,31	3,73	15.30-20.69	(-86.61) - (-62.01)	1,34* **	6,14* **

*InC: intervalo de confianza. SE: error estándar. \*diferencias significativas entre cultivares  $p < 0,01$ . \*\* diferencias significativas entre localidades  $p < 0,05$ . ns: sin diferencias significativas*

#### 2.4.4. Uso eficiente de los nutrientes

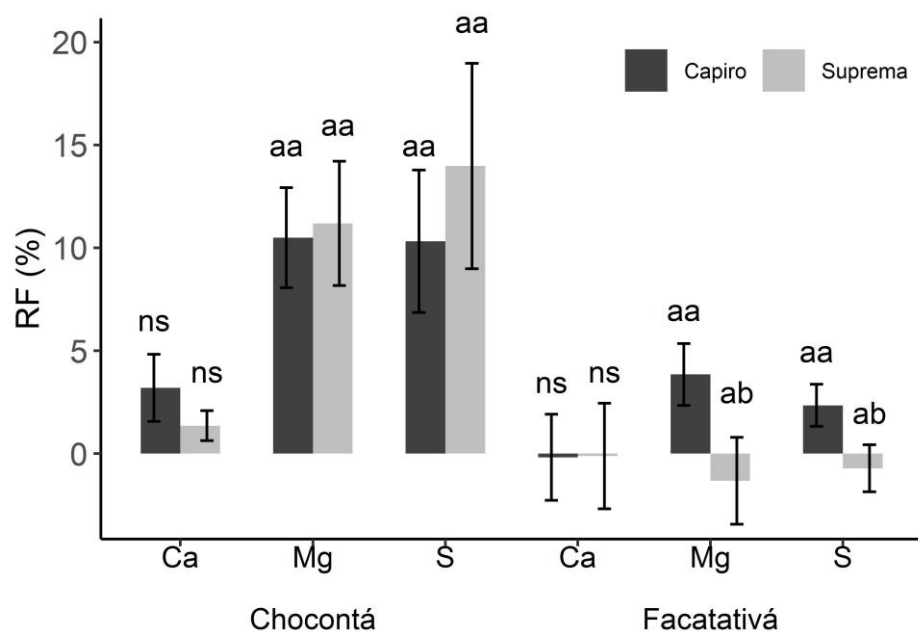
El efecto de la localidad y del cultivar fueron altamente significativos ( $p < 0,01$ ) para CaUE, MgUE y SUE, presentándose interacción localidad x cultivar únicamente en SUE. El uso eficiente de los tres nutrientes fue significativamente mayor ( $p < 0,01$ ) en Chocontá respecto a Facatativá para los dos cultivares (Figura 5). Para CaUE no se encontraron diferencias entre cultivares en las dos localidades, sin embargo, en Facatativá Capiro presentó significativamente ( $p < 0,05$ ) mayor MgUE y SUE respecto a Suprema. En Chocontá no se presentaron diferencias. S fue el nutriente de mayor uso eficiente con un promedio de 426 kg de materia seca de tubérculo por kg de nutriente extraído, seguido de Mg con 351 y Ca con 176.



**Figura 5.** Uso eficiente (UE) de los nutrientes Ca, Mg y S en papa, cultivares Diacol Capiro y Pastusa Suprema en dos localidades con condiciones edafoclimáticas contrastantes. La primera letra indica diferencia entre cultivares dentro de una misma localidad; la segunda letra indica diferencias significativas entre localidades para un mismo cultivar

#### 2.4.5 Eficiencia de adquisición o recuperación

No hubo efecto de la localidad o del cultivar sobre RFCa, sin embargo, RFMg y RFS si presentaron efecto de la localidad ( $p < 0,01$ ). Suprema tuvo un RFMg y RFS significativamente mayor en Chocontá ( $p < 0,01$ ) respecto a Facatativá (Figura 6). No se presentaron diferencias significativas entre cultivares. La mayor eficiencia se encontró para S, seguido de Mg y de Ca. En Facatativá se presentaron valores negativos para los tres nutrientes.



**Figura 6.** Eficiencia de recuperación (RF) de los nutrientes Ca, Mg y S en papa, cultivares Diacol Capiro y Pastusa Suprema en dos localidades con condiciones edafoclimáticas contrastantes. La primera letra indica diferencia entre cultivares dentro de una misma localidad y la segunda letra indica diferencias significativas entre localidades para un mismo cultivar

## 2.5 Discusión

El aumento de la biomasa tiene relación directa con la formación de tubérculos ya que estos son órganos de almacenamiento y constituyen una alta proporción de la biomasa total (Ferreira et al., 2019). La baja translocación entre los 0-75 DDS se debe a que en esta etapa se da el proceso de diferenciación celular y formación de tallos primarios, en el que la tasa de crecimiento es baja al igual que la cantidad de células de almacenamiento causando que la demanda de nutrientes del tubérculo sea baja (Gómez et al., 2019a). La mayor acumulación de biomasa seca entre los 75-100 DDS se explica dado que coincide con las etapas I y II de formación de tallos secundarios y máxima tuberización. El crecimiento más rápido en Suprema se encuentra relacionado con su hábito de crecimiento indeterminado. La mayor acumulación de nutrientes en Facatativá se relaciona con una capacidad de intercambio catiónico (CIC) del suelo más alta dada por el mayor contenido de materia orgánica (Soto, 2020). Adicionalmente, la mayor temperatura media en Facatativá, puede afectar positivamente ésta variable al acelerar los procesos metabólicos, el crecimiento y la demanda de nutrientes, y además podría relacionarse con una mayor temperatura



media del suelo (variable no monitoreada), lo cual aumenta la toma de nutrientes por parte de las raíces (Bassirirad, 2000). Al encontrarse diferentes valores de acumulación total de Ca y Mg entre cultivares y localidades, pero similares para la acumulación en el tubérculo, se observa como éstas variables no necesariamente se determinan entre ellas. La localidad no afecta la acumulación en el tubérculo dado que la traslocación de nutrientes se da por el floema y son las características del nutriente (peso, reactividad, forma, entre otros) lo que va a determinar su movilidad. Entre cultivares la ausencia de diferencias indica inicialmente que la demanda o fuerza vertedero por parte del tubérculo es similar para ambos.

La acumulación total de Ca, Mg y S fue mayor a lo reportado por otras investigaciones. Para la variedad Asterix, con rendimientos de 62 ton ha<sup>-1</sup>, (Silva et al., 2020) reportan una acumulación total de Ca de 37 kg ha<sup>-1</sup> y en el tubérculo de 2,7 kg ha<sup>-1</sup>. Por otra parte, para el cv MNF-80 con rendimiento de 36 ton ha<sup>-1</sup> (Alvarado y Cabalceta, 2005) reportan una acumulación total de 12, 10 y 11 kg ha<sup>-1</sup> de Ca, Mg y S respectivamente. En la variedad Agatha (Soratto et al., 2020) con un rendimiento de 35 ton ha<sup>-1</sup>, la acumulación total de Mg (8 kg ha<sup>-1</sup>) y en el tubérculo (5 kg ha<sup>-1</sup>) es menor a lo encontrado en el presente estudio. La diferencia de consumo de nutrientes respecto a otras investigaciones puede deberse a que el rendimiento en la presente investigación fue superior (60-70 ton ha<sup>-1</sup> en ambos cultivares), aumentando los requerimientos nutricionales. Así mismo, se debe tener en cuenta la influencia del genotipo y de las condiciones de experimentación en cuanto a localidad, clima, suelo, entre otros.

La acumulación y distribución diferencial de nutrientes entre tratamientos ratifica el efecto del genotipo y el ambiente sobre el crecimiento y desarrollo del cultivo (Campos y Ortiz, 2020). La mayor acumulación de Ca en la parte aérea concuerda con Silva et al., (2020) quienes establecieron una partición de Ca de 93-95% en la parte aérea y un 5-7% a los tubérculos. Lo anterior se explica debido a su baja movilidad en floema y a que es un nutriente que se mueve por corriente de transpiración (Silva et al., 2020); dado que los tubérculos tienen baja tasa de transpiración en comparación a la parte aérea, la acumulación de Ca en estos órganos es menor. Lo anterior concuerda con lo reportado por diversos autores (Alvarado y Cabalceta, 2005; Fernandes et al., 2011). La mayor acumulación de Ca en la etapa de tuberización y su baja movilidad resalta la importancia de realizar un manejo nutricional que favorezca la disponibilidad y uso de este elemento por parte de la planta desde etapas tempranas. En este caso se resalta la importancia de aplicaciones fertilizantes dirigidas al tubérculo.

La acumulación de Mg total y en tubérculo fue mayor respecto a lo reportado por Silva et al., (2020) para cuatro variedades de papa. Sin embargo, los resultados concuerdan respecto al patrón de acumulación que plantean los autores donde se observa que la acumulación de Mg en la parte aérea aumenta al avanzar el desarrollo del cultivo, pero al iniciar la tuberización es acumulado principalmente en los tubérculos. La disminución en la acumulación en el tubérculo de Mg hacia el final del ciclo (máxima maduración de tubérculos) puede deberse a una menor necesidad por la disminución en el transporte de fotoasimilados, donde el Mg está implicado como activador alostérico de las ATPasas (Koch et al., 2020). La menor producción de proteínas podría ser un factor ligado a la disminución en el contenido en tubérculo de Mg y S al final del ciclo, dado que el Mg participa en la síntesis y el azufre es parte estructural de aminoácidos como la metionina y cisteína (Koch et al., 2020; Wszelaczyńska et al., 2020).

La mayor ET de nutrientes al tubérculo coincide con las etapas de tuberización y llenado de tubérculos, etapas en las que se requieren en funciones como traslocación de fotoasimilados, formación de paredes celulares y síntesis de proteínas (Naumann et al., 2020). Capiro mostró ser un genotipo con mayor fuerza vertedero, siendo más eficiente en la traslocación de nutrientes al tubérculo independientemente de la localidad. Por el contrario, Suprema mostró ser favorecida por las condiciones edafoclimáticas de Chocontá (suelos de baja fertilidad y mayor altura m.s.n.m). El comportamiento diferencial de cultivares en la localidad de Chocontá, hace evidente que aun cuando ambos pertenecen al grupo Andigenum, existen diferencias genotípicas que influyen en su desempeño en esta localidad. Estos resultados concuerdan con lo previamente reportado para los elementos K y P por Gómez et al., (2019).

Ca fue el elemento con mayor variación en la ET entre localidades, lo cual se encuentra relacionado con la temperatura media diferencial entre ambas. Debe mencionarse que esta variable se ve influenciada por la acumulación directa de Ca en los tubérculos a través de las raíces que se desarrollan en tubérculos y estolones (Koch et al., 2020; Palta, 2010). La baja traslocación promedio de Ca se debe a que la cantidad requerida en el tubérculo es baja al ser utilizado principalmente como componente estructural de paredes celulares y estabilización de membranas. Por otra parte los mayores valores de Mg y S se debe a su requerimiento para la traslocación de fotoasimilados, formación de proteínas y en la regulación cationes-aniones (Campos y Ortiz, 2020; Koch et al., 2020). La traslocación de Ca en ambos cultivares podría indicar necesidades similares que se traducen en características homogéneas como calidad postcosecha y resistencia a

daño mecánico, sin embargo, esto debe ser corroborado en próximas investigaciones. Así mismo, es de interés en un futuro establecer si la mayor translocación de Mg y S de Capiro se ve reflejado en un mayor contenido de proteína y almidón.

Los valores de UE en Chocontá fueron más altos debido a que la producción de tubérculos (peso seco) de forma global fue mayor y a partir de una significativa menor acumulación total de nutrientes. Esto está relacionado con la mayor evapotranspiración en la localidad cuyas condiciones favorecieron el proceso de partición y acumulación de nutrientes y fotoasimilados. Por otra parte, Capiro mostró ser el cultivar con mayor uso eficiente de nutrientes en ambas localidades. Estos resultados no deben confundirse con el desempeño en producción total dado que en Chocontá Suprema tuvo la mayor producción en peso seco (Gómez et al., 2018), mientras que en Facatativá fue Capiro. Es de interés en próximas investigaciones profundizar porque en Facatativá la diferencia es significativa únicamente para Mg y S. En los últimos años la investigación ha profundizado en el análisis de la toma de nutrientes, sin embargo, el análisis de la eficiencia interna de utilización es escasa (Tamagno et al., 2017).

La RF debe interpretarse según tres condiciones o escenarios que se pueden dar de forma separada o conjunta: cantidad de nutriente que es tomado por necesidad, por capacidad (planta-raíces) o por posibilidad (condiciones externas suelo-clima). Aun cuando en la localidad de Chocontá la dosis de fertilización fue mayor, la RF de los tres nutrientes fue más alta que en Facatativá, lo cual evidencia la mayor necesidad por la condición de baja fertilidad de suelo de la localidad (pH más ácido, menor CIC y contenido de nutrientes). No se considera la mayor RF en Chocontá como una respuesta a un mejor desarrollo radical dado que aun cuando no se tomó registro del peso de raíces, la cantidad de nutrientes que tomaron las plantas fue mayor en Facatativá. Los valores negativos o bajos de RF en Facatativá deben entenderse como una baja o nula necesidad de aporte del nutriente ya que lo que se aportó no está siendo utilizado, posiblemente por exceso de aplicación o desbalance entre nutrientes. Para establecer el efecto de las características del suelo sobre la RF es necesario en un futuro establecer cantidad de nutriente que se pierde por procesos de lavado o inmovilización. Es de resaltar que la RF de Ca, Mg y S es menor (<15%) respecto a lo reportado en publicaciones previas para los macronutrientes N y K (>40%) (Gómez et al., 2019a), lo cual se debe a su fácil pérdida en el suelo por procesos de lixiviación o de inmovilización (Senbayram et al., 2015; White y Broadley, 2003). Ramaekers et al., (2010) plantea que para aumentar la RF se debe buscar un mayor desarrollo de raíces, una mejor distribución jerárquica de raíces y una mayor producción de pelos absorbentes, lo cual favorecería la toma de nutrientes. Por otra parte, se debe

asegurar una mayor disponibilidad de los nutrientes en el suelo, lo cual es afectado por su composición, incompatibilidad y desbalance entre nutrientes, entre otros. Finalmente debe considerarse en el efecto de ciclos continuos de cultivo sobre las propiedades del suelo y su fertilidad, los cuales en el tiempo pueden ser modificados y afectar la RF (Duarte et al., 2019; Stewart, 2007).

## 2.6 Conclusiones

Los cultivares Diacol Capiro y Pastusa Suprema presentan procesos diferentes de acumulación y translocación de Ca-Mg-S y estos dependen de la interacción genotipo x ambiente. Capiro evidenció una mayor adaptación a las condiciones de clima y suelo de Facatativá, mientras Suprema mostró mejor desempeño en Chocontá. Los requerimientos de nutrientes siguieron el orden de Ca>Mg>S, mientras que la traslocación fue S>Mg>Ca. Al realizar un análisis más profundo de la fisiología de la nutrición de estos nutrientes, se observó que aun cuando los procesos de acumulación fueron favorecidos por las condiciones de Facatativá, la eficiencia de uso, recuperación y traslocación de nutrientes fue mayor en Chocontá, impactando positivamente el rendimiento en esta localidad. La información generada se puede utilizar como una herramienta para ajustar dosis de fertilización de Ca, Mg y S más acordes a las necesidades del cultivo.

## 2.7 Agradecimientos

Los autores expresan su agradecimiento a INGEPLANT SAS y la Universidad Nacional de Colombia – Bogotá por la financiación y apoyo de diferente índole en la ejecución de actividades de la presente investigación.

## 2.8 Bibliografía

- Abdallah, F. Ben, Olivier, M., Goffart, J.P., Minet, O., 2016. Establishing the Nitrogen Dilution Curve for Potato Cultivar Bintje in Belgium. *Potato Res.* 59, 241–258. <https://doi.org/10.1007/s11540-016-9331-y>
- Almeida, L. da S., Pereira, H.S., Cardoso, A.F., Lana, R.M.Q., Mageste, J.G., de LIMA, L.C., Luz, J.M.Q., 2018. Accumulation and export of micronutrients in potato fertilized with organic-mineral fertilizer. *Biosci. J.* 34, 71–80. <https://doi.org/10.14393/BJ-v34n6a2018-39917>
- Alvarado, A., Cabalceta, G., 2005. Absorción De Nutrimientos En El Cultivar De Papa Mnf-80.

- Agron. Costarric. 29, 107–123.
- Bassirirad, H., 2000. Kinetics of nutrient uptake by roots: Responses to global change. *New Phytol.* 147, 155–169. <https://doi.org/10.1046/j.1469-8137.2000.00682.x>
- Belanger, G., Walsh, J., Richards, J., Milburn, P., Ziadi, N., 2001. Critical nitrogen curve and nitrogen nutrition index for corn in eastern Canada. *Agron. J.* 78, 355–364. <https://doi.org/10.2134/agronj2007.0059>
- Bender, R.R., Haegele, J.W., Below, F.E., 2015. Nutrient uptake, partitioning, and remobilization in modern soybean varieties. *Agron. J.* 107, 563–573. <https://doi.org/10.2134/agronj14.0435>
- Campos, H., Ortiz, O., 2020. *The Potato Crop*, The Potato Crop. Springer International Publishing, Cham. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-28683-5>
- Castro, H., Gómez, M., 2013. Fertilidad y fertilizantes, in: Burbano, H., Silva, F. (Eds.), *Ciencia Del Suelo - Principios Básicos*. 2a Ed. Sociedad Colombiana de La Ciencia Del Suelo. pp. 231–304.
- Dahal, K., Li, X.Q., Tai, H., Creelman, A., Bizimungu, B., 2019. Improving potato stress tolerance and tuber yield under a climate change scenario – a current overview. *Front. Plant Sci.* 10. <https://doi.org/10.3389/fpls.2019.00563>
- Duarte, L.O., Clemente, J.M., Caixeta, I.A.B., Senoski, M.D.P., Aquino, L.A. De, 2019. Dry matter and nutrient accumulation curve in cabbage crop. *Rev. Caatinga* 32, 679–689. <https://doi.org/10.1590/1983-21252019v32n312rc>
- Fernandes, A.M., Soratto, R.P., dos Santos, L.A., Job, A.L.G., 2011. Extração e exportação de nutrientes em cultivares de feijoeiro, sob níveis de adubação: I - Macronutrientes. *Rev. Bras. Cienc. do Solo* 37, 1027–1042. <https://doi.org/10.1590/S0100-06832013000400020>
- Ferreira, M., Andrade, V., Oliveira, A., Ferreira, E., Brito, O., Silva, L., 2019. Physiological characterization of plant growth in sweet potato. *Hortic. Bras.* 37, 112–118. <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.1590/S0102-053620190118> Physiological
- Gaj, R., Chudzińska, E., Borowski-Beszta, J., Spsychalski, W., 2020. Effect of potassium and micronutrient foliar fertilisation on the content and accumulation of macroelements, yield and quality parameters of potato tubers. *J. Elem.* 25, 1213–1231.

<https://doi.org/10.5601/jelem.2020.25.1.1990>

- Gómez, M.I., Magnitskiy, S., Rodríguez, L.E., 2019. Nitrogen, phosphorus and potassium accumulation and partitioning by the potato group Andigenum in Colombia. *Nutr. Cycl. Agroecosystems* 113, 349–363. <https://doi.org/10.1007/s10705-019-09986-z>
- Gómez, M.I., Magnitskiy, S., Rodríguez, L.E., 2018. Potential yield and efficiency of N and K uptake in tubers of cvs. Capiro and Suprema (*Solanum tuberosum* Group Andigenum). *Agron. Colomb.* 36, 126–134. <https://doi.org/10.15446/agron.colomb.v36n2.72766>
- Hamdi, W., Helali, L., Beji, R., Zhani, K., Ouertatani, S., Gharbi, A., 2015. Effect of levels calcium nitrate addition on potatoes fertilizer. *Int. Res. J. Eng. Technol.* 2, 2006–2013.
- Hameed, A., Zaidi, S.S. e. A., Shakir, S., Mansoor, S., 2018. Applications of new breeding technologies for potato improvement. *Front. Plant Sci.* 9, 1–15. <https://doi.org/10.3389/fpls.2018.00925>
- Handayani, T., Gilani, S.A., Watanabe, K.N., 2019. Climatic changes and potatoes: How can we cope with the abiotic stresses? *Breed. Sci.* 69, 545–563. <https://doi.org/10.1270/jsbbs.19070>
- IGAC, 2006. Métodos analíticos del Laboratorio de Suelos. Instituto Geográfico Agustín Codazzi, 6th ed. Bogotá.
- Koch, M., Naumann, M., Pawelzik, E., Gransee, A., Hiel, H., 2020. The Importance of Nutrient Management for Potato Production Part I: Plant Nutrition and Yield. *Potato Res.* 63, 97–119. <https://doi.org/10.1007/s11540-019-09430-3>
- Lemaire, G., Sinclair, T., Sadras, V., Bélanger, G., 2019. Allometric approach to crop nutrition and implications for crop diagnosis and phenotyping. A review. *Agron. Sustain. Dev.* 39, 1–17. <https://doi.org/10.1007/s13593-019-0570-6>
- Naumann, M., Koch, M., Thiel, H., Gransee, A., Pawelzik, E., 2020. The Importance of Nutrient Management for Potato Production Part II: Plant Nutrition and Tuber Quality. *Potato Res.* 63, 121–137. <https://doi.org/10.1007/s11540-019-09430-3>
- Palta, J.P., 2010. Improving Potato Tuber Quality and Production by Targeted Calcium Nutrition: The Discovery of Tuber Roots Leading to a New Concept in Potato Nutrition. *Potato Res.* 53, 267–275. <https://doi.org/10.1007/s11540-010-9163-0>

- Pereira, G.E., Melo, J.W.P. de, Ragassi, C.F., Carvalho, A.D.F. de, Silva, J. da, Silva, G.O. da, Vilela, M.S., 2020. Macronutrient accumulation curves in potato genotypes in the Brazilian Savanna. *Pesqui. Agropecuária Trop.* 50, 1–11. <https://doi.org/10.1590/1983-40632020v5064416>
- Poljak, M., Lazarević, B., Horvat, T., Karažija, T., 2011. Influence of nitrogen fertilization and plant density on yield and nitrogen use efficiency of the potato (*Solanum tuberosum* L.), in: 46th Croatian and 6th International Symposium on Agriculture. Opatija, pp. 667–671.
- Ramaekers, L., Remans, R., Rao, I.M., Blair, M.W., Vanderleyden, J., 2010. Strategies for improving phosphorus acquisition efficiency of crop plants. *F. Crop. Res.* 117, 169–176. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2010.03.001>
- Ritz, C., Baty, F., Streibig, J., Gerhard, D., 2015. Dose-response analysis using R. *PLoS One.* <https://doi.org/https://doi.org/10.1371/journal.pone.0146021>
- SAS Institute, 2017. Base SAS 9.4 procedures guide : statistical procedures., 5th ed. SAS institute, Cary.
- Seling, S., Wissemeier, A.H., Cambier, P., Van Cutsem, P., 2000. Calcium deficiency in potato (*Solanum tuberosum* ssp. *tuberosum*) leaves and its effects on the pectic composition of the apoplastic fluid. *Physiol. Plant.* 109, 44–50. <https://doi.org/10.1034/j.1399-3054.2000.100107.x>
- Senbayram, M., Gransee, A., Wahle, V., Thiel, H., 2015. Role of magnesium fertilisers in agriculture: Plant-soil continuum. *Crop Pasture Sci.* 66, 1219–1229. <https://doi.org/10.1071/CP15104>
- Silva, C.D., Soares, M.E.P., Ferreira, M.H., Cavalcante, A.C.P., Andrade, G.A.V. De, Aquino, L.A. De, 2020. Dry matter and macronutrient extraction curves of potato varieties in the Alto Paranaíba region, Brazil. *Rev. Bras. Eng. Agrícola e Ambient.* 24, 176–186.
- Soil Survey Staff, 2014. Keys to soil taxonomy. 12th ed. USDA-Natural Resources Conservation Service, Washington, DC.
- Soratto, R.P., Job, A.L.G., Fernandes, A.M., Assunção, N.S., Fernandes, F.M., 2020. Biomass Accumulation and Nutritional Requirements of Potato as Affected by Potassium Supply. *J. Soil Sci. Plant Nutr.* 20, 1051–1066. <https://doi.org/10.1007/s42729-020-00192-3>

- Soto, M., 2020. Efectos de la materia orgánica sobre el suelo 1, 1–5.
- Stewart, W.M., 2007. Consideraciones en el uso eficiente de los nutrientes. *Inf. agronómicas* 67, 1–7. <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>
- Tamagno, S., Balboa, G.R., Assefa, Y., Kovács, P., Casteel, S.N., Salvagiotti, F., García, F.O., Stewart, W.M., Ciampitti, I.A., 2017. Nutrient partitioning and stoichiometry in soybean: A synthesis-analysis. *F. Crop. Res.* 200, 18–27. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2016.09.019>
- Valbuena, R.I., Roveda, G., 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. *Produmedios*.
- Villamil, H.J., Castro, H., Valvuela, I., Cabezas, M., Porras, P., 2005. Memorias Taller Nacional Sobre Suelo, Fisiología Y Nutricion Vegetal, in: Cevipapa. Bogotá, p. 19.
- Wendimu Seifu, Y., Deneke, S., 2017. Effect of Calcium Chloride and Calcium Nitrate on Potato (*Solanum tuberosum* L.) Growth and Yield. *J. Hortic.* 04. <https://doi.org/10.4172/2376-0354.1000207>
- White, P.J., Broadley, M.R., 2003. Calcium in plants. *Ann. Bot.* 92, 487–511. <https://doi.org/10.1093/aob/mcg164>
- Wickham, H., 2016. *ggplot2: Elegant Graphics for Data Analysis*. New York.
- Wszelaczyńska, E., Pobereźny, J., Lamparski, R., Kozera, W., Knapowski, T., 2020. Effect of potato tuber biofortification with magnesium and the storage time on the content of nutrients. *J. Elem.* 25, 687–700. <https://doi.org/10.5601/jelem.2019.24.4.1880>
- Yin, X., Goudriaan, J., Lantinga, E.A., Vos, J., Spiertz, H.J., 2003. A flexible sigmoid function of determinate growth. *Ann. Bot.* 91, 361–371. <https://doi.org/10.1093/aob/mcg029>



## Conclusión general

Las curvas críticas de dilución de Ca, Mg y S desarrolladas son las primeras reportadas para cultivares del grupo Andigenum. Estas constituyen una herramienta para mejorar el diagnóstico y manejo nutricional de estos elementos que con frecuencia son inadecuadamente manejados. Utilizando las curvas se puede diagnosticar la necesidad del cultivo durante el ciclo productivo a partir de un muestreo de material vegetal. En acumulación y translocación de Ca-Mg-S, los cultivares Diacol Capiro y Pastusa Suprema presentan procesos diferentes y estos dependen de la interacción genotipo x ambiente. Los requerimientos de nutrientes siguieron el orden de Ca>Mg>S, mientras que la traslocación fue S>Mg>Ca. Aun cuando los procesos de acumulación fueron favorecidos por las condiciones de Facatativá, la eficiencia de uso, recuperación y traslocación de nutrientes fue mayor en Chocontá, impactando positivamente el rendimiento en esta localidad. Los índices de cosecha de Ca-Mg-S amplían la información sobre su dinámica de acumulación en el tubérculo, estableciendo que Capiro presenta mayor plasticidad al tener un comportamiento relativamente uniforme entre localidades con condiciones edafoclimáticas contrastantes. Por otra parte, Suprema mostró mayor adaptación a suelos de baja fertilidad y a las condiciones climáticas de Chocontá. Se evidenció una importante correlación entre nutrientes, corroborando su mutua relación durante todo el ciclo productivo. En futuras investigaciones es de interés evaluar rangos más ajustados de dosis de fertilización que abarquen desde moderada deficiencia, hasta exceso de Ca-Mg-S.