



UNIVERSIDAD
NACIONAL
DE COLOMBIA

Impacto de la reducción de cloruros sobre el contenido de nutrientes en el fruto, la productividad y la calidad del café (*Coffea arabica* L. Var Castillo)

Jorge Luís Arteta Vizcaíno

Universidad Nacional de Colombia
Facultad de Ciencias Agropecuarias
Palmira, Colombia

2021

Impacto de la reducción de cloruros sobre el contenido de nutrientes en el fruto, la productividad y la calidad del café (*Coffea arabica* L. Var Castillo)

Jorge Luís Arteta Vizcaíno

Tesis de investigación presentada como requisito parcial para optar al título de:

Magister en Ciencias Agrarias

Director:

MsC., I.A. Víctor Hugo Ramírez Builes

Codirector:

Ph.D., I.A. María Sara Mejía de Tafur

Línea de Investigación:

Fisiología vegetal

Universidad Nacional de Colombia

Facultad de Ciencias Agropecuarias

Palmira, Colombia

2021

A Dios, gracias por tu guía y bendiciones.

A Simón, mi motivación y anhelo de estar juntos.

A mis padres, Jorge y Aminta gracias por su apoyo, ejemplo y ánimo para alcanzar mis logros.

A mis ángeles, familia y amigos, gracias por su apoyo.

Declaración de obra original

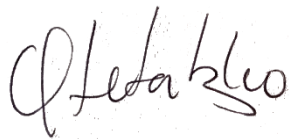
Yo Jorge Luís Arteta Vizcaíno declaro lo siguiente:

He leído el Acuerdo 035 de 2003 del Consejo Académico de la Universidad Nacional. «Reglamento sobre propiedad intelectual» y la Normatividad Nacional relacionada al respeto de los derechos de autor. Esta disertación representa mi trabajo original, excepto donde he reconocido las ideas, las palabras, o materiales de otros autores.

Cuando se han presentado ideas o palabras de otros autores en esta disertación, he realizado su respectivo reconocimiento aplicando correctamente los esquemas de citas y referencias bibliográficas en el estilo requerido.

He obtenido el permiso del autor o editor para incluir cualquier material con derechos de autor (por ejemplo, tablas, figuras, instrumentos de encuesta o grandes porciones de texto).

Por último, he sometido esta disertación a la herramienta de integridad académica, definida por la universidad.



Firma

Fecha 15/Junio/2021

Agradecimientos

En primer lugar, agradezco a Dios que me dio la oportunidad de realizar y culminar mi tesis de investigación.

Muy especialmente quiero agradecer a mis directores Víctor Ramírez y María Sara Mejía por su colaboración, apoyo y orientación en la realización de este estudio, por su experiencia y conocimientos transmitidos fueron de gran ayuda para culminar esta investigación.

Quiero agradecer a la familia Figueroa Cantillo, especialmente Jaime por su valiosa ayuda, por su disposición en la totalidad de su empresa cafetera. Su aporte fue clave en el desarrollo de mi investigación.

Agradezco a Yara por el apoyo, confianza y motivación que me han brindado al realizar mis estudios e investigación de posgrado, y a la Universidad Nacional, por permitirme gozar de sus instalaciones, profesores y herramientas aportando a mi crecimiento profesional.

A Humberto Ramírez, Luis Ricaurte Viveros y Javier Chaves, por el apoyo en el acompañamiento de campo de este trabajo de investigación.

A mis Profesores que me guiaron con su sabiduría y aportaron a la nutrición de mis conocimientos.

A los Jurados, por su tiempo e interés, la revisión y retroalimentación de mi trabajo investigativo

Finalmente agradezco a mi familia, a mis amigos y a mis ángeles por su apoyo constante, comprensión, guía y motivación en la realización de mis estudios profesionales.

Resumen

Impacto de la reducción de Cloruros sobre el contenido de nutrientes en el fruto, la productividad y la calidad del café (*Coffea arabica* L. Var Castillo)

El presente trabajo de investigación se llevó a cabo en una finca de vocación y tradición cafetera llamada Lusitania, ubicada en la vereda El Mesón del municipio de Garzón- Huila, Colombia. Con el objetivo de determinar el efecto de reducir cloruros sobre el contenido de nutrientes en el fruto, la productividad y calidad del cultivo de café a libre exposición solar. Se utilizó un diseño experimental de bloques completos al azar (BCA) con cinco tratamientos y 4 repeticiones, los cuales constaban de la reducción de cloruros (T1= 100%Cl⁻¹; T2= 0%Cl⁻¹; T3= 50%Cl⁻¹; T4= 25%Cl⁻¹; T5= 75 %Cl⁻¹), la investigación tuvo una duración de cuatro años (2017 a 2020). Las variables de respuesta fueron absorción de nutrientes por parte del fruto después de floración hasta cosecha, productividad y calidad física, sensorial de la taza y composición bioquímica de los granos verdes de café antes de ser tostados. Se obtuvo un mayor consumo de K, N, Ca y Mg para el tratamiento 5 (75% Cl), alcanzando al final una mayor concentración de estos elementos. Al igual, se obtuvo mejor respuesta productiva, al combinar las fuentes de potasio con el fin de reducir los cloruros, encontrando que el T5 obtuvo los mejores rendimientos durante los dos años de investigación, demostrando que el mayor incremento en el rendimiento fue influenciado mediante la aplicación de 228 kg.ha⁻¹ de K₂O, 22 S y 129 Cl⁻, teniendo una reducción de 25% de Cloro, respecto al T1. Promoviendo la misma tendencia en la calidad de los granos, al reducir los cloruros, esta vez, para el T2 con 0% de Cl⁻, garantizando un aumento de la rentabilidad gracias a los atributos de calidad física y para los atributos de calidad sensorial el que mejor desempeño final proporcionó en calidad de taza fue el T5 (75% Cl⁻) destacándose como el tratamiento con mejores atributos sensoriales. Esta investigación demostró que el café Arábico cv Castillo, es receptivo a las combinaciones de fuentes

X Impacto de la reducción de Cloruros sobre la productividad y calidad del café (*Coffea arabica* L. cv Castillo)

potásicas, permitiendo reducir aportes de cloruros para su productividad y calidad, condición para resaltar de los cafés suaves colombianos.

Palabras clave: Cloruro, potasio, fertilización, nutrientes minerales, aplicación de fertilizantes, necesidades de nutrientes, rendimiento de cultivos, compuestos bioquímicos, propiedades organolépticas.

Abstract

Impact of chlorine reduction on nutrient content in fruit, productivity and quality of coffee (*Coffea arabica* L. Var Castillo)

This research work was carried out in a traditional property called Lusitania, located in the El Mesón village of the Garzón-Huila municipality, Colombia. In order to determine the effects of different proportions of chlorides on the productivity and quality of the coffee crop (*Coffea arabica* L. var. Castillo) growing on full sunshine conditions. A randomized complete block experimental design (DBCA) was used with five treatments and 4 repetitions, all of which contain different proportions of chlorine (T1 = 100% Cl⁻; T2 = 0% Cl⁻; T3 = 50% Cl⁻; T4 = 25% Cl⁻; T5 = 75% Cl⁻), The trial duration was 3 years from 2017 to 2019. A higher consumption of K, N, Ca and Mg was obtained for treatment 5 (75 % Cl⁻), eventually reaching a higher concentration of these elements. Likewise, obtained a better productive response from the product, when combined potassium fertilizers sources in order to reduce the proportions of chlorides, finding that T5 obtains the best performance during the two consecutive years of harvests, showing that the greatest increase in the performance has been influenced through the application of 228 kg. ha⁻¹ of K₂O, 22 S and 129 Cl⁻, having a 25% reduction of Chlorine. Promoting the same tendency in the quality of the beans, by reducing the proportions of chlorine applied, this time, for T2 with 0% Cl⁻, guaranteeing an increase in profitability thanks to the attributes of physical quality and the attributes of sensory quality. The best performance provided in the quality of the level was T5 (75% Cl⁻), standing out as the treatment with the best sensory attributes. This research showed that cv Castillo Arabic coffee is receptive to combinations of potassium fertilizers sources, allowing the reduction of chloride contributions due to its productivity and quality, a condition to highlight Colombian mild coffees.

Keywords: Potassium chloride, mineral nutrients, fertilizer application, nutritional requirements, crop yield, biochemical compounds, organoleptic properties.

Contenido

	Pág.
Resumen.....	XI
Lista de figuras.....	XVIII
Lista de tablas	XX
Introducción	1
Objetivo general.....	8
Objetivos específicos	8
Hipótesis de investigación	8
1. Efectos de la reducción de cloruro en la nutrición potásica sobre el contenido de nutrientes en el fruto de café.	9
1.1 Introducción.....	9
1.2 Materiales y métodos	13
1.2.1 Localización del estudio	13
1.2.2 Establecimiento del experimento.....	14
1.2.3 Diseño del experimento.....	15
1.2.4 Muestreo de frutos	18
1.2.5 Cuantificación de nutrientes	19
1.3 Resultados y discusión.....	20
1.3.1 Resultados de concentración de N, K, Ca, Mg, S y Cl en frutos de café....	20
1.3.1.1 Concentración de N y K en frutos de café	21
1.3.1.2 Concentración de Ca y Mg en frutos de café.....	23
1.3.1.3 Concentración de S y Cl en frutos de café	25
1.3.2 Resultados de acumulación porcentual de N, K, Ca, Mg, S y Cl en el fruto del café.	26
1.3.2.1 Acumulación de N y K en frutos de café.....	27
1.3.2.2 Acumulación de Calcio y Magnesio en frutos de café.....	28
1.3.2.3 Acumulación de Azufre y Cloro en frutos de café	29
1.3.3 Contenido de N, K, Ca, Mg, S y Cl en el fruto del café.	31
1.3.3.1 Contenido de Nitrógeno y Potasio en frutos de café.....	31
1.3.3.2 Contenido de Calcio y Magnesio en frutos de café.....	33

1.3.3.3	Contenido de Azufre y Cloro en frutos de café.....	34
1.3.4	Contenido de N, K, Ca, Mg, S y Cl por tonelada de café cereza o rojo	36
1.3.4.1	Toma de Nitrógeno y Potasio por frutos de café	36
1.3.4.2	Toma de Calcio y Magnesio en frutos de café	38
1.3.4.3	Toma de Azufre y Cloro en frutos de café.....	40
1.4	Conclusiones	42
Referencias Bibliográficas		Error! Bookmark not defined.
2.	CAPITULO II	45
Efecto de la reducción de cloruros sobre la productividad del café (<i>Coffea arabica</i>		
L. Var. Castillo).....		45
3.	Introducción.....	46
4.	Materiales y métodos	49
4.1.1	Área de estudio.....	49
4.1.2	Material vegetal	50
4.1.3	Variables meteorológicas e incidencia en los tratamientos	50
4.1.4	Muestreo de productividad.....	51
4.1.5	Diseño experimental	52
4.1.6	Análisis de datos.....	55
5.	Resultados y discusión.....	56
5.1	Resultado de la reducción de cloruros en la productividad del cultivo de café ..	56
5.1.1	Producción acumulada de café de los años 2018 y 2019	56
5.1.2	Productividad de café en los años 2018 y 2019.....	59
5.1.3	Productividad por hectárea de café rojo o cereza	61
6.	Conclusiones	63
7.	CAPITULO III	65
Efecto de la reducción de cloruros sobre la calidad del café (<i>Coffea arabica</i> L.)....		65
8.	Introducción.....	66
9.	Materiales y métodos	72
9.1.1	Descripción de las muestras	72
9.1.2	Análisis calidad física de granos	73
9.1.3	Tostado del café	74
9.1.4	Determinación del contenido de humedad y actividad del agua en café verde	75
9.1.5	Descripción análisis bioquímicos	75
9.1.6	Análisis de Brix en cerezas de café	76
9.1.7	Análisis sensoriales	76
9.1.8	Análisis de datos.....	78
10.	Resultados y discusión.....	79

10.1	Impacto de la reducción de cloruro en la calidad del café.....	79
10.1.1	Efecto de reducción de cloruros en el contenido total de azúcares y lípidos en los granos de café	79
10.1.2	Efecto de la reducción de cloruros en el contenido de cafeína de granos de café	82
10.1.3	Efecto de la reducción de cloruros en el contenido de ° Brix de café cereza o rojo	83
10.1.4	Efecto de la reducción de cloruros sobre el balance, cuerpo, acidez y fragancia, como atributos sensoriales de tazas de café.....	85
10.1.5	Efecto de reducción de cloruros en la puntuación SCAA como calidad de taza de café	86
10.1.6	Efecto de la reducción de cloruros en la calidad física de los granos de café	87
11.	Conclusiones	90
12.	Conclusiones y recomendaciones generales	91
12.1	Conclusiones.....	91
12.2	Recomendaciones.....	92
	Referencias Bibliográficas	93

Lista de figuras

	Pág.
Figura 1-1. Distribución de los tratamientos en campo para la evaluación de las fuentes alternativas de potasio en <i>C. arabica</i> L. cv Castillo	16
Figura 1-2. Influencia de los tratamientos evaluados en relación a la concentración de nutrientes sobre las cerezas de café (<i>C.arabica</i> L. cv Castillo)	21
Figura 1-3. Influencia de los tratamientos evaluados en relación al porcentaje de absorción de nutrientes sobre las cerezas de café (<i>C.arabica</i> L. cv Castillo)	26
Figura 1-4. Influencia de los tratamientos evaluados en relación al consumo de nutrientes sobre las cerezas de café durante el desarrollo del fruto (<i>C.arabica</i> L. cv Castillo)	31
Figura 1-5. Influencia de los tratamientos evaluados en relación a la toma de nutrientes por tonelada sobre las cerezas de café al momento de la cosecha (<i>C.arabica</i> L. cv Castillo).....	37
Figura 2-1. Influencia de proporciones de cloruros en la Productividad de café (<i>C.arabica</i> L. cv Castillo): Cosecha 2018-2019.....	57
Figura 2-2. Respuesta de proporciones de cloruros sobre el rendimiento de cerezas de <i>C. arabica</i> cv Castillo durante los años 2018 y 2019.....	60
Figura 2-3. Influencia de las concentraciones de cloruros en la productividad de <i>C. arabica</i> cv Castillo durante los dos primeros años productivos	61
Figura 3-1. Diagrama	73
Figura 3-2. Proceso de medición Brix en cereza	76
Figura 3-3. Efecto de proporciones de cloruros en el contenido de glucosa y lípidos año 2018.....	79
Figura 3-4. Efecto de proporciones de cloruros en el contenido de cafeína año 2018....	82
Figura 3-5. Contenido de °Brix en frutos maduros de café (2018) sometidos a diferentes proporciones de aplicaciones de cloruros	84

Figura 3-6. Influencia de aportes de Cloruro en Atributos sensoriales del café: Balance, Cuerpo, Acidez y Fragancia	85
Figura 3-7. Influencia de aportes de Cloruro en la Calidad de Taza del café	86
Figura 3-8. Influencia de aportes de Cloruro en Calidad física de granos de café: Densidad, Factor, Merma, % granos en malla 16+17+18	87

Lista de tablas

	Pág.
Tabla 1-1. Condiciones climáticas Estación Experimental Jorge Villamil (Gigante, Huila)	13
Tabla 1-2. Resultados del análisis de suelos Finca Lusitania – 2017.....	14
Tabla 1-3. Resultados Físicos de suelos Finca Lusitania – 2017.....	14
Tabla 1-4. Descripción de los tratamientos y aportes de cloruro y sulfato por tratamiento y por año	17
Tabla 1-5. Fecha de aplicación de cloruros	17
Tabla 1-6. Aplicación de productos de fertilizante.....	17
Tabla 1-7. Descripción del aporte nutricional durante el periodo del estudio.....	18
Tabla 1-8. Resultados del análisis de varianza (Valor de Probabilidad) para la variable concentración de nutrientes en los frutos después de la floración.....	36
Tabla 1-9. Resultados del análisis de varianza (Valor de Probabilidad) para la variable absorción de nutrientes.....	41
Tabla 1-10. Asimilación de nutrientes (kg.ha-1) en función de los tratamientos evaluados a 240 ddf - días después de floración	41
Tabla 2-1. Características de la disponibilidad de energía radiante y térmica en Garzón-Huila, Colombia.....	51
Tabla 2-2. Precipitaciones periodo de estudio 2017-2018-2019 Finca Lusitania.....	51
Tabla 2-3. Variables de productividad.....	52
Tabla 2-4. Descripción de los tratamientos y aportes de cloruro y sulfato por tratamiento y por año	53
Tabla 2-5. Aplicación de cloruros según fecha de aplicación	53
Tabla 2-6. Aplicación de productos de fertilizante en épocas del año	54

Tabla 2-7. Descripción del aporte nutricional durante el periodo del estudio	55
Tabla 2-8. Resultados del análisis de varianza para la variable rendimiento.....	62
Tabla 3-1. Estándares de metodologías para variables de calidad físicas de granos de café	74
Tabla 3-2. Metodologías analíticas para variables de calidad bioquímica de granos de café	75
Tabla 3-3. Escala para la calificación y descripción de la calidad de la bebida de café ..	77
Tabla 3-4. Resultados del análisis de varianza (Valor de Probabilidad) la composición bioquímica en granos verdes antes de ser tostados.....	83
Tabla 3-5. Resultados del análisis de varianza (Valor de Probabilidad) la composición de azúcares en cerezas maduras a los 240 días después de floración	84
Tabla 3-6. Resultados del análisis de varianza (Valor de Probabilidad) para algunos atributos de la taza del café “calidad de Taza”	86
Tabla 3-7. Resultados del análisis de varianza (Valor de Probabilidad) para la calidad física del grano de café.	89

Introducción

El café es un cultivo comercial muy importante cultivado en aproximadamente 50 países en vía de desarrollo alrededor del mundo. Millones de personas dependen directa o indirectamente de la producción y venta de café para su supervivencia e ingresos en general (Dubberstein *et al.*, 2016). En términos de la producción de café a nivel mundial, en años recientes, no se han observado incrementos significativos (ICO, 2019); no obstante, cabe anotar que entre los principales obstáculos relacionados con el manejo que dificultan la alta productividad, está la nutrición mineral, debido a que las plantas de café requieren abundantes nutrientes para su formación de frutos y crecimiento vegetativo (Laviola *et al.*, 2007), además de iniciar nuevamente con un nuevo ciclo productivo, teniendo constantemente formación y llenado de frutos, esto debido a las condiciones agroclimáticas en Colombia (Ramírez, 2014).

Dentro de las especies de mayor importancia económica entre el género *Coffea*, son las *Coffea arabica* y *Coffea canephora*, el cual incluye más de 120 especies (Davis *et al.*, 2011). Respecto al café en Colombia, se cultiva solamente la especie *Coffea arabica* L., en fincas ubicadas en zonas cafeteras de los departamentos de Antioquia, Boyacá, Bolívar, Caldas, Caquetá, Casanare, Cauca, Chocó, Cesar, Cundinamarca, La Guajira, Huila, Magdalena, Meta, Nariño, Norte de Santander, Quindío, Risaralda, Santander, Tolima y Valle, donde se presentan características apropiadas de clima, suelos y altitud, así como condiciones técnicas y aspectos culturales particulares en cada región, para la producción de café (Puerta *et al.*, 2016).

Sin embargo, merece la pena subrayar que es en el departamento del Huila donde se produce el mayor volumen de grano de café en Colombia, departamento que cuenta con un 16.73% del área cultivada, seguido por Antioquia con 13.79% y Tolima con 12.70% (Ciguenza, 2019). Conviene especificar que la producción colombiana en el año cafetero 2018/19 se mantuvo estable con un volumen de 13.9 millones sacos; 0,4% más que la

2 Impacto de la reducción de Cloruros sobre el contenido de nutrientes en el fruto, la productividad y calidad del café (*Coffea arabica* L. Var Castillo)

producción del año cafetero anterior. Así, las exportaciones de café ocurridas en el periodo 2018/2019 aumentaron 6.3% y su exportación fue de 13.5 millones de sacos frente a los 12.7 millones de sacos del año 2017 (FNC, 2019) y cerrando el año 2019 con cifra que supera todos los registros hasta el año 1992. Además de tener un crecimiento en la productividad, se tuvo un aporte del 9,5% del PIB del 2019 comparado con el año anterior, siendo la actividad de mayor crecimiento en la agricultura, ganadería, caza, silvicultura y pesca (DANE, 2020).

Continuamente se realizan esfuerzos para aumentar los aportes de la producción de sacos de café a la economía del país, reuniendo esfuerzos de sector público y privado, nacionales e internacionales con el fin de poder aumentar al aporte de la economía y también poder entregar sin lugar a duda, los mejores cafés de calidad, momento para abrir condiciones de manejo del cultivo para lograr estos objetivos que se requieren: Aumentar productividad y mejorar calidad. Particularmente en Colombia, los agricultores deben corregir la acidez del suelo y suplir los requerimientos de nitrógeno, fósforo y potasio de sus cultivos, y la mejor manera de hacerlo es a través de fertilizantes minerales. Por esta razón, estos productos son de alta demanda en el país. El cloruro de potasio (KCl) es, por lejos, el más vital de los minerales salinos que contienen potasio, siendo la principal fuente mineral del potasio que se consume en la agricultura mundial debido en gran parte al papel preponderante que cumple el potasio en las plantas (Anschütz *et al.*, 2014), acompañado a su vez del ion cloro (IPNI 1996).

El Cloro (Cl^-), se considera un micronutriente esencial para las plantas y es requerido en bajas concentraciones, por tal razón se considera micronutriente, sin embargo, según Kyrkby *et al.*, (2007) es normal que sea encontrado en concentraciones altas en los tejidos vegetales, incluso similares a los encontrados por los macronutrientes. Existe suficiente evidencia que demuestra que; el Cl^- es necesario en las plantas por su positiva respuesta en un amplio rango de cultivos (Von Uexkull 1996). Dentro las funciones esenciales y más conocida del Cl^- en las plantas se encuentra la participación de este elemento en el proceso de fotosíntesis, pues es requerido para la fotólisis del agua en el sitio de oxidación del fotosistema II, además que se ve involucrado en la regulación estomática, en donde le sirve como anión acompañante al potasio en la entrada y salida de las células guardadas. (Rodríguez *et al.*, 2004). Von Uexkull (1996), menciona que, la concentración requerida de Cl^- en las plantas durante la fotosíntesis puede variar por un factor diferencial de hasta 25

entre especies diferentes. Otras de las funciones principales del Cl^- es la activación enzimática, donde se activan por lo menos tres enzimas tales como; amilasa, ATPasa y la síntesis de asparagina, la regulación de procesos osmóticos también es otra función, la cual actúa como contra- ion en el transporte de cationes, en el ajuste osmótico, en la actividad de estomas y en el movimiento de hojas según experiencias realizadas por Fixen, en 1993, citado por Garcia (2006).

Así como las funciones esenciales, el Cl^- también presenta funciones benéficas en el crecimiento de las plantas, a la resistencia al estrés y enfermedades, entre ellas las funciones osmóticas que se da gracias a la habilidad que tiene el Cl^- para transportarse a través de las membranas celulares y en combinación con una relativa baja reactividad bioquímica, logra que el Cl^- sea apropiado en forma de soluto en la osmosis vegetal; la actividad de los estomas también es un función benéfica del Cl^- , lo cual participa en el intercambio de gases que es una precondition para que se dé la fotosíntesis. (Von Uexkull 1996).

Diferentes estudios realizados comprueban que el Cl^- como fertilizante favorece en gran medida al crecimiento de cierto cultivos, por ejemplo los estudios realizados por Fixen et al, (1986) demostraron el aumento de rendimientos y esto se debieron al Cl^- en el fertilizante, varias investigaciones demuestran que este fertilizante aplicado en forma de KCl , mejora la productividad de grano en cultivos de trigo y así mismo otros cultivos en grandes regiones de EE.UU Alabama 2004, por otra parte se descubrió que el fertilizante cloruro podría remover mejores condiciones de crecimiento vegetativo produciendo un mayor número del fruto en cultivos de trigo (Chen et al., 2010). Las investigaciones acerca de los efectos del Cl^- también hacen referencia a las enfermedades que este elemento evita en los cultivos. El Cl^- tiene el poder de eliminar los daños que producen las enfermedades foliares y radiculares en alrededor de 10 cultivos diferentes. (Christensen et al., 1990), para Bergmann W. (1992), los síntomas más distintivos en la deficiencia de Cl^- que se conocen son: la caída de hojas, enrollamiento de los filíolos, bronceamiento y clorosis. Sin embargo, desde inicios de la década de 1970, se cuenta con suficiente evidencia y estudios que señalan la respuesta al Cl^- en un amplio número de cultivos, en diferentes condiciones de clima y suelo. (Von Uexkull, H. R. 1996). El Instituto de Recursos Naturales y Agrobiología de Sevilla España realizó un estudio reciente, donde se confirma

4 Impacto de la reducción de Cloruros sobre el contenido de nutrientes en el fruto, la productividad y calidad del café (*Coffea arabica* L. Var Castillo)

que, la fertilización con cloruro puede llegar a ser una buena estrategia para la reducción de consumo de agua y resistente a las sequías de los cultivos hortícolas.

Las Principales fuentes de Fertilizantes con Cloruros son:

- **Cloruro de Potasio (KCl):** Es la fuente más común de fertilización con potasio (Gonçalves *et al.*, 2018). La Potasa es el nombre común que se da a un grupo de minerales que contienen potasio (K^+). El tipo más común de potasa es el cloruro de potasio (KCl). El cloruro de potasio (KCl) se conoce comúnmente como Muriato de Potasio (MOP) y se utiliza en tres aplicaciones principales a saber: *i)* como fertilizante (~93% de la demanda total de cloruro de potasio); *ii)* como aplicación directa en campos o como mezcla a granel con otros productos fertilizantes nitrogenados y fosfatados; *iii)* como materia prima para otros fertilizantes que incluyen sulfato de potasio- SOP (a través del "*proceso Mannheim*", ya que el KCl reacciona con el ácido sulfúrico, originando múltiples reacciones endotérmicas y exotérmicas hasta obtener sulfato de potasio) (UPME, 2018).
- **Cloruro de Calcio:** Fisiológicamente, el calcio es un nutriente esencial para las plantas y como catión divalente, Ca^{2+} , es requerido para roles estructurales en las paredes y membranas celulares. White *et al.*, (2003) sostiene que: el calcio también juega un papel como mensajero secundario en concordancia con numerosos tipos de estrés ambientales. Dentro de la planta, el calcio tiene las siguientes funciones: *i)* Actúa como elemento estructural de la planta, colaborando en la rigidez de la planta y en la defensa contra patógenos y fitotoxidades. *ii)* Actúa como elemento catalizador de muchas reacciones hormonales, por lo que al final del proceso influye en la calidad y la producción. Agricultura: Revista agropecuaria y ganadera (2017). El movimiento de este elemento en las plantas se presenta exclusivamente mediante la corriente xilemática desde las raíces hacia órganos como las hojas y frutos. (Marschner, 1986).
- **Cloruro de Magnesio:** Es usado comúnmente de forma líquida por su alta solubilidad, presentada en 560 g.L^{-1} (IPNI, 2010). Cakmak y Yazici (2015) afirman que el Mg tiene varias funciones claves en las plantas, entre ellos podemos citar: *i)* Fotofosforilización (Formación de ATP en los cloroplastos, adenosin Trifosfato,

principal reserva de energía en las plantas), *ii*) Fijación de Bioxido de Carbono CO₂ durante la fotosíntesis, *iii*) Síntesis de proteínas, *iiii*) Formación de clorofila, *iiiii*) Transporte del floema (savia elaborada), *iiiii*) Particionamiento y utilización de fotoasimilados y 7) Foto-oxidación en las hojas.

Y, como fuentes principales de Fertilizantes Potásicos se encuentran:

- **Cloruro de Potasio (KCl):** Descrito anteriormente.
- **Sulfato de Potasio (K₂SO₄):** Se utiliza casi totalmente como fertilizante, con una demanda mundial estimada en 6.6 Mt del producto en 2017 (UPME, 2018). Esto hace que el SOP sea el segundo mayor compuesto que contiene potasio por tonelaje en el mundo, después del KCl. Comparado con el KCl, tiene un precio muy alto, y, por lo tanto, sólo se selecciona cuando existe la necesidad de evitar añadir cloruro al suelo (UPME, 2018).
- **Nitrato de Potasio (KNO₃):** Se consume en menor grado en la agricultura que el KCl o el SOP, y tiene que justificar su precio sobre los otros fertilizantes potásicos. Uno de sus puntos fuertes es su excelente solubilidad, lo que significa que es ampliamente utilizado como fertilizante soluble en sistemas de micro irrigación. El nitrato de potasio también se utiliza como fertilizante de campo en cultivos sensibles al cloruro, similar al SOP (UPME, 2018).

Como la mayoría de Cloruro es aplicado en cultivos como ion acompañante de la fuente KCl, los efectos del Cl⁻ se pueden ver ocultos por el K⁺ (Von Uexkull, H. R. 1996) En diferentes estudios realizados en Costa Rica (Ramírez *et al.*, 2002), En Brasil (Lima *et al.*, 2003; Laviola *et al.*, 2006), y Colombia (Sadeghian *et al.*, 2013) demuestra la evidente demanda del cultivo de café de la especie *C. arabica* L. al nutriente potasio, además de ser requerido y acumulado en grandes cantidades por las plantas de café, su estrecha relación en la producción del café se atribuye a la activación enzimática de diversos procesos metabólicos que ocurren en las plantas como la fotosíntesis, la síntesis de carbohidratos y proteínas y el mantenimiento de la turgencia celular (Malavolta, 2006, Gonçalves *et al.*, 2018). En las plantas, el Potasio es el catión con mayor abundancia en el citosol, razón por la cual se le atribuye la función principal como osmorregulador,

6 Impacto de la reducción de Cloruros sobre el contenido de nutrientes en el fruto, la productividad y calidad del café (*Coffea arabica* L. Var Castillo)

destacándose en la relación Planta – Agua (Hsiao et al., 1986), también regulando el pH (entre 7 y 8) para lograr reacciones enzimáticas eficientes (Marschner *et al.*, 1996), como la velocidad de las reacciones catalíticas (Evans *et al.*, 1971), la transformación de glucosa a almidón (Nitsos *et al.*, 1969), el aumento de la enzima de oxidación: Polifenol Oxidasa (Darley *et al.*, 1998), eficiencia de transporte de solutos por el Floema (Marschner *et al.*, 1996), tolerancia contra estrés bióticos (Prabhu *et al.*, 2007) y abióticos (Cakmak, 2005; Sen Gupta *et al.*, 1989).

El papel clave del potasio como fertilizante está relacionado con el metabolismo de las plantas, puesto que ayuda a mejorar la fotosíntesis, la función de las enzimas y el transporte de azúcar, proteínas y almidón. Otras funciones adicionales incluyen la formación de celulosa, la translocación de micronutrientes como el zinc y el hierro, el aumento de la tolerancia a la sequía y a las enfermedades de los cultivos, la mejora de la eficiencia hídrica y el aumento del crecimiento de las raíces (UPME, 2018).

Entre los rubros que componen los costos de producción total del cultivo de café, tiene especial relevancia el componente de los fertilizantes, debido a su importancia para el adecuado desarrollo de los cultivos y su mayor precio relativo frente a otros insumos; precio que presenta altas fluctuaciones y termina traducándose en una alta competitividad del sector agropecuario y en una afectación sustancial en el ingreso de los productores (CONPES, 2009). Colombia importa cerca del 75% de sus fertilizantes potásicos, principalmente en forma de cloruro de potasio (KCl) (CONPES, 2009); entre 2008 y 2018, la demanda mundial de cloruro de potasio creció un 32%, alcanzando un máximo de 66.6 Mt en 2018 (UPME, 2018).

El sulfato de potasio y el cloruro de potasio difieren en sus efectos sobre las plantas en dos formas a saber: *i*) el anión que acompaña al catión esencial (K^+) tiene efectos preponderantes sobre la forma en que los cationes se comportan y también afectan directamente el metabolismo de las plantas; *ii*) algunas plantas son sensibles al cloruro; *iii*) el azufre en el sulfato de potasio es en sí mismo un nutriente esencial importante constituyente de proteínas (IPI, 1981). Estos iones acompañantes de los fertilizantes potásicos presentan reacciones positivas o negativas dependiendo de las especies y/o etapas fenológicas de los cultivos, sobre todo la alta concentración de índices salinos. Sadeghian *et al.*, (2015), demostró el efecto negativo de la salinidad en el crecimiento de

plantas de café, disminuyendo su peso, vigor, hasta el punto de su muerte. En Tomate se afecta el proceso de germinación, tallos, hojas y frutos con menor desarrollo (Goykovic *et al.*, 2007), además el aguacate presenta correlación negativa con aportes de Cl^- y Na^+ , reflejándose la disminución del vigor en el portainjerto Antillano-1, el cual no presenta tolerancia a los cloruros (Díaz *et al.*, 1984). Por tal motivo, cuando se realizan aportes óptimos para café en producción de 250 y 350 kg de $\text{K}_2\text{O} \cdot \text{ha}^{-1}$, se estaría aplicando entre 115 y 161 kg de $\text{Cl}^- \cdot \text{ha}^{-1}$, cuando se emplea KCl como fuente de K^+ , quedando en duda los efectos que puedan traer dichas dosis de Cl^- sobre las plantas de café, su calidad, productividad y fertilidad del suelo. López (1967) encontró toxicidad de Cl^- inducida en plantas de café a causa de fertilizaciones aplicadas al cultivo con altas dosis de KCl; un nivel mayor a 2.000 ppm de Cl^- en los cuartos pares de las hojas de café puede ser tomado tentativamente como la máxima concentración tolerada por el café, es decir, que arriba de esta concentración existe una toxicidad manifiesta a este elemento, lo cual se conoce comúnmente como quemaduras de las hojas ("leaf scorch") (Vinecky *et al.*, 2017).

En virtud de lo anterior, la presente investigación evaluó el efecto de aplicar dichas dosis de cloro, sobre la dinámica de absorción de nutrientes en el fruto de café, sobre compuestos bioquímicos indicadores de buena calidad de taza, sobre la calidad de taza misma y sobre la productividad en un periodo de 3 años 2 cosechas, y basado en los resultados ofrecer recomendaciones que permitan ajustar las prácticas de fertilización potásica en el cultivo del café, tomando como referencia las aplicaciones llevadas a cabo en la finca Lusitania, ubicada en la vereda El Mesón del municipio de Garzón- Huila, Colombia. De esta manera, la presente tesis de maestría se encuentra enmarcada y estructurada en tres capítulos, Los cuales muestran resultados de la investigación sobre el efecto de la reducción de cloruros sobre la dinámica de los contenidos de nutrientes en el fruto del café, en diferentes etapas de su desarrollo hasta la cosecha, sobre la productividad y la calidad.

Objetivo general

Determinar el efecto de la reducción de cloruros en la fertilización edáfica sobre el contenido de nutrientes en el fruto, la productividad y la calidad del café (*Coffea arabica* L. Var. Castillo) a libre exposición.

Objetivos específicos

- Determinar la influencia de la reducción de cloruros sobre el contenido del Nitrógeno, Potasio, Calcio, Magnesio, Azufre y Cloro en el fruto del café.
- Establecer el efecto de la reducción de cloruros aplicados sobre el peso de los frutos de café y la productividad en los años 2018 y 2019 del cultivo de café.
- Determinar el efecto de la reducción de cloruros sobre la calidad física, azúcares, lípidos, cafeína y calidad sensorial de frutos de café.

Hipótesis de investigación

La reducción del cloro en las fuentes de fertilizantes potásicas, incrementan el rendimiento y la calidad del café, cambian el patrón de absorción de macronutrientes por parte del fruto e influye directamente en la composición de compuestos bioquímicos que definen aspectos de calidad de taza en el café

1.Efectos de la reducción de cloruro en la nutrición potásica sobre el contenido de nutrientes en el fruto de café.

1.1 Introducción

El gradiente de concentración de Cl^- en la planta es menos pronunciado que la de los otros aniones y termina afectando tanto las propiedades físicas como químicas del suelo (IPI, 1981). Por tanto, determinar la selección de la fuente de potasio para usar en los cultivos, es igual de importante que establecer las cantidades a aplicar, debido a que dicho elemento se obtiene de fuentes naturales y viene con otros elementos acompañantes (IPI, 1981). En el futuro, probablemente se requerirá realizar aportes con mayores valores de bases como magnesio, calcio y azufre (Como iones acompañantes del Potasio), por la exigencia de extracción del cultivo y las disminuciones de estos cationes en los suelos ácidos donde se encuentra sembrado la mayoría del café colombiano. Villegas et al (2020) mencionaron al cloruro como el agente osmótico preferido por las plantas, puesto que, en comparación con el nitrato o el malato, este no es asimilado y determina un potencial osmótico más negativo y mayor turgencia. Es por ello que, si el cloruro se encuentra disponible en el suelo, las plantas lo toman activamente y lo acumulan en la vacuola más eficazmente que otros osmolitos.

El potasio (K^+) en un fertilizante con una gama completa de posibles fuentes e iones acompañantes, existe como una sal neutra, ácida o alcalina en la que el catión K^+ se combina con un anión como sigue: NO_3^- , Cl^- , HCO_3^- , SO_4^{2-} , CO_3^{2-} , o con aniones que contienen P (por ejemplo, H_2PO_4^- , HPO_4^{2-} , PO_4^{3-}) (IPI, 1981; Johnston *et al.*, 2013). Estas sales ingresan a la solución del suelo cuando se aplica el fertilizante y, cuando las plantas asimilan el ion K^+ , deben tomar adicionalmente un anión para mantener la neutralidad

eléctrica. Los aniones que contienen S, P o N, se incorporan en gran medida en el material vegetal, perdiendo así su forma iónica, aunque el Cl⁻ permanece en la forma iónica.

Debido a que el KCl es una sal muy soluble en agua, su aplicación puede aumentar la absorción de otros cationes como Ca⁺² y Mg⁺², debido a que tiende a presentarse una mayor concentración del ion Cl⁻, pero que también se demuestra el antagonismo con respecto a los nitratos en su absorción (Rosales *et al.*, 2020), sin embargo, después de que ocurre inexorablemente la lixiviación de este anión, la alta concentración de K⁺ en el suelo puede llevar a la reducción en la absorción de otros cationes por parte de las plantas de café (Jakobsen, 1993; Clement *et al.*, 2015). Además, la aplicación de sales potásicas con alta solubilidad trae consigo un riesgo de que se incrementen las pérdidas por lixiviación (Duarte *et al.*, 2013; Alves *et al.*, 2016).

Anschütz *et al.*, (2014), argumentan que el potasio (K⁺) es el segundo nutriente mineral más abundante en las plantas y es responsable entre el 2% y 10% del peso seco de la planta. Es esencial para el crecimiento de las plantas y, en consecuencia, para la producción de cultivos, no solo del café. La esencialidad del potasio está relacionada con su papel clave como un osmótico inorgánico importante y su impacto en el movimiento de las hojas, la apertura y el cierre de estomas, el crecimiento axial y los tropismos (Marschner, 1995; Shabala, 2003; Anschütz *et al.*, 2014), además de la síntesis de almidones y balance de cargas iónicas (Maathuis *et al.*, 1994). El potasio también es esencial como un contraión para el equilibrio de carga del transporte de iones a través de las membranas de plasma e intra-orgánulos (Dreyer *et al.*, 2011; Shabala, 2003; Anschütz *et al.*, 2014). Adicionalmente a lo mencionado anteriormente, la disponibilidad del potasio (K⁺) es crítica para controlar el proceso de carga de foto-asimilados en el floema (Ache *et al.*, 2001; Gajdanowicz *et al.*, 2011; Anschütz *et al.*, 2014) y, por último, pero no menos importante, existen más de 70 enzimas cuya actividad demuestra ser muy sensible al K⁺ (Marschner, 1995; Anschütz *et al.*, 2014). El potasio es también llamado el ion "*preferido por la planta*" para mantener el contenido de agua y, por lo tanto, la rigidez de cada célula, un papel biofísico que ayuda a la planta a evitar que pierda hidratación (Sopib, 2014; Dawid y Hailu, 2018).

Kant y Kafkafi (Sin Fecha), manifiestan que los tejidos de las plantas varían altamente en las concentraciones de K⁺, detallando que frutos carnosos y hojas en etapas tempranas de

desarrollo tienden a absorber altos contenidos de este elemento para lograr una concentración ideal, además, que si llegase a ocurrir una disminución de la absorción de potasio en órganos fructíferos, se reduce inmediatamente la actividad fotosintética lo cual significa una menor productividad y calidad de frutos, “las exigencias de K^+ de los órganos reproductivos pueden ser tan altos que den lugar a deficiencias foliares de K^+ ”.

De acuerdo con Malavolta (1986) una buena correlación entre el estatus de K^+ , puede ser medido por el contenido de la hoja, el almidón acumulado y el rendimiento del cultivo. Cuando el contenido de K^+ es el adecuado en chupones, yemas y ramas, los síntomas de deficiencia, disminuyen significativamente. No obstante, Flores *et al.*, (2016) argumenta que el potasio no cumple un papel estructural en las plantas; sin embargo, es un importante activador enzimático y está vinculado con el cloro para el papel de la regulación osmótica en plantas, controlando la apertura y cierre de estomas (Flores *et al.*, 2016).

Una vez absorbido el K^+ por la planta, dentro de esta es muy móvil este nutriente, movilizándose por el xilema y floema hacia los tejidos demandantes, principalmente por los meristemos de las plantas (Ben- Zioni *et al.*, 1971) y presentándose en las más altas cantidades por parte de todos los cationes en el Floema (Hocking, 1980). La absorción nutricional del potasio se manifiesta por la toma de este elemento principalmente por las raíces, realizando esta actividad por el proceso de difusión y permitiendo la eficiencia de captura por concentraciones y movilidad en el suelo de este elemento (Benavides, A. 2011). Asher *et al.*, 1967 reportaron la alta respuesta de las especies vegetales probadas a los aumentos en las concentraciones de las soluciones de potasio, además se considera que las plantas realizan ajustes positivos en su crecimiento, reparto selectivo de biomasa, composición mineral y bioquímica de sus tejidos, dependiendo de la eficiencia de nutrientes minerales (Bassirad, H. 2000).

La cantidad de nutrientes que requieren las plantas de café puede variar según factores como la precipitación y su distribución, las especies y la cantidad de otras plantas cultivadas en asociación con el cultivo del café; la variación estacional, la topografía, el tipo de suelo, la productividad del cultivo y las prácticas culturales predominantes, son algunas estimaciones de los nutrientes requeridos por el cultivo del café, las cuales siempre se basarán en el respectivo análisis de suelo y tejidos vegetales (Paulos, 1986; FAO, 2000; Dawid *et al.*, 2018). El café tiene una demanda muy alta de nutrientes y absorbe grandes

cantidades del suelo, a partir de los 12 meses de edad, Sedeghian (2008), recomienda aplicar para suelos de baja fertilidad las siguientes cantidades de nutrientes: 300 kg de N, 60 kg de P_2O_5 , 300 kg de K_2O , 60 kg de MgO, y para el caso del Calcio realizar dos encalados al año aportando 1.400 kg de Ca. Sin embargo, se estima tener mejores resultados en cuanto a productividad y calidad realizando aportes de 1:1,5 con relación a N:K (Clemente *et al.*, 2015). Para Riaño *et al.*, 2004 el café requiere en promedio durante su ciclo productivo (duración de más de 2.000 días después de la siembra) 140 kg/ha de N, 13 kg/ha de P, 130 kg/ha de K, 60 kg/ha de Ca y entre 15 a 30 kg/ha de Mg, determinando diferencia en las necesidades de extracción de los nutrientes según su etapa de crecimiento. También se requieren nutrientes adicionales para el crecimiento, y se ha estimado que una hectárea de crecimiento rápido el café de alto rendimiento demanda un total anual de aproximadamente 135 kg de N, 34 kg de P_2O_5 y 145 kg de K_2O (Dawid y Hailu, 2018), con una alta concentración de macronutrientes en la fruta al inicio y posteriormente con una disminución (Dubberstein *et al.*, 2016).

Ramírez *et al.*, (2002) encontró en promedio un aumento del 40% de la extracción del N, P, K, Ca, Mg, S a los 90 días después de floración (ddf), y el Potasio a diferencia de los demás nutrientes solo se consumió el 50% hasta los 90 ddf, fortaleciendo la diferenciación en los requerimientos del potasio en diferentes etapas fenológicas de la formación del fruto, además de variaciones de concentraciones de otros elementos según la etapa en la que se encuentre el crecimiento del fruto (Ramírez *et al.*, 2002) y su variación con la productividad (Laviola *et al.*, 2007). Dawid *et al.*, (2018) encontraron que el requerimiento de potasio es alto durante el desarrollo de las cerezas de café, ocurriendo un aumento inmediato después de la floración y presenta un segundo pico justo antes de la maduración del fruto, comprobando la importancia de realizar un programa de fertilización acorde con los aportes de las cantidades de potasio necesarios y las fuentes de potasio en las cuales la planta realizará la absorción junto con los iones acompañantes de este elemento.

El efecto de la reducción de Cloruros en la aplicación de fertilizantes potásicos, trae consigo cambios en el patrón de absorción de nutrientes y diferencias de requerimiento según su etapa fisiológica, órgano de la planta y etapa del crecimiento del órgano, para lograr tener la respuesta de la absorción de los principales nutrientes de las plantas: N, P, K, Ca, Mg, por lo tanto es necesario conocer en detalle el efecto que puede tener la

reducción del cloro como ion acompañante del potasio, en la absorción, desplazamiento, distribución y concentración de nutrientes al interior del crecimiento del fruto del café.

1.2 Materiales y métodos

El estudio fue llevado a cabo en una plantación de café, ubicada en la finca Lusitania, finca de vocación cafetera localizada en el corregimiento de El Mesón perteneciente al municipio de Garzón- Huila. La presente investigación tuvo una duración de dos años, iniciando en el mes de enero del 2017 hasta enero de 2019.

1.2.1 Localización del estudio

El trabajo de investigación se efectuó en La Finca Lusitania, vereda El Mesón en el municipio de Garzón (Huila), ubicada a 02°10'49'' Latitud Norte, 75°35'99'' Longitud Oeste a 1.437 m de elevación, sobre la cordillera oriental, vertiente occidental.

Se presentan suelos predominantemente de materiales ígneos consolidados, de naturaleza principalmente granítica, por estar ubicado en la vertiente Occidental de la cordillera Oriental, predominando gneis margoso - muscovítico, suelos francos y franco - arcillosos - cascajosos, de media profundidad efectiva, media a baja fertilidad natural, topografía abrupta, pendientes superiores al 75% y altamente susceptibles a la erosión pertenecientes al ecotopo 318a (Gómez et al., 1991).

Las condiciones climáticas en la estación Jorge Villamil (Gigante, Huila) promedio durante el desarrollo del estudio fueron los siguientes:

Tabla 1-1. Condiciones climáticas Estación Experimental Jorge Villamil (Gigante, Huila)

Año	T° Med (°C)	T. Max. (°C)	T. Mín (°C)	HR (%)	Brillo Solar (hrs/mes)	Precipitación (mm/año)
2017	20,2	20,8	19,3	77,1	95,5	1575
2018	20,6	20,3	19,9	72,6	77,1	1234
2019					97	1426

Las características físicas y de fertilidad del suelo de la finca Lusitania al momento de iniciar el trabajo de investigación es la siguiente:

Tabla 1-2. Resultados del análisis de suelos Finca Lusitania – 2017

Parámetro	Unidad	Resultado
M.O	%	3,08
pH		4,71
P	mg/kg	11
K	cmolc/kg	0,32
Mg	cmolc/kg	0,43
Ca	cmolc/kg	2,65
Al	cmolc/kg	
Na	cmolc/kg	0,14
S	mg/kg	14
Mn	mg/kg	14
Fe	mg/kg	220
Cu	mg/kg	1,8
B	mg/kg	0,19
Zn	mg/kg	4,7

Tabla 1-3. Resultados Físicos de suelos Finca Lusitania – 2017

Parámetro	Unidad	Resultado
Densidad aparente	g/cc	1,32
Parámetro	Unidad	
Textura	Franco-Arcillo-Arenoso	
	% Arena	% Limo
	48	18
		% Arcilla
		34

1.2.2 Establecimiento del experimento

Se seleccionó un lote de café variedad Castillo®, con tolerancia a la roya del café causada por el hongo *Hemileia vastatrix* (Alvarado *et al.*, 2005). Sembrado a 1,0 m de distancia entre plantas y 1,5 m de distancia entre surcos para una densidad de siembra de 6.666 plantas. ha⁻¹, sembrado a libre exposición solar, el cual fue renovado por corte del tallo principal a una altura de 30 cm, conocido como método de renovación por zoca en el mes de enero del año 2017.

Se realizó un muestreo de suelo general en el lote experimental al inicio y final del trabajo de investigación. Se tomaron 5 submuestras de suelos provenientes de puntos elegidos aleatoriamente. A partir de las 5 submuestras, se obtuvo una sola muestra del lote de investigación. El muestreo de suelo consistió en limpiar el área a 40 - 50 cm de la base de

la zoca. Posteriormente se introdujo un barreno a una profundidad de 30 cm y el suelo extraído se depositó en un balde. Seguidamente, las submuestras de suelo se homogenizaron manualmente en el balde, y se eliminaron todos los residuos vegetales (raíces, hojas secas, hojas verdes, hojas en descomposición). Finalmente, se tomaron 1.5 kg de suelo y se empacaron en bolsas de polietileno debidamente etiquetadas (número de la muestra, la profundidad, departamento, municipio, fecha de muestreo, lote, número de ha, plantación, edad de la plantación, material de siembra). Las muestras pertenecientes al inicio y final del ensayo se enviaron al laboratorio Agrilab (Bogotá). El pH se determinó utilizando el método potenciométrico en agua 1:1 (pH), Walkley Black y Colorimétrico (Materia Orgánica), Bray II-colorimétrico (Fósforo), Acetato de amonio-absorción atómica (Potasio, Magnesio y Calcio), fosfato de calcio-turbidimétrico (Azúfre) y Yuan-Absorción atómica (Aluminio), textura (al tacto). El suelo fue clasificado como Typic hapludands de acuerdo con la clasificación de la USDA ajustándose a la unidad cartográfica de suelos MQEe del IGAC-Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC. 2014) en el área de estudio de la presente investigación, es decir, tomando como referencia la unidad cartográfica de suelos para el municipio de Garzón-Huila, Colombia.

1.2.3 Diseño del experimento

Se utilizó un diseño experimental de bloques completos al azar (BCA) con cinco tratamientos y 4 repeticiones para determinar el efecto del cloro como ión acompañante del potasio en su relación con la absorción de Macro, nutrientes secundarios y cloro en los frutos. El lote experimental constó de 900 m², constituido por 20 parcelas llamadas Unidades Experimentales (UE), cada una de ellas con un área de 45 m², 30 plantas, de las cuales se seleccionaron 12 plantas efectivas, se escogieron 6 para llevarlas a frutos maduros y las otras 6 para los muestreos destructivos, con el fin de analizar el contenido de nutrientes de acuerdo a las etapas de desarrollo del fruto. Los tratamientos evaluados se realizaron teniendo en cuenta las reducciones de cloruros de la siguiente manera: T1= 100%Cl-1; T2= 0%Cl-1; T3= 50%Cl-1; T4= 25%Cl-1; T5= 75 %Cl-1 (Figura 1-1).

Basado en los resultados del análisis de suelos (Tabla 1-2 y 1-3), se procedió con la definición del aporte Nutricional (Tabla 1-4 y 1-7). Durante el primer año los tratamientos de fertilización se dividieron en dos aplicaciones conocido como plan de nutrición de levante o de etapa vegetativa, después de los 10 meses de renovación o soqueo se

procedió a definir el plan de nutrición para la etapa productiva, correspondiente al segundo año de renovación, con la aplicación de los tratamientos en las siguientes fechas: Febrero, Junio y Octubre, con las dosis descritas en la Tabla 1-6.

Figura 1-1. Distribución de los tratamientos en campo

Bloque 1					Bloque 2					Bloque 3					Bloque 4					
x	x	x	x	x	F	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	
x	Δ	Δ	Δ	x	x	Δ	Δ	Δ	x	x	Δ	Δ	Δ	x	x	Δ	Δ	Δ	x	
x	Δ	Δ	Δ	x	x	Δ	F	Δ	x	x	Δ	Δ	Δ	x	x	Δ	Δ	Δ	x	
x	o	o	o	x	x	o	F	o	x	x	o	o	o	x	x	o	o	o	x	
x	F	o	o	x	x	o	o	o	x	x	o	o	o	x	x	o	o	o	x	
x	F	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	
x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	F	x	x	
x	Δ	Δ	Δ	x	x	Δ	Δ	Δ	x	x	Δ	Δ	Δ	x	x	Δ	Δ	Δ	x	
x	Δ	Δ	Δ	x	x	Δ	Δ	Δ	x	x	Δ	Δ	Δ	x	x	Δ	Δ	Δ	x	
F	o	o	o	x	x	o	o	o	x	x	o	o	o	x	x	o	o	o	x	
x	o	o	o	x	x	o	o	o	x	x	o	o	o	x	x	o	o	o	x	
x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	
x	x	x	x	x	x	x	F	x	x	x	x	x	x	x	x	x	F	F	x	
F	Δ	Δ	Δ	x	x	Δ	Δ	Δ	x	x	Δ	Δ	Δ	x	x	Δ	Δ	Δ	x	
x	Δ	Δ	Δ	x	x	Δ	Δ	Δ	x	x	Δ	Δ	Δ	x	x	Δ	Δ	Δ	x	
x	o	o	o	x	x	o	o	o	x	x	o	o	o	x	x	o	o	o	x	
x	o	o	o	x	x	o	o	o	x	x	o	o	o	x	x	o	o	o	x	
x	o	o	o	x	x	o	o	o	x	x	o	o	o	x	x	o	o	o	x	
x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	F	x	x	x	x	x	x	x	x	x	
x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	
x	Δ	Δ	Δ	x	x	Δ	Δ	Δ	x	x	Δ	Δ	Δ	x	x	Δ	Δ	Δ	x	
x	Δ	Δ	Δ	x	x	Δ	Δ	Δ	x	x	Δ	Δ	Δ	x	x	Δ	Δ	Δ	x	
x	o	o	o	x	x	o	o	o	x	x	o	o	o	x	x	o	o	o	x	
x	o	o	o	x	x	o	o	o	x	x	o	o	o	x	x	o	o	o	x	
x	x	x	F	x	x	x	x	x	F	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	
x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	
x	Δ	Δ	Δ	x	x	Δ	Δ	Δ	x	x	Δ	Δ	Δ	x	x	Δ	Δ	Δ	x	
x	Δ	Δ	Δ	x	x	Δ	Δ	Δ	x	x	Δ	Δ	Δ	x	x	Δ	Δ	Δ	x	
x	F	o	o	x	F	o	o	o	x	x	o	o	o	x	x	o	o	o	x	
x	o	o	o	x	x	F	o	o	x	x	o	o	o	x	x	o	o	o	x	
x	F	x	x	x	x	x	F	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	
Δ	Plantas efectivas destructibles				T1	100 % CI				1	9	14	20							
o	Plantas efectivas				T2	0 % CI				5	10	13	19							
x	Plantas borde				T3	50 % CI				2	8	11	16							
F	Faltantes				T4	25 % CI				3	7	15	18							
					T5	75 % CI				4	6	12	17							

Las aplicaciones de fertilizantes edáficos se realizaron con el objetivo de lograr aportar los porcentajes de cloruros a los tratamientos, calculando las siguientes dosis y fuentes de productos para lograr aportes nutricionales estandarizados para todos los tratamientos:

Tabla 1-4. Descripción de los tratamientos y aportes de cloruro y sulfato por tratamiento y por año

Año.	Tratamiento	% Cl Aplicado	K ₂ O	S	Cl
			kg. ha ⁻¹ .año ⁻¹ .		
2017	1	100	104	0	80
	2	0	107	38	0
	3	50	105	19	40
	4	25	108	29	21
	5	75	107	10	61
2018	1	100	228	29	175
	2	0	227	96	0
	3	50	225	41	86
	4	25	229	62	43
	5	75	228	22	129

Tabla 1-5. Fecha de aplicación de cloruros

Fecha de Aplicación	Aplicación kg.ha ⁻¹ de Cloruros				
	T1	T2	T3	T4	T5
Septiembre-17	80	0	40	20	60
Diciembre-17	0	0	0	0	0
Febrero-18	93,3	0	40	20	66,6
Junio-18	0	0	0	0	0
Octubre-18	80	0	40	20	66,6
Diciembre-18	53,3	0	26,6	13,3	40

Tabla 1-6. Aplicación de fertilizantes

Fecha de Aplicación	Producto	Gramos/planta				
		T1	T2	T3	T4	T5
sep-17	SOP		32	16	24	8
	KCL	26		13	7	20
	YaraBela Nitromag	40	40	40	40	40
feb-18	SOP		38	17	26	9
	KCL	30		14	7	21
	DAP	5	5	5	5	5
	Kieserita	10	10			
	YaraLiva Nitabor	25	25	25	25	25
	MgO			5	5	5
jun-18	YaraBela Nitromag	35	35	35	35	35
	DAP	5	5	5	5	5

(Continúa)

Tabla 1-6. Aplicación de fertilizantes (continuación)

Fecha de Aplicación	Producto	Gramos/planta				
		T1	T2	T3	T4	T5
oct-18	SOP		30	17	26	9
	KCL	27		14	7	21
	DAP	5	5	5	5	5
	Kieserita	10				
	UREA	20	20	20	20	20
	YaraLiva Nitabor	10	10	10	10	10
	MgO		5	5	5	5
dic-18	SOP		23	11	16	6
	KCL	18		9	5	14
	DAP	30	30	30	30	30
	YaraLiva Nitabor	40	40	40	40	40
	MgO					

Tabla 1-7. Descripción del aporte nutricional durante el periodo del estudio

Año	N	P ₂ O ₅	K ₂ O	CaO	MgO
kg.ha⁻¹.año⁻¹					
2017	56	0	106	29	20
2018	163	46	227	86	28
Promedio	110	23	167	58	24

1.2.4 Muestreo de frutos

Para proceder con un adecuado muestreo de frutos de *C. arabica* L. Var. Castillo, se realizó una detallada marcación de ramas y nudos a partir del tercio medio de la planta con cinta de color azul, en el día de mayor floración en el lugar de estudio. Los muestreos de los frutos de café para cada tratamiento se realizaron sobre las seis (6) plantas debidamente marcadas, las cuales correspondían a la toma de muestreo de la siguiente manera:

Planta 1: toma de muestra de frutos a los 36 días después de floración (ddf)

Planta 2: toma de frutos a los 67 ddf

Planta 3: toma de frutos a los 92 ddf

Planta 4: toma de frutos a los 121 ddf

Planta 5: toma de frutos a los 179 ddf

Planta 6: toma de frutos a los 214 ddf

(Descritas como plantas efectivas destructibles: Figura 1-1). Considerándose muestreos destructibles de acuerdo con la metodología planteada por Castro *et al.*, (2014) en *C. arabica*, quienes aclaran que: “en este tipo de esquemas donde se muestrean frutos cosechados o biomasa vegetal, se obtienen de una manera directa y precisa estimaciones reales de rendimiento”. Además, de seis (6) plantas adicionales, las cuales, se muestrearon una vez los frutos de café llegaron a su etapa fenológica de maduración (Plantas efectivas: Figura 1-1), a los 259 ddf (en la zona de estudio- Finca Lusitania). Una vez recolectadas las muestras de frutos en cada etapa de muestreo, estas fueron secadas al horno a 60°C por 24 horas, y analizadas en el laboratorio como se describe más adelante.

Se determinaron las siguientes variables de respuestas para cada uno de los tratamientos:

1. Concentración de nutrientes en base seca de Nitrógeno, Potasio, Calcio, Azufre, Magnesio y Cloro.
2. Absorción de los mismos nutrientes en mg.g^{-1} de materia seca durante diferentes etapas de desarrollo del fruto.
3. Absorción de nutrientes por Tonelada al momento de la cosecha.

Se empleó un diseño experimental en Bloques completos al azar y para evaluar la diferencia para los tratamientos, se utilizó el programa de análisis estadístico Statgraphics Centurion, aplicando análisis de varianza y diferencias significativas de valor- $P < 0,05$.

1.2.5 Cuantificación de nutrientes

Para efectos de la presente investigación, se diseñaron tazas de acumulación nutricional con los siguientes elementos: N, K, Cl, S, Ca y Mg. Para el análisis de nutrientes en los frutos, se tomaron muestras a partir del primer mes después de la primera floración y se recolectó suficiente material para someterlo a análisis de laboratorio (descrito en muestreo de frutos), el cual consistió en una digestión ácida que permite eliminar el contenido de materia orgánica del tejido vegetal muestreado, para posteriormente analizar los nutrientes en cuestión, acumulados en los frutos de café colectados. Se determinó la presencia de Nitrógeno (N), potasio (K), calcio (Ca), azufre (S), magnesio (Mg) y cloro (Cl) en los frutos de café recolectados. Para la determinación de K, Ca y Mg se empleó la metodología de

la AOAC (2005) en sus normas AOAC 965.30 con base en la técnica de espectrofotometría de absorción atómica (EAA) (para potasio) y AOAC 991.25 (para Ca y Mg) con base en la técnica de espectrofotometría de emisión atómica (EEA) siguiendo la metodología descrita por Figueroa y Mendoza (2010). La técnica colorimétrica y volumétrica descrita por NTC 5167 fue utilizada para determinar el contenido de azufre (S) y cloro (Cl). El equipo empleado fue un espectrofotómetro de absorción atómica marca PerkinElmer®, modelo Analyst 400 en el laboratorio de Agrilab S.A. (Bogotá, Colombia).

1.3 Resultados y discusión

Del envío de los frutos de café en los días 36, 67, 92, 121, 179 y 214 ddf para su análisis de elementos en el laboratorio, se obtuvieron los siguientes contenidos de nutrientes según los tratamientos evaluados.

Se encontró que la fertilización diferenciada (tratamientos aplicados) evaluada en la presente investigación, promovió efectos significativos sobre la concentración de N, K, Ca, Mg, S y Cl en las cerezas de café, que fue objeto de estudio. La concentración de todos estos nutrientes en los frutos de café fue significativamente influenciada por el tiempo de muestreo disminuyendo la concentración nutricional a medida que el fruto va incrementando su tamaño, resultados que se esperaban según antecedentes de investigaciones en concentraciones de frutos de café. En cuanto a las interacciones sinérgicas que se presentaron respecto a la absorción de N, K, Ca, Mg, S, y Cl en los frutos evaluados de café, se puede explicar posiblemente debido a que la disminución de los cloruros mejora el transporte iónico de los demás elementos, los cuales interactúan entre sí, además de mejorar el balance nutricional de los aportes del microelemento Cloro, el cual hace parte de los elementos esenciales para las plantas, pero que sin lugar a dudas pertenece a los Micro nutrientes que se requieren en bajas dosis para los cultivos.

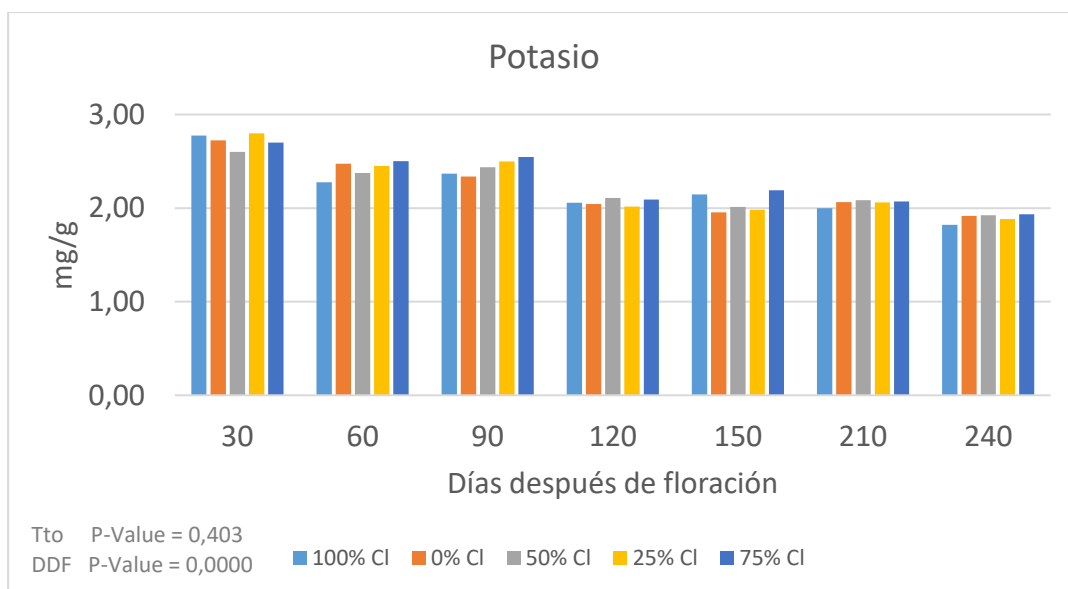
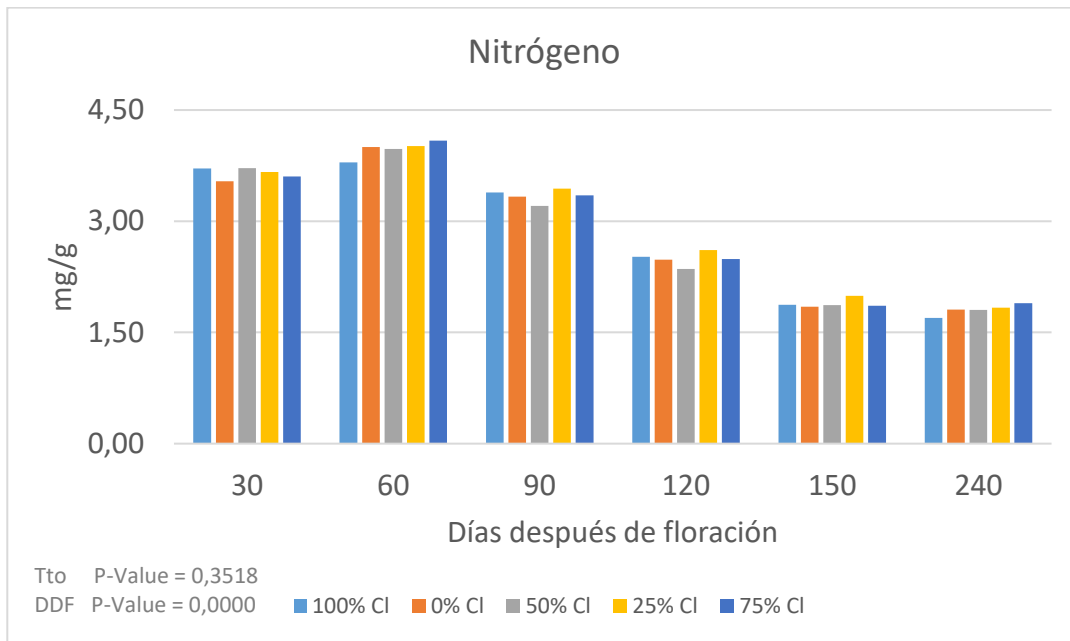
1.3.1 Resultados de concentración de N, K, Ca, Mg, S y Cl en frutos de café

Es importante mencionar que, la variedad Castillo fue receptiva a aplicaciones de fertilizantes, y que la fertilización aplicada fue eficiente, demostrando la concentración de los elementos N, K, Ca, Mg, S y Cl en los frutos de café recolectados, logrando garantizar una adecuada nutrición del cultivo y tener una adecuada cosecha.

1.3.1.1 Concentración de N y K en frutos de café

En la Figura 1-2 se observa el efecto de la reducción de cloruros en los contenidos de elementos mayores: Nitrógeno y Potasio, en los frutos de café a libre exposición solar.

Figura 1-2. Concentración del Nitrógeno y Potasio sobre las cerezas de café.



La evolución de la concentración de Nitrógeno y Potasio a lo largo del desarrollo de los frutos de café no presentó diferencias estadísticamente significativas, se tuvo inicialmente una tendencia alta de ambos elementos evaluados, para posteriormente (aproximadamente a los 75 a 120 ddf) disminuir su concentración debido al aumento del tamaño de los frutos, tal como lo menciona Arcila *et al.*, (2003), en el cual describen esta etapa como la del crecimiento acelerado obteniendo su tamaño final. Después de este pico de acumulación inicial, hubo un detrimento en las concentraciones de nutrientes en cuestión, con varias fluctuaciones, alcanzando los valores más bajos en las etapas de expansión, formación de frutos y maduración. Este comportamiento se debe a un incremento del contenido de materia seca en los frutos de café; es decir, que la cantidad de nutrientes presentes en las cerezas de café, se diluyen, estas etapas, se caracterizan por la expansión celular, un incremento en el tamaño y por la acumulación de sustancias de reserva en los frutos de café, manifestados también por Malavolta *et al.*, 1997; Gonçalves *et al.*, 2018 y Manning *et al.*, 2017, Diluyendo los elementos antes mencionados, reduciendo su contenido en promedio para el Potasio 29% y para el Nitrógeno 54% tal como se muestra en la Figura 1-2.

El nitrógeno tuvo entre todos los nutrientes evaluados el mayor pico de concentración de elementos en los frutos, sin embargo, se redujo después de los 90 ddf, observando mayor prioridad por el elemento potasio. El tratamiento aplicado con 25% de cloruros, fue el que mayor concentración de N obtuvo en las cerezas de café, evidenciando la respuesta positiva de las combinaciones y reducción de cloruros para aumentar la eficiencia y concentración del nitrógeno en los frutos, además se observó la menor concentración del nitrógeno en el tratamiento al cual se le aplicó 100% Cloruro en su aporte nutricional (306,6 kg Cl⁻.ha en los primeros dos años productivos), al finalizar la etapa de maduración a los 240 ddf. Se observa la permanencia del potasio en la concentración de los frutos de café, teniendo una continua concentración a lo largo de todo el periodo de evaluación, sin tener fuerte relevancia con la reducción de cloruros aplicados en los Tratamientos.

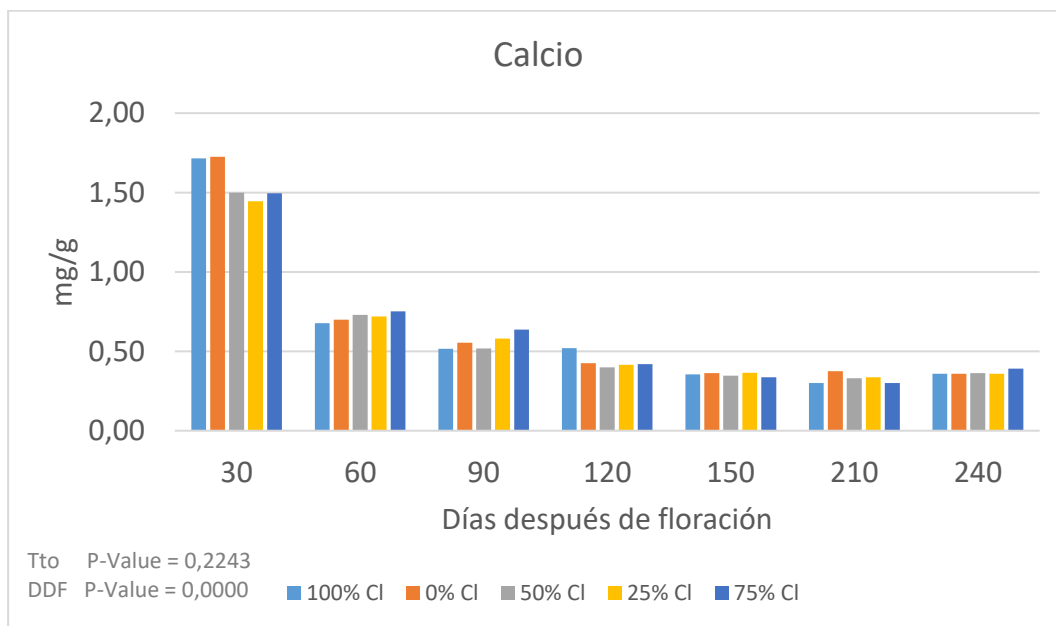
La concentración promedio del potasio fue mayor en las cerezas de café que recibieron los tratamientos 25% de Cloruros (T4) y 75% de Cloruros (T5), sin presentarse diferencia significativa alguna entre ambos tratamientos. Estos resultados corroboran lo descrito por Sadeghian *et al.*, (2006), donde el macronutriente de mayor concentración en las cerezas del café fue el potasio, superando incluso al nitrógeno. Además, se comprobó que la

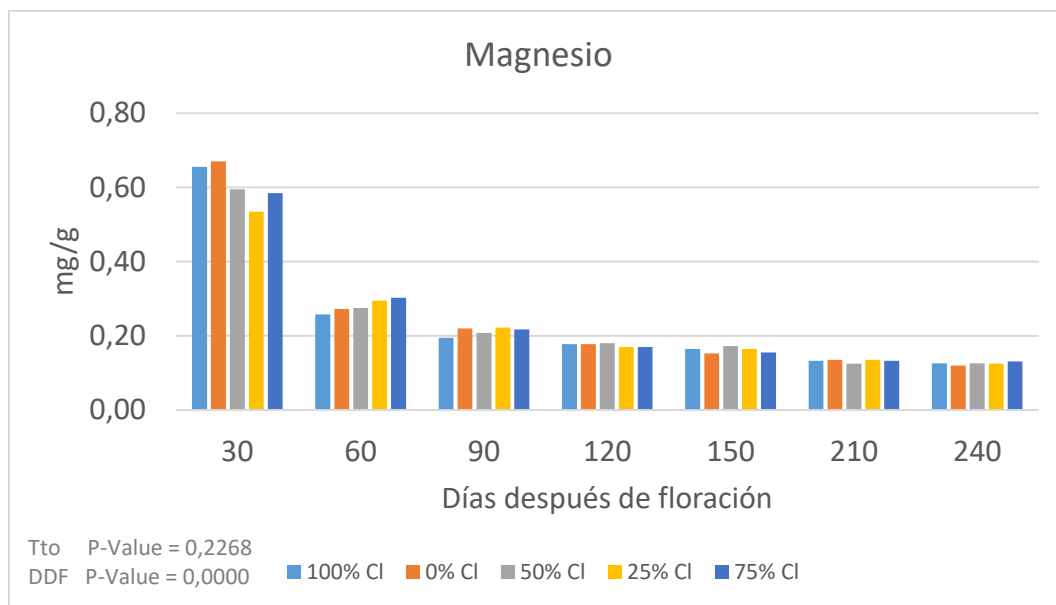
reducción de cloruros, empleando combinación de fuentes de potasio es eficiente y las plantas de café responden a ella, en particular la variedad Castillo, probó ser receptivo ya que este nutriente se acumula en una mayor proporción en los frutos, en comparación con los demás nutrientes evaluados. Además, se puede observar que el potasio (K^+) se comportó de manera diferente a los otros nutrientes, y se notó que la concentración de este elemento es alto en los frutos de café, lo que confirma la importancia de este nutriente en la formación del fruto y esto se clarifica en línea con lo hallado por Malavolta *et al* (2002) y Dubberstein *et al* (2016), quienes encontraron que entre los nutrientes, el potasio es el que posee mayor acumulación en el fruto, además aproximadamente $80 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}$ de este nutriente es extraído, consistiendo de un fuerte sumidero temporal de nutrientes con mayor acumulación, incluso también en las hojas y ramas del café. También, Sadeghian *et al* (2007) mencionan que la extracción en frutos de café de Nitrógeno y Potasio están en 30,94 y 36,92 kg respectivamente, observando también la mayor relevancia en el elemento potasio en café variedad castillo.

1.3.1.2 Concentración de Ca y Mg en frutos de café

En la Figura 1-3 se observa el efecto de la reducción de cloruros en la concentración de elementos secundarios Calcio y Magnesio en los frutos de café a libre exposición solar.

Figura 1-3. Concentración de Calcio y Magnesio sobre las cerezas de café



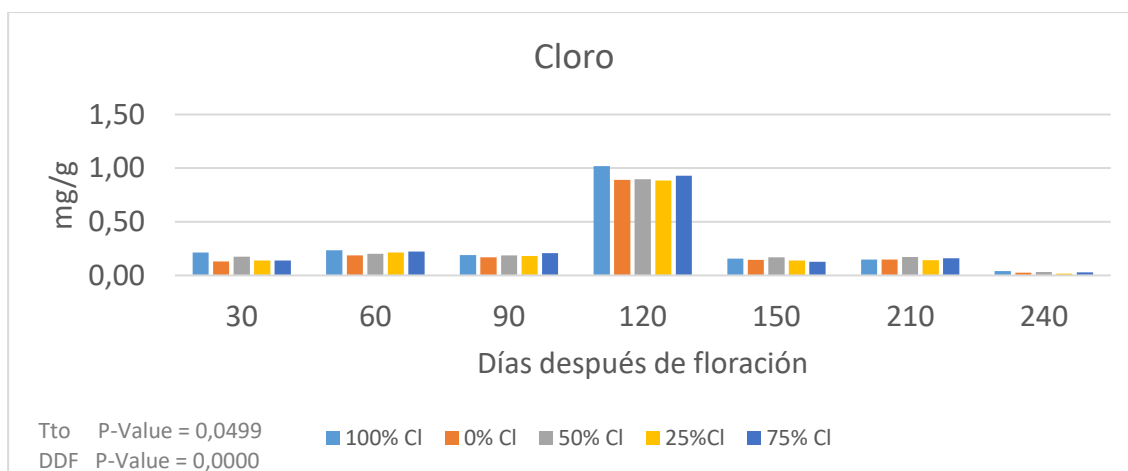
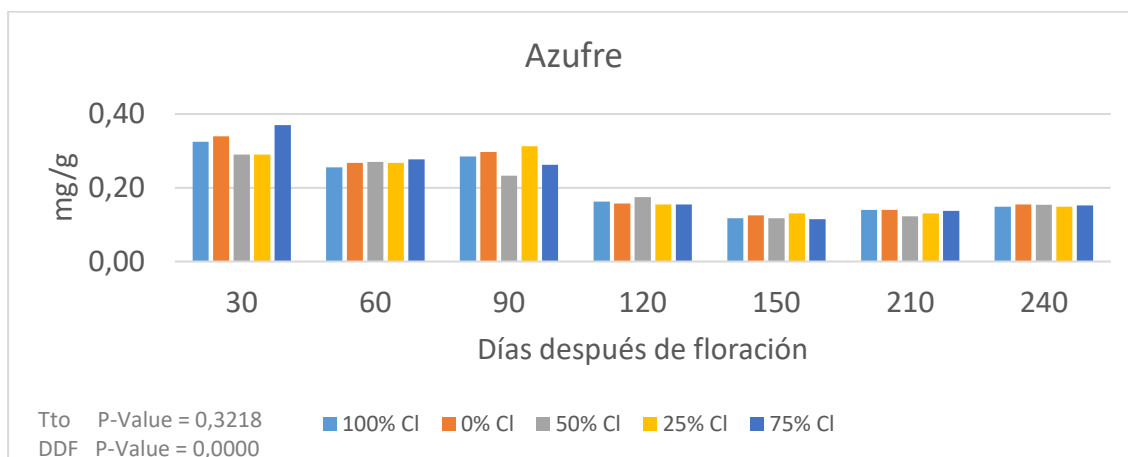


Estos dos elementos secundarios evaluados no presentaron diferencias estadísticamente significativas, con una concentración muy similar de nutrientes entre todos los tratamientos. Sin embargo, se observa un comportamiento de mejor respuesta para el tratamiento aplicado con 75% de cloruros, aumentando la concentración de esos elementos a los 60 y 90 ddf, los cuales coinciden con los días de mayor crecimiento de los frutos de café, Resultados similares fueron encontrados por Cuzato *et al* (2014), quienes observaron respuesta directamente proporcional del aumento de las concentraciones de N, K y Ca al aumentar aportes de potasio en frutos de café secados al aire; y para la concentración del Mg, el tratamiento con 0% Cloruros (T2) obtuvo la mayor concentración a los 30 ddf en comparación con el tratamiento aplicado 25% de cloruro (T4). Ambos elementos fueron los que presentaron mayor relevancia al inicio de la formación de frutos, para posteriormente disminuir sus valores considerablemente, 76% y 79% para el Calcio y Magnesio respectivamente, pudiendo ser influenciados inicialmente al momento de la aplicación de los fertilizantes, ya que según Cuzato *et al* (2014), al ser la fuente KCl con el ión acompañante Cl⁻, muy móvil y de carga negativa puede aumentar la absorción de otros cationes en un corto periodo de tiempo.

1.3.1.3 Concentración de S y Cl en frutos de café

En la Figura 1-4 se observa el efecto de la reducción de cloruros en los contenidos de elementos: Azufre y Cloro en los frutos de café a libre exposición solar, aportados como iones acompañantes de los fertilizantes KCl y SOP.

Figura 1-4. Concentración de Azufre y Cloro sobre las cerezas de café



Los tratamientos evaluados, en cuanto al azufre, no presentó diferencias significativas. Sin embargo, se observan las más altas concentraciones cuando son combinadas las fuentes potásicas, con el objetivo de reducir los cloruros, se observa que el Tratamiento con 75% y 25% de cloruros (T5 y T4 respectivamente) obtuvieron mayores concentraciones en los frutos de café a los 30, 60 y 90 ddf.

En relación con la concentración de cloro sobre los frutos de café presentaron diferencias estadísticamente significativas. Se encontró diferencias en la concentración de cloro en los frutos de café entre los tratamientos 1 (100 % cloruros) con respecto a los tratamientos 2 y 4 (0% y 25% Cloruro respectivamente), resultados similares fueron reportados por Gonzalez *et al.*, (1977) en hojas de café, donde se observan una rápida respuesta a la concentración de Cl⁻ aportado en la fuente KCl con respecto a K₂SO₄, superando niveles de exceso de elemento referenciado en 2.000 ppm, pero sin presentar síntomas visuales en dichos tratamientos. El valor con mayor concentración de este elemento se obtuvo a los 120 ddf en el Tratamiento aplicado 100% cloruros, encontrando un contenido de 1,02 mg/g de Cloro en los frutos de este tratamiento, para posteriormente observar su drástica disminución, dato interesante observado incluso en el tratamiento al cual no se le realizaba aplicaciones de este elemento, demostrando la alta solubilidad del KCl empleado en la fuente de cloruro como ión acompañante del potasio, la movilidad en el suelo y la alta movilidad en la planta, para ser reducido su concentración en los frutos a los 150 ddf en adelante, esta característica de alta movilidad al interior de la planta también es descrita por Xu *et al* (1999), además la alta concentración se observó incluso teniendo en cuenta lo reportado por Duarte *et al* (2013) en el cual menciona la pérdida por lixiviación de cloruro aportado en los fertilizantes KCl debido a su alta solubilidad. Sin embargo, para Marschner *et al* (1986) la agricultura moderna se alerta al emplear el uso constante de fertilizantes basados en cloruro por su efecto en el exceso a las plantas que por su déficit.

1.3.2 Resultados de acumulación porcentual de N, K, Ca, Mg, S y Cl en el fruto del café.

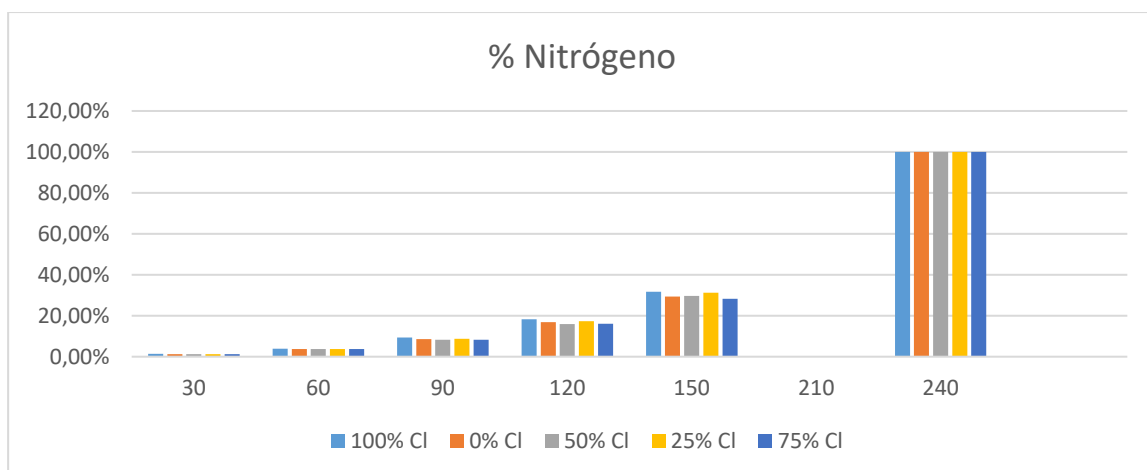
El impacto de la reducción de cloruros en la acumulación porcentual de los elementos N, K, Ca, Mg, S y Cl, Se encontró que, durante los primeros 120 ddf, los frutos de café logran acumular menos del 20% de la absorción nutricional de los elementos evaluados, para luego observar la mayor absorción nutricional hasta completar su desarrollo y madurez y fisiológica, aproximadamente a los 240 ddf, en el cual se espera obtener el mayor porcentaje de acumulación de los elementos en los frutos de café, tomando este dato final como la acumulación correspondiente al 100% del elemento.

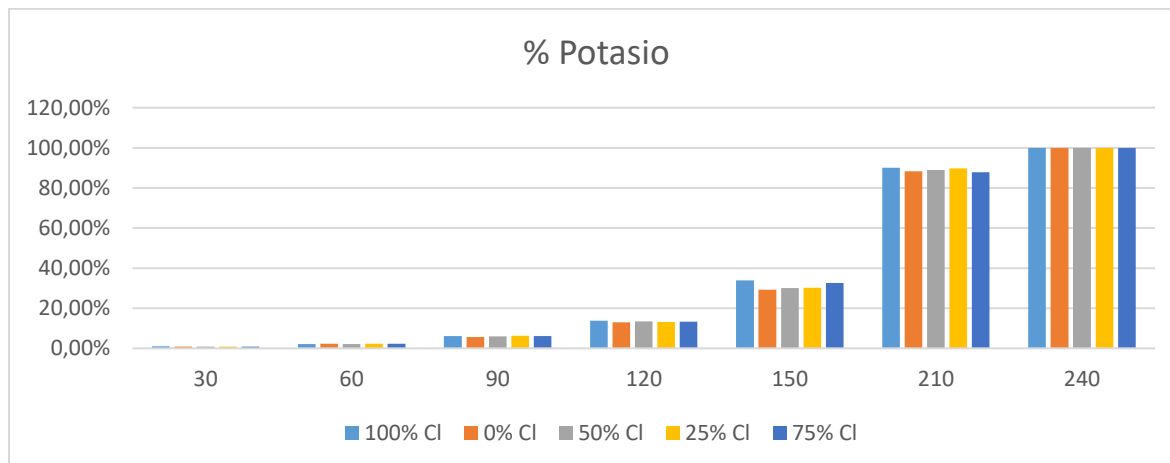
1.3.2.1 Acumulación de N y K en frutos de café

En la Figura 1-5 se observa el efecto de la reducción de cloruros en la acumulación porcentual de elementos mayores: nitrógeno y potasio, en los frutos de café a libre exposición solar.

No se observaron diferencias estadísticamente significativas en las tasas de absorción de nutrientes entre los tratamientos (Tabla 1-8), pero se observa que los tratamientos T4 con 25% de cloruro y T5 con 75% Cloruro, presentan las mayores acumulaciones de N y K, evidenciando la marcada respuesta de absorción de ambos elementos primarios para las plantas de café en el presente trabajo de investigación. El porcentaje de absorción de nutrientes por las plantas de café (Figura 1-5) mostró diferencias significativas en la velocidad y capacidad de absorción respecto a la época de floración. Para el caso del potasio (K⁺) en particular, a los 30 ddf, las plantas de café evaluadas expusieron la menor capacidad de absorción (0.88%) no obstante, demostró un incremento significativo a los 150 ddf (30.05%), y este comportamiento denota el requerimiento nutricional por parte de los frutos de café en este periodo de tiempo. La acumulación constante de potasio hasta la maduración ha sido reportada amplia y específicamente en cerezas de *C. arabica* (Damatta *et al.*, 2007; Dawid *et al.*, 2018; De Barros *et al.*, 2002), se atribuye la causa al nutriente que se requiere para la activación de varias enzimas claves en la síntesis de compuestos orgánicos que se sintetizan con la maduración del fruto.

Figura 1-5. Acumulación porcentual de Nitrógeno y Potasio en las cerezas de café.





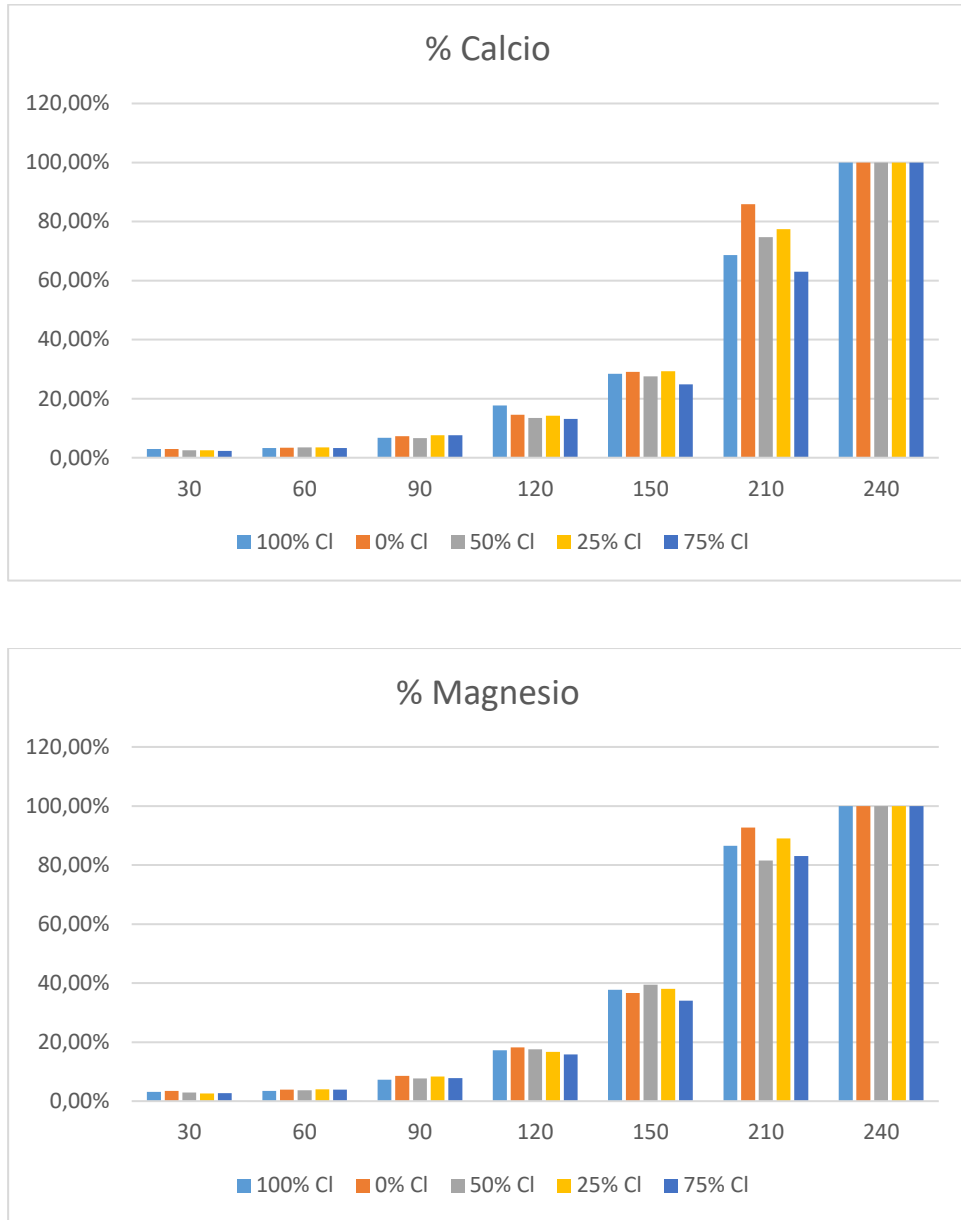
Algunos autores consideran que la absorción nutricional, dependen de la disponibilidad de nutrientes en la rizósfera (Martins y Furlani, 2010), teniendo diferencia de absorción nutricional en distintas densidades de siembra por antagonismos y rapidez de acumulación de los elementos, se puede evidenciar que, dependiendo de la concentración de Cloruros en los tratamientos de fertilización, los frutos de café acumulaban porcentualmente de manera diferente el Nitrógeno y el Potasio en sus frutos.

1.3.2.2 Acumulación de Calcio y Magnesio en frutos de café

En la Figura 1-6 se observa el efecto de la reducción de cloruros en la acumulación porcentual de los elementos Calcio y Magnesio, en los frutos de café a libre exposición solar.

Para los elementos secundarios, no se obtuvo diferencias estadísticamente significativas en la acumulación porcentual en los frutos, sin embargo, se obtiene los resultados más contrastantes a los 210 ddf, demostrando la positiva respuesta de las combinaciones de fuente de potasio, con el objetivo de reducir y balancear los aportes de cloruros en los programas nutricionales, aumentando la eficiencia y acumulación de los elementos Calcio y Magnesio, teniendo una diferencia para el caso del Calcio de 22,85% entre el Tratamiento con 0% de aplicación de Cloruro comparado al Tratamiento aplicado con 75% de Cloruro, y el Magnesio una diferencia de 3,47% con estos mismos Tratamientos.

Figura 1-6. Acumulación porcentual de Calcio y Magnesio sobre las cerezas de café.



1.3.2.3 Acumulación de Azufre y Cloro en frutos de café

En la Figura 1-7 se observa el efecto de la reducción de cloruros en la acumulación porcentual de los elementos Azufre y Cloro, en los frutos de café a libre exposición solar.

Figura 1-7. Acumulación porcentual de Azufre y Cloro sobre las cerezas de café.



El azufre, quien también respondió con diferentes valores porcentuales en los ddf, se observó que no existía antagonismo entre los cloruros aplicados, sino todo lo contrario, también se observó mayores incrementos en el Tratamiento aplicado 100% Cloruro (T1) a los 210 ddf.

El Cloro, presentó un comportamiento atípico, demostrando la velocidad de absorción incrementada, suprimiendo su efecto de acumulación hacia los 240 ddf, es decir que este

elemento presenta un efecto deletéreo sobre las cerezas de café y, por tal motivo, su alto porcentaje de acumulación de Cl⁻ a los 120 y 210 ddf sobrepasa la secuencia que se esperaba con los elementos, ya que en el último muestreo realizado se disminuyó drásticamente la acumulación en los frutos, el cual era el indicador que se tomaba como su porcentaje de acumulación máximo, pero el mayor porcentaje de acumulación se obtuvo previo a su maduración final.

1.3.3 Contenido de N, K, Ca, Mg, S y Cl en el fruto del café.

1.3.3.1 Contenido de Nitrógeno y Potasio en frutos de café

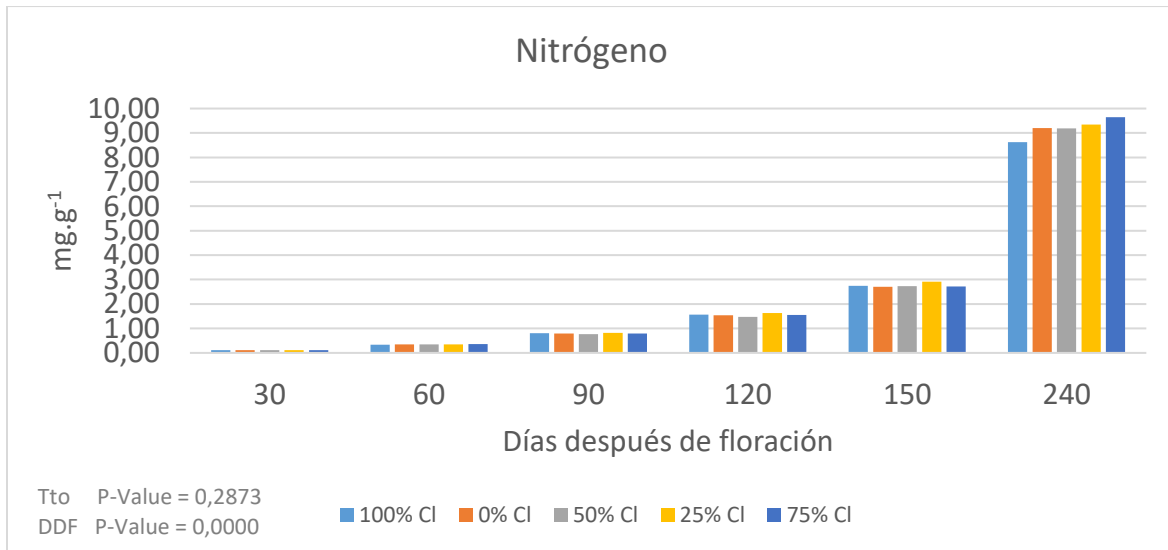
En la Figura 1-8 se observa el efecto de la reducción de cloruros con relación al consumo de los elementos Nitrógeno y Potasio, en los frutos de café a libre exposición solar, durante el desarrollo del fruto.

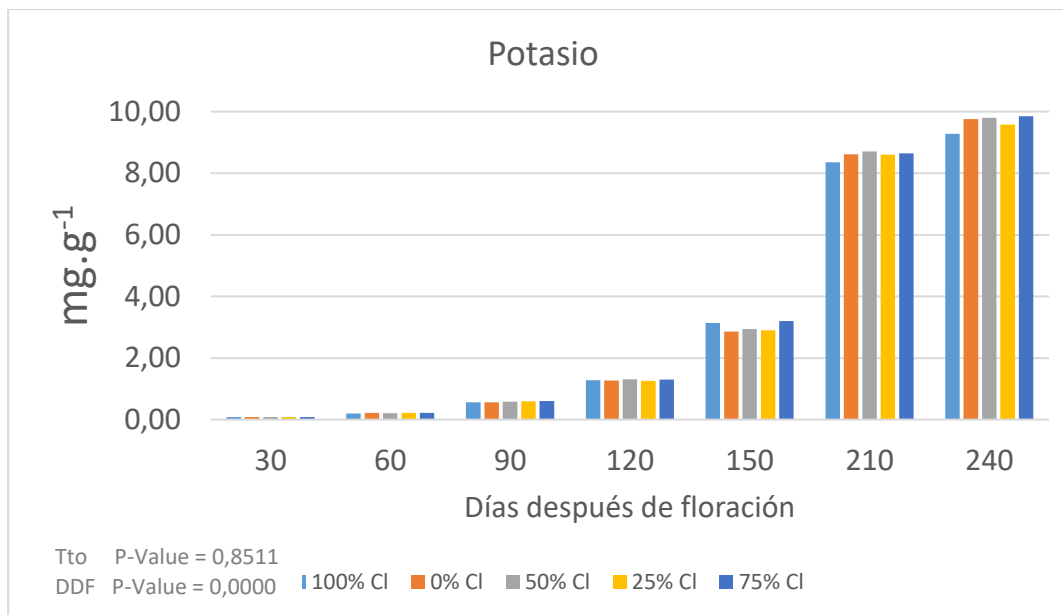
El potasio permaneció como el nutriente más acumulado en las cerezas de *C. arabica* L. cv Castillo, con un promedio de 3.34 mg.g⁻¹ de cereza (evaluando los promedios de los cinco tratamientos aplicados), ubicándose como el principal nutriente consumido por las cerezas de café en su etapa fenológica (Figuras 1-8); esto deja en evidencia la importancia de este nutriente y su función en la formación del fruto, mostrando los beneficios de la fertilización reduciendo cloruros y balance nutricional en el cultivo de café durante el período productivo. Las plantas de café demandan y exportan potasio en grandes cantidades, especialmente en los años de alto rendimiento, ya que tiene una relación directa con la producción o con la carga del fruto (Laviola *et al.*, 2006; Clemente *et al.*, 2013; Valadares *et al.*, 2013). Sin embargo, el elemento potasio, mostró ventajas de incremento en el consumo en las cerezas de café para el tratamiento aplicado 75% de cloruro (T5), obteniendo hacia el final de este periodo, una concentración de 9.89 mg.g⁻¹ en las cerezas de café. En Costa Rica, Ramirez *et al.* (2002), observaron un ciclo productivo de 240 días para las plantas de café, donde el 93% del potasio total se acumuló en los últimos 180 días, es decir, desde el tercer mes después de la floración hasta la maduración del fruto, mostrando un comportamiento muy similar con el obtenido en el presente trabajo de investigación. Adicionalmente, la Figura 1-8 evidencia que particularmente para el Potasio las tasas de consumo mostraron aumentos significativos entre el periodo de los 150 a 210 ddf, extendiéndose hasta el final del periodo de evaluación

tomado como referencia en este estudio (240 ddf); en este período, los frutos pasan por las etapas de rápida expansión, formación de frutos y maduración de éstos; es decir, crecen tanto en tamaño como en peso, y, por lo tanto, necesitan mayores cantidades y calidades de potasio debido a que este nutriente es responsable de la formación de almidón (activación de la síntesis de almidón), la cual es esencial para la producción de café (Bragança *et al.*, 2008; Dubberstein *et al.*, 2016).

Un escenario similar se presentó para Nitrógeno, donde se obtuvo una concentración elevada de consumo de este elemento en las cerezas de café para el Tratamiento 5, resultado que confirma que al reducir el 25% de cloruros, la respuesta en el consumo del Nitrógeno es más eficiente; ratificando el rol que estos dos macronutrientes cumplen en el óptimo desarrollo y formación del fruto de café.

Figura 1-8. Contenido de Nitrógeno y Potasio sobre las cerezas de café.



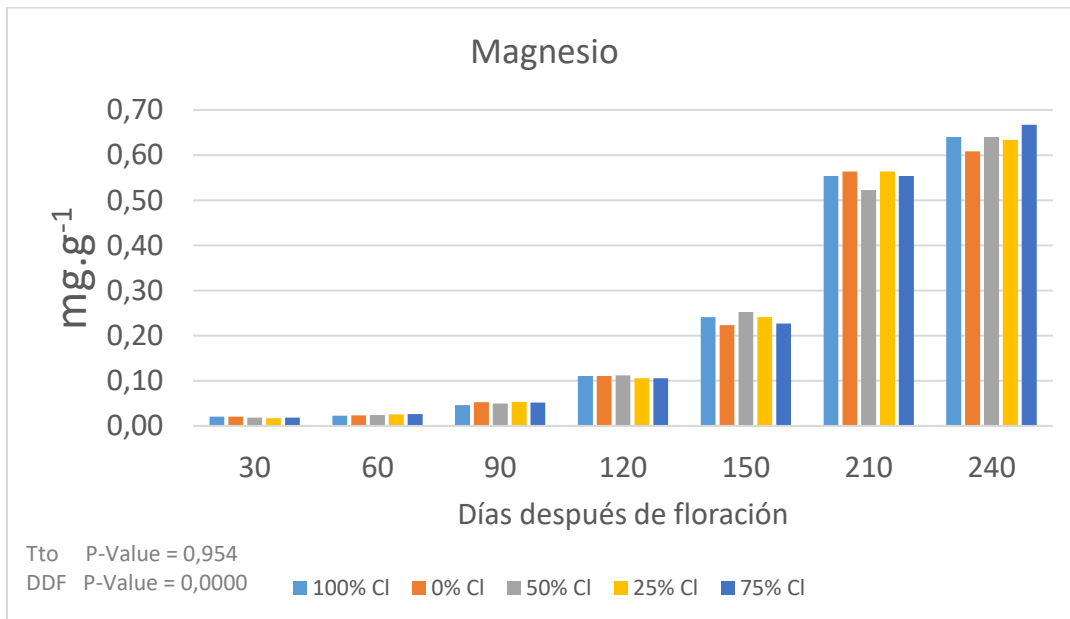
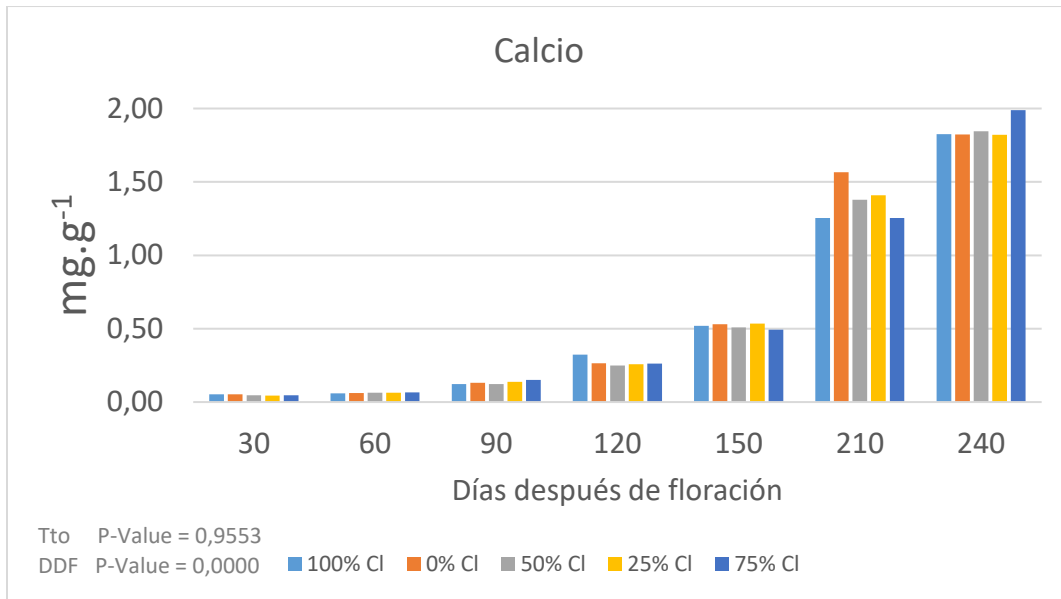


1.3.3.2 Contenido de Calcio y Magnesio en frutos de café

En la Figura 1-9 se observa el efecto de la reducción de cloruros en el consumo de los elementos Calcio y Magnesio, en los frutos de café a libre exposición solar, durante el desarrollo del fruto.

El Calcio hacia los 240 ddf, no presentó diferencia significativa entre los tratamientos evaluados, no obstante, el Tratamiento que consistía de 75% de Cloruro (T5), permitió la mayor concentración de este elemento en las cerezas de café en el orden de 1.98 mg.g⁻¹, sin embargo la mayor diferenciación del consumo nutricional de este elemento respecto a los tratamientos fue a los 210 ddf, donde el Tratamiento 2 con 0% de Cloruros demostró poder diferenciarse con los otros tratamientos, con 0.31 mg.g⁻¹ con respecto al menor de los Tratamientos (100% Cloruro). El Mg, presentó sus picos de mayor consumo hacia los 210 ddf, aunque al final del periodo de evaluación, se observó un incremento significativo de la concentración de Mg en cerezas de café de 0.66 mg.g⁻¹, siendo responsable de este incremento la aplicación de 75% de cloruro (T5).

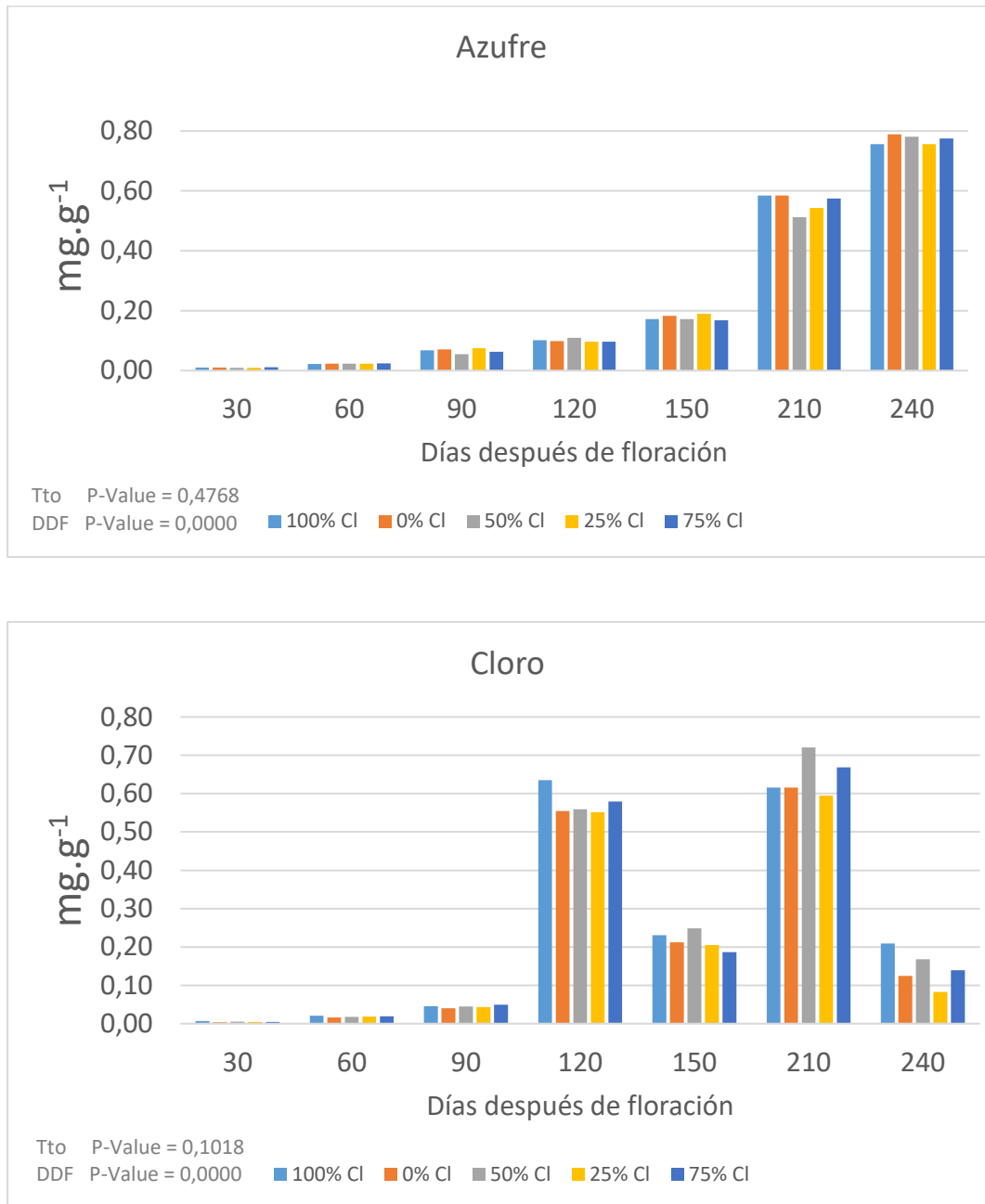
Figura 1-9. Contenido de Calcio y Magnesio sobre las cerezas de café



1.3.3.3 Contenido de Azufre y Cloro en frutos de café

En la Figura 1-10 se observa el efecto de la reducción de cloruros en el consumo de los elementos Azufre y Cloro, en los frutos de café a libre exposición solar, durante el desarrollo del fruto.

Figura 1-10. Contenido de Azufre y Cloro sobre las cerezas de café



Los elementos azufre y cloro, no presentaron diferencias estadísticas, para el caso del azufre, fue el tratamiento que consistía de 0% de cloruro el que obtuvo el mayor consumo de este elemento en las cerezas de café (0.79 mg.g^{-1}), demostrando el marcado sinergismo entre el potasio y el azufre presentado en la fuente empleada de potasio (K_2SO_4).

El cloro nuevamente presentó una respuesta contundente a los 120 y 210 ddf, con picos elevados de consumo de nutrientes para todos los tratamientos, posiblemente atribuyéndose a impactos ambientales en estas dos épocas del año, coincidiendo por una parte con los meses julio y septiembre, los cuales presentan bajas precipitaciones en el año de estudio (170 y 73 mm respectivamente), obteniendo consumos altos de este elemento en los frutos de café, Franco *et al* (1949), demostraron que en plantas de café a pesar de haber superado los rangos de exceso en las hojas (>2400 ppm), no causaron efectos desfavorables y también se evidenció que luego de dos meses después de haber aplicado 80 gr/planta de KCl, se evidenció una disminución marcada de este nutriente.

Tabla 1-8. Resultados del análisis de varianza para la variable consumo de nutrientes en los frutos después de la floración

Fuente de Variación/Nutriente	N	K	Ca	Mg	S	Cl
	mg.g ⁻¹					
Tratamientos	0,287ns	0,851ns	0,955ns	0,954ns	0,476ns	0,101ns
Días después de Floración	0,000**	0,000**	0,000**	0,000**	0,000**	0,000**

*P<0,05 significativo; **p<0,001 Altamente significativo

1.3.4 Contenido de N, K, Ca, Mg, S y Cl por tonelada de café cereza o rojo

El impacto de la reducción de cloruros en la toma de los nutrientes N, K, Ca, Mg, S y Cl, demuestra la exigencia que se debe tener en los programas nutricionales a la hora de elaborar la cantidad de aportes de elementos mayores, secundarios y menores; para el caso de cloruros, es necesario conocer el impacto que trae la reducción de este elemento en los programas nutricionales, con el objetivo de disminuir aportes innecesarios a la caficultura, garantizar la eficiencia en la toma de nutrientes y posibles excesos de elementos en las plantas.

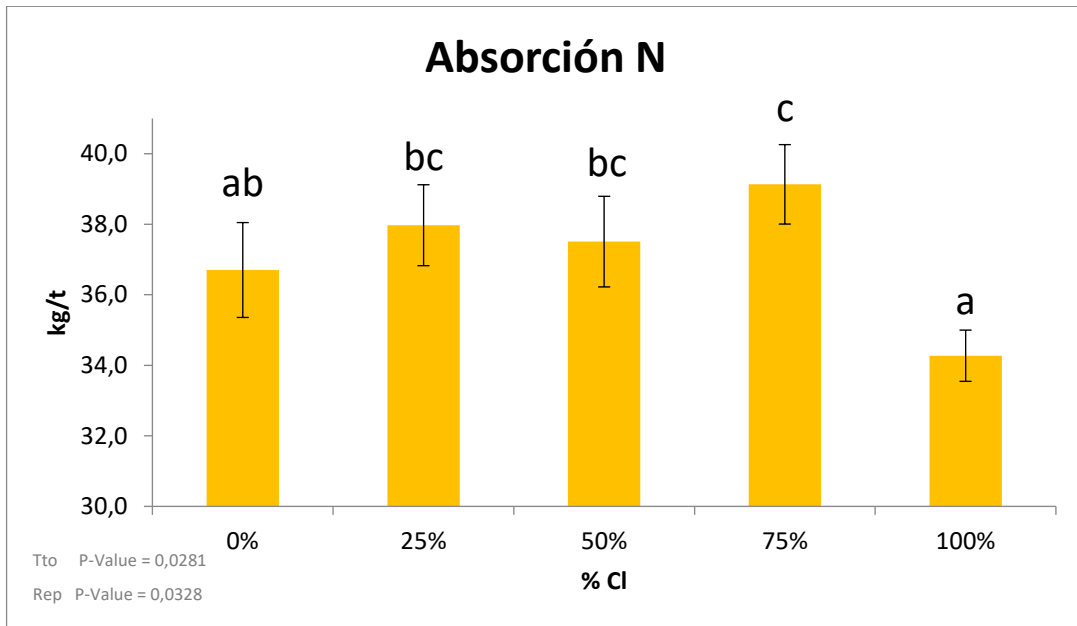
1.3.4.1 Toma de Nitrógeno y Potasio por frutos de café

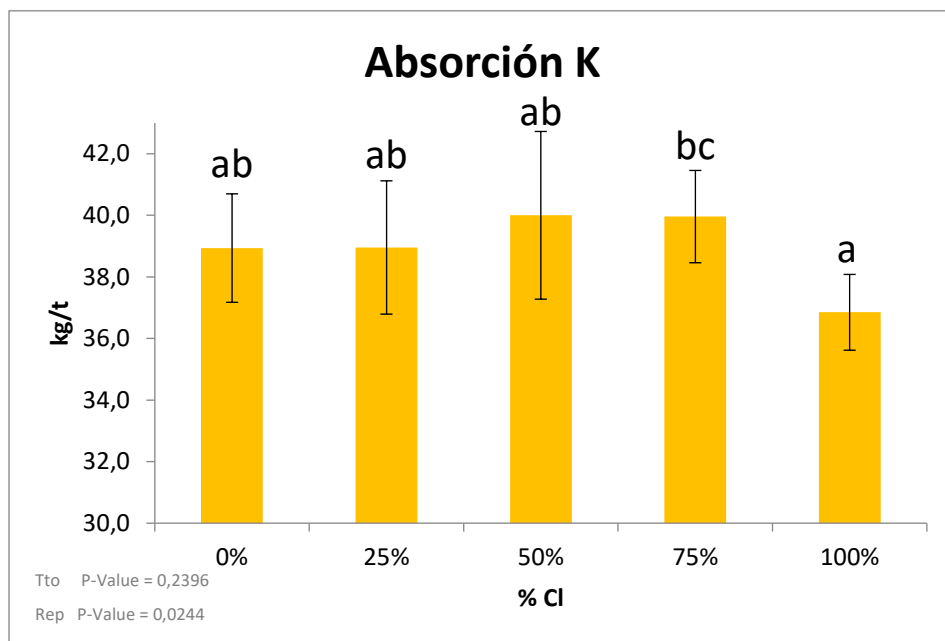
En la Figura 1-11 se observa el efecto de la reducción de cloruros en la toma de los elementos Nitrógeno y potasio, en los frutos de café a libre exposición solar.

El nitrógeno presentó diferencias estadísticamente significativas entre los tratamientos. Encontrando que el tratamiento el cual presentó la menor toma de N fue el aplicado con

100% de cloruro (T1), removiendo 34,3 kg N.t⁻¹ comparado con el de mayor extracción el cual fue el Tratamiento aplicado con 75% de cloruro (T5) con 39,1 kg N.t⁻¹, seguido por el tratamiento 4 y 3 con 37,97 y 37,5 kg N.t⁻¹, Respectivamente. y encontrando también, diferencias entre el tratamiento 2, aportando 0% de cloruros (36,7 kg N.t⁻¹) con respecto al de mayor extracción de Nitrógeno (T5). Se observa la tendencia de mejorar la respuesta de extracción del Nutriente Nitrógeno, cuando se reduce el contenido de Cloruros, sin descuidar realizar aportes de este micronutriente esencial para las plantas. Se obtiene, que los tratamientos a los cuales se les dispuso de contenido de 25, 50 y 75% de cloruros obtuvieron las mayores tomas de nitrógeno por tonelada producida.

Figura 1-11. Toma de Nitrógeno y Potasio por tonelada de café cereza





El potasio, aunque no se obtuvo diferencias estadísticamente significativas entre tratamientos, Demostró también tener una tendencia similar al nitrógeno, destacando la relevancia de disminuir el aporte de contenidos de cloruros para obtener mayor toma del elemento. El tratamiento con menores contenidos de toma de potasio fue el tratamiento (T1) que consistía de la aplicación de 100% de Cloruro, presentó la menor asimilación del potasio (K^+) en las plantas de café evaluadas con $36,85 \text{ kg K.t}^{-1}$, y en consecuencia los de resultados de mayores tomas de N fueron los de 50 y 75% de cloruro, ambos con 40 kg K.t^{-1} , poniendo en evidencia también la movilidad de este elemento y su capacidad de absorción, teniendo en cuenta que el periodo evaluado fue de 240 ddf, tiempo en el cual culmina su ciclo de maduración de los frutos de café.

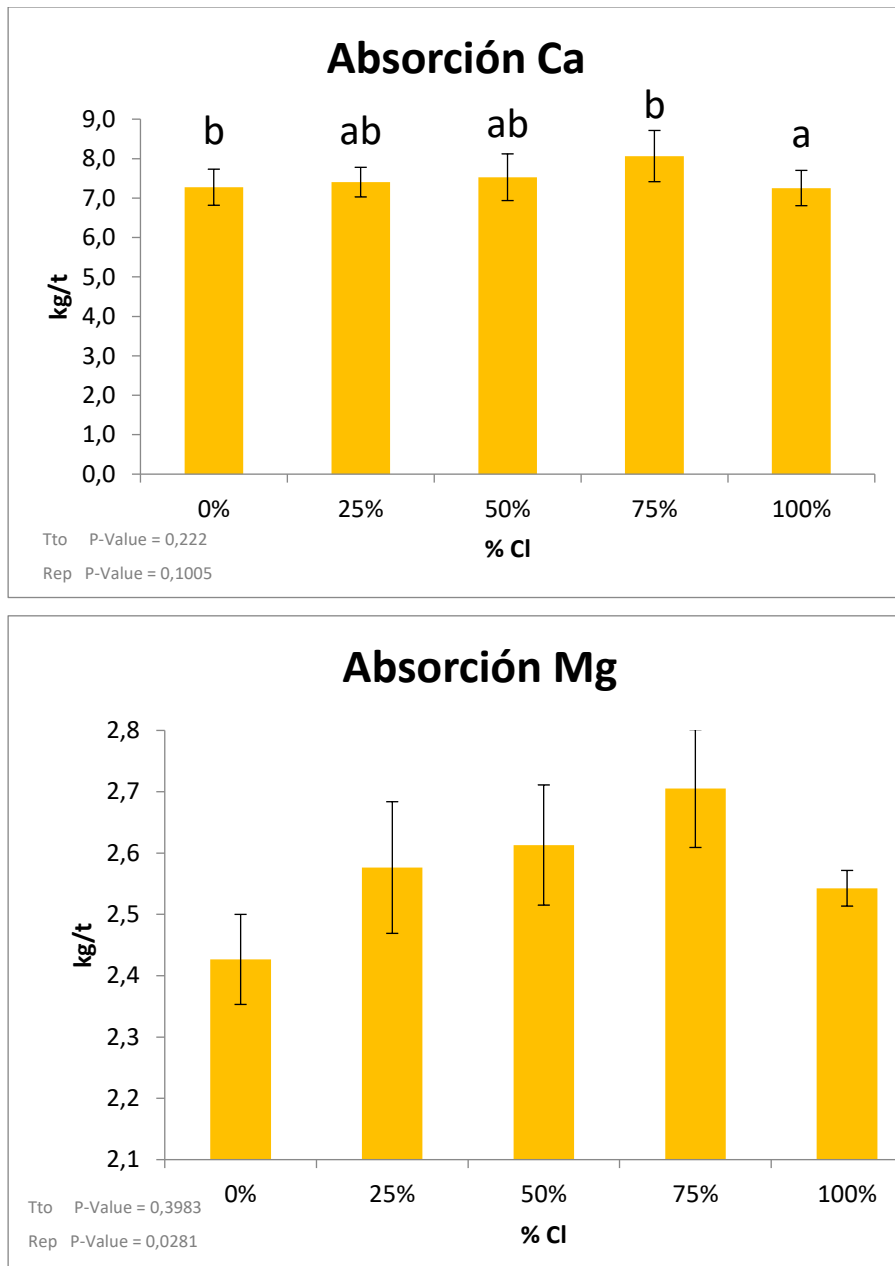
1.3.4.2 Toma de Calcio y Magnesio en frutos de café

En la Figura 1-12 se observa el efecto de la reducción de cloruros en la toma de los elementos Calcio y Magnesio, en los frutos de café a libre exposición solar.

Por su lado los elementos secundarios Ca y Mg, no presentaron diferencias estadísticamente significativas. Sin embargo, el calcio y el magnesio demostraron ser otros de los nutrientes extraídos mayoritariamente cuando es reducido el 25% de aportes de cloruros; extrayendo $8,06 \text{ kg Ca.t}^{-1}$ y $2,7 \text{ kg Mg.t}^{-1}$, además, reflejando el menor resultado

cuando no se cuenta con combinaciones de fuentes potásicas, extrayendo 7,2 kg Ca.t⁻¹ cuando se realiza aportes de cloruros al 100% (T1) y el Tratamiento con 0% aportes de cloruro manifestó las menores tomas de Magnesio con 2,4 kg Mg.t⁻¹.

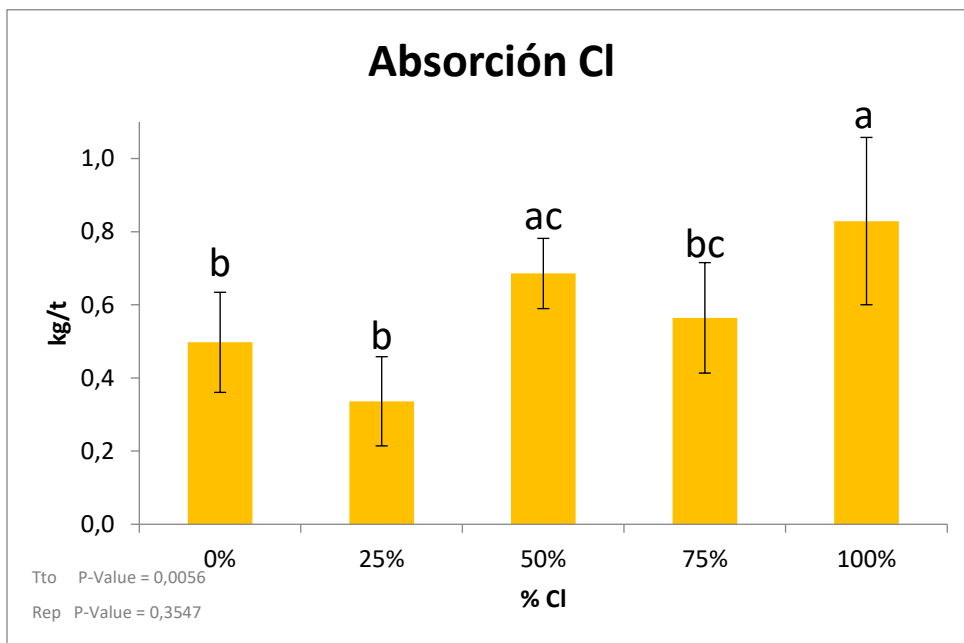
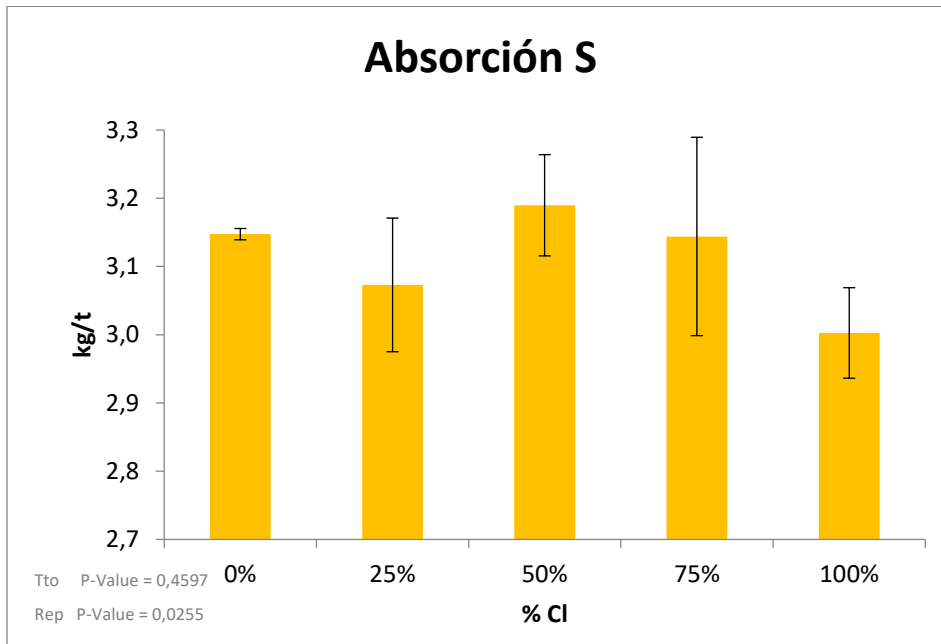
Figura 1-12. Toma de Calcio y Magnesio por tonelada de café cereza



1.3.4.3 Toma de Azufre y Cloro en frutos de café

En la Figura 1-13 se observa el efecto de la reducción de cloruros en la toma de los elementos azufre y cloro, en los frutos de café a libre exposición solar.

Figura 1-13. Toma de azufre y cloro por tonelada de café cereza



El azufre no presentó diferencias estadísticamente significativas, y también, al igual que los otros dos elementos secundarios, manifestó la menor extracción por tonelada cuando no son combinadas fuentes potásicas por su reducción de cloruros, encontrando que el tratamiento aportado con 100% de cloruros extrae la menor cantidad de este elemento: 3 kg S.t⁻¹, sin embargo se presentó una respuesta positiva al aporte del Tratamiento con 0% cloruros, ya que la fuente potásica empleada fue K₂SO₄, teniendo un valor de 3,14 kg S.t⁻¹, pero no mayor que al combinar las fuentes KCl y K₂SO₄ en el Tratamiento 3, aportando 50% de cloruros (3,19 kg S.t⁻¹).

El cloro, por su parte, presentó diferencias estadísticamente significativas entre tratamientos, y tuvo un comportamiento diferente a los demás nutrientes evaluados, presentando mayor asimilación en el tratamiento T1, el cual consistía en 100% cloruros, esto demostrado en el aporte del KCl como fuente empleada para este tratamiento, teniendo una extracción promedio de 0,83 kg Cl.t⁻¹ de café cosechado sin lavar (cereza o rojo).

Tabla 1-9. Resultados del análisis de varianza para la variable consumo de nutrientes

Fuente de Variación/Nutriente	N	K	Ca	Mg	S	Cl
	kg.t ⁻¹					
Tratamientos	0,0281*	0,239ns	0,222ns	0,398ns	0,459ns	0,005*
Bloques	0,0328*	0,0244**	0,1005ns	0,028*	0,025*	0,354ns

*P<0,05 significativo; **p<0,001 Altamente significativo

Tabla 1-10. Asimilación de nutrientes (kg.ha⁻¹) en función de los tratamientos evaluados a 240 ddf - días después de floración

Tratamientos	N (Kha ⁻¹)	K (Kha ⁻¹)	Ca (Kha ⁻¹)	Mg (Kha ⁻¹)	S (Kha ⁻¹)	Cl (Kha ⁻¹)
100%Cl	34.3 ^{a1}	36.8 ^a	7.2 ^a	2.5 ^a	3.0 ^a	0.8 ^d
0% Cl	36.7 ^b	38.9 ^b	7.3 ^a	2.4 ^a	3.1 ^a	0.5 ^b
50% Cl	37.5 ^c	40.0 ^b	7.5 ^a	2.6 ^a	3.2 ^a	0.7 ^c
25% Cl	37.9 ^c	38.9 ^b	7.4 ^a	2.6 ^a	3.1 ^a	0.3 ^a
75% Cl	39.1 ^c	39.9 ^c	8.1 ^a	2.7 ^a	3.1 ^a	0.5 ^b
Promedio	37.1	38.9	7.5	2.5	3.1	0.5
Significancia	*	*	ns	ns	ns	*

Letras diferentes denotan diferencias estadísticamente diferentes según prueba de Tukey (P-Value <0,05)

¹ Medias seguidas de letras iguales, en las columnas, no difieren significativamente de acuerdo con la prueba de Duncan, con una probabilidad del 5%.

1.4 Conclusiones

Se demostró, que al reducir el 25% de cloruros en la fertilización del café en producción, se aumentó la eficiencia en la toma del Nitrógeno por tonelada de café rojo o cereza producida, por tal motivo se podrá reducir aportes de fuentes nitrogenadas en programas de fertilización al tener en cuenta la reducción de cloruros, bajando los costos de producción a los caficultores, y a su vez contribuyendo a la reducción de impactos ambientales, ocasionados por el uso desmesurado de nitrógeno a los cultivos, evidenciándose en los problemas actuales de contaminación y huella de carbono en la atmósfera.

Se encontró que cerca del 80% de los nutrientes N, K, Ca, Mg y S son acumulados a partir de los 120 ddf, y que el nutriente Cl, responde a las aplicaciones de fertilizantes con cloruros y que estas a su vez concuerdan con periodos de transición de lluvias.

Finalmente se pudo comprobar la necesidad de la aplicación de cloro en el cultivo de café en etapas de producción, absorbiendo, acumulando, consumiendo y tolerando concentraciones de cloro en sus frutos, confirmando la esencialidad de este elemento para el cultivo; Además de su hábil movilidad para poder ingresar y salir de los frutos sin presentar ningún efecto negativo, incluso en tratamientos en donde superaba $175 \text{ kg Cl}^- \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{año}^{-1}$ a los aportes del macronutriente nitrógeno con $163 \text{ kg N} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{año}^{-1}$.

2. CAPITULO II

Efecto de la reducción de cloruros sobre la productividad del café (*Coffea arabica* L. Var. Castillo)

3. Introducción

Todas las plantas superiores incluidas el café, requieren de 16 elementos esenciales para su nutrición y desarrollo entre ellos este micronutriente (FNC 2008). En Colombia la Federación Nacional de Cafeteros (FNC), crearon el Centro Nacional de Investigaciones de Café, el cual recomienda alternativas de fertilización con fuentes simples para los cultivos de café en la etapa de producción, a través de fertilizantes en mezclas simples entre ellas KCl; por ejemplo, para un cafetal con alta densidad de plantas y poca sombra se sugieren 610 kg/ha/año de urea, 110 kg/ha/año de DAP, 430 kg/ha/año de KCl. (Sadeghian et al., 2012). La relación del potasio con la producción de café se atribuye a su participación en la translocación de compuestos foto-asimilados para la formación del grano de café, haciendo que se incremente su peso y volumen, así como también, posibilita la activación de la maduración del grano (Malavolta *et al.*, 1974; Cuzato *et al.*, 2014), por lo tanto, al momento en que el K es removido en grandes cantidades, especialmente en plantas de café bien nutridas y particularmente, en periodos de crecimiento y desarrollo vegetativo donde se presentan los mayores rendimientos (Silva *et al.*, 2001; Cuzato *et al.*, 2014).

El potasio, que es un recurso natural no renovable, se utiliza en la fertilización de cultivos principalmente en forma de cloruro de potasio (KCl) (Nogueira *et al.*, 2001; Ernani *et al.*, 2007; Moura *et al.*, 2016). Este elemento es el segundo nutriente más importante para el cultivo del café porque participa en la síntesis de proteínas, carbohidratos y trifosfato de adenosina (ATP); en la regulación osmótica; en tolerancia a plagas y enfermedades a través de una mayor resistencia; y en la permeabilidad de las membranas plasmáticas (Ernani *et al.*, 2007; Marschner, 2012; Moura *et al.*, 2016); y finalmente, influye en el desarrollo reproductivo del café, la producción de granos y la altura de la planta (Laviola *et*

al., 2006; Clemente *et al.*, 2013; Moura *et al.*, 2016), todas estas variables conllevando a una consecuencia positiva o negativa de la productividad.

No solo en el cultivo del café, sino que, en todo tipo de cultivo, el diagnóstico visual de la deficiencia de nutrientes asociada con la información sobre el contenido de nutrientes puede ser una adecuada herramienta auxiliar para evaluar el estado nutricional, lo que implica una adecuada recomendación de fertilización para cualquier cultivo (Epstein, 1975; Flores *et al.*, 2016). FAO (2000), en su guía del café, señala que el K, junto con el nitrógeno, son los dos nutrientes de mayor demanda por la planta en todas las etapas del cultivo y los que más se remueven por la cosecha, es así como se transforma en un aspecto fundamental que incide directamente en los costos de producción, productividad del cultivo y finalmente la rentabilidad. Vale la pena recordar que, para un crecimiento y productividad óptimos, las plantas de café requieren nutrientes adecuados en las cantidades requeridas (Ali, 1999; Dawid y Hailu, 2018). Al fertilizar las plantas de café, dos aspectos distintos deberían ser considerados: i) la compensación de las deficiencias reales; ii) los insumos necesarios para contrarrestar el detrimento nutricional causado por la lixiviación (Snoeck y Lambot, 2005; Dawid y Hailu, 2018).

Con respecto a la dosis de K que se recomienda aplicar en cultivos de café, Viana *et al.*, 1989; Silva *et al.*, 2001, obtuvieron una mayor producción cuando se usaron dosis más altas, lo que influyó positivamente en la cosecha del año siguiente debido a que las aplicaciones de fertilización potásica realizadas durante el primer año tuvieron poco efecto en la producción. El término eficiencia nutricional se utiliza para caracterizar a las plantas en su capacidad de absorción y utilización de nutrientes. La eficiencia nutricional también está relacionada con la producción económica por unidad de fertilizante aplicado y la eficiencia de absorción, translocación y uso de nutrientes (Baligar & Fageria, 1998; Martins *et al.*, 2015). Flores *et al.* (2016), argumentan que las plantas de café que no reciben potasio presentan una reducción en el número de hojas. un detrimento en la conductividad estomática, lo cual es clave para una óptima fotosíntesis y otras funciones ecofisiológicas del café y también pueden mostrar un incremento en la concentración interna de CO₂; resultando en una producción de materia seca de raíces más bajas (Flores *et al.*, 2016).

Los síntomas de deficiencia de potasio generalmente pueden ser localizados en hojas más maduras y puede tornarse en una banda clorótica y de color marrón oscuro a lo largo de

los márgenes de las hojas (Nagao *et al.*, 1986), observando la forma en que quedan las plantas de café en su mayoría de veces con baja productividad, teniendo al final estas descripciones previamente a la cosecha y en algunas oportunidades después de su producción. Por último, se someten a obtener cosechas bianuales por tener condiciones bajas de nutrición, las cuales en el siguiente año las plantas se encuentran obligadas a disminuir su productividad por iniciar un proceso de recuperación.

Para obtener altos rendimientos, el café extrae grandes cantidades de algunos macronutrientes y nutrientes secundarios, teniendo como principal nutriente removido en las cosechas el K^+ con una extracción de 44,34 K_2O por tonelada, seguidos del N: 30,94; P_2O_5 : 5,18; CaO: 5,96; MgO:3,75; SO_4 : 3,63 kg de Nutrientes por tonelada producida (Sadeghian *et al.*, 2006). Las plantas de café necesitan este nutriente tanto como el N, para generar tolerancia contra enfermedades especialmente fúngicas, además de prevenir el estrés hídrico al regular la presión de la turgencia celular, al influir en la apertura y cierre estomático. Los efectos del Cl en el desarrollo del café se ve aplicado por el uso constante de KCl. El potasio tiene implicaciones fundamentales para la producción de granos de café, especialmente en la regulación de la pérdida de agua, el llenado y maduración de granos. Por este hecho, hay estudios que se centran en destacar las implicaciones de la eficiencia nutricional del K en el cultivo del café (Martins y Furlani, 2010).

Las fuentes utilizadas para reducir el aporte de cloruros como fertilizantes en la presente investigación, se componen esencialmente de KCl (K_2O 60% y Cl 45%) y SOP (K_2O 50% y S 18%), los cuales fueron las bases en los programas de fertilización, proporcionando los demás elementos: N, P, Ca y Mg y determinando la productividad del café a partir de la acumulación, absorción, concentración y consumo de estos nutrientes en cuestión por los granos de café, para finalmente hallar los rendimientos y productividades esperadas en Garzón-Huila, Colombia, las cuales se exponen en el presente capítulo.

4. Materiales y métodos

4.1.1 Área de estudio

El estudio fue llevado a cabo en una plantación de café, ubicada en la finca Lusitania, finca de vocación cafetera localizada en el corregimiento de El Mesón perteneciente al municipio de Garzón- Huila, Colombia ubicada a 02°10'49'' Latitud Norte, 75°35'99'' Longitud Oeste y a una altitud de 1437 m.s.n.m.; una temperatura promedio de 20°C y una precipitación promedio anual de 2653 mm de acuerdo a los registros pluviométricos anuales obtenidos de la estación meteorológica más cercana de la FNC-Federación Nacional de Cafeteros de Colombia, la estación Villa Consuelo en Garzón-Huila, Colombia ubicada a 02° 11' 75° 34' y a una altitud de 1570 m.s.n.m. El estudio fue llevado a cabo en una plantación de café, ubicada en la finca Lusitania, finca de vocación cafetera localizada en el corregimiento de El Mesón perteneciente al municipio de Garzón- Huila. La presente investigación tuvo una duración de dos años, iniciando en el mes de enero del 2017 hasta enero de 2019.

4.1.2 Material vegetal

El lote experimental contaba con un área de 900m² sembrado con café cultivar Castillo. El cv. Castillo posee tolerancia a la roya del café y probable tolerancia a la enfermedad de las cerezas del café. La variedad . Castillo, se caracteriza porque las hojas se disponen en el tallo casi verticalmente, dando una sensación de adormecimiento y la altura total promedio es de 2,3 m. Durante la selección de esta variedad, se le dio prioridad al tamaño de grano (proporción de grano supremo > 80%) y a la productividad, con base en su comportamiento en regiones específicas de Colombia (Alvarado *et al.*, 2005; Cortina Guerrero *et al.* 2012; Zapata *et al.*, 2017).

La edad de las plantas de café en la cual se realizó la apertura de las aplicaciones de los tratamientos fue de 12 meses después de la zoca, periodo en el cual se inició su floración, su primera cosecha fue a los 20 meses aproximadamente, sobre las cuales se realizaron los registros de toma de datos tanto de productividad como de calidad de las plantas de café. La densidad de siembra fue de 6,666 plantas. ha⁻¹ a una distancia de 1 x 1.5 m a tres bolillos. A partir de diciembre de 2017, se iniciaron las aplicaciones de los respectivos tratamientos que constaban de fuentes alternativas de potasio hasta la recolección de la cosecha principal, la cual fue realizada entre octubre y noviembre de 2018.

4.1.3 Variables meteorológicas e incidencia en los tratamientos

Las aplicaciones con los tratamientos de fertilización diferenciada coincidieron con los periodos de pluviosidad en el área de estudio, el cual comprendió desde diciembre-2017 a marzo-2018, siendo más pronunciado entre octubre y noviembre de 2018 (ver Figura 2-1); este escenario coincidió con las posibles afectaciones relacionadas con la concentración de cloruros en el lote experimental. La Tabla 3-1, muestra los registros climatológicos de la estación meteorológica más cercana al área de estudio, la estación Jorge Villamil de la FNC-Federación Nacional de Cafeteros.

Tabla 2-1. Características de la disponibilidad de energía radiante y térmica en Garzón-Huila, Colombia

Año	Latitud N	Longitud W	Altitud m.s.n.m	Brillo solar h.año ⁻¹	Brillo solar h.día ⁻¹	Temperatura (°C)			Amplitud termica
						Min	Med	Max	
2017	2' 20"	75' 31"	1420	1146.7	3.14	16.9	24.6	20.2	3.3
2018	2' 20"	75' 31"	1420	770.9	2.11	16.5	20.2	25.0	8.5
2019	2' 20"	75' 31"	1420	1314	3.6	16.1	19.4	23.8	7.7

Fuente: FNC-Cenicafé (2017, 2018, 2019).

Además de presentar los siguientes reportes de precipitaciones según los meses en el año en la Finca Lusitania.

Tabla 2-2. Precipitaciones periodo de estudio 2017-2018-2019 Finca Lusitania

	2017	2018	2019
	Precipitación (mm)	Precipitación (mm)	Precipitación (mm)
Acumulado	2483	2053	2319
Promedio/mes	207	171	193
mm/máx	402	379	376
Mm/min	43	54	44

4.1.4 Muestreo de productividad

Para evaluar el estatus productivo para cada uno de los tratamientos del presente trabajo de investigación de las plantas de café, se tomaba el peso de los frutos maduros de las 6 plantas previamente seleccionadas en el centro de los tratamientos (Planta efectivas, Figura 1-1), iniciando a partir de julio de 2018.

La cosecha principal de los tratamientos a evaluar consistió en el periodo correspondiente a los meses de Septiembre – Octubre y Noviembre de 2018, los cuales fueron consecuencia de las floraciones ocurridas en los meses de Enero – Febrero de ese mismo año, además de tomar registros de todas las recolecciones de frutos maduros durante los años de estudio, garantizando la respuesta del programa nutricional propuesto previamente, ajustando las reducciones de Cloruros para cada uno de los tratamientos descritos en el Capítulo 1, a su vez se continuó con el diseño estadístico, establecimiento

del experimento, tratamientos a evaluar y arreglo experimental descrito también en el Capítulo anterior.

Se realizaba monitoreos quincenales de los frutos de café, evaluando una vez llegaran a su etapa fenológica de maduración, pronosticando aproximadamente 240 días después de la floración - ddf. Al momento de la maduración se recolectaban únicamente los frutos completamente maduros de cada tratamiento y de cada repetición (nunca homogenizándolos), recolectando las 6 plantas seleccionadas, posteriormente se realizaba el pesaje de los frutos maduros, luego se sometía al proceso de despulpado, lavado y secado, en los cuales se tomaban los datos de las variables como se muestra en la siguiente tabla:

Tabla 2-3. Variables de productividad

DATOS PRODUCTIVIDAD R&D (CAFÉ MADURO)					
Fecha	N° UE	Peso Cereza (gr)	Peso Mojado (gr)	Peso Seco (gr)	Peso Trilla (gr)

Estas plantas previamente seleccionadas, se dejaron desde el momento de la floración hasta que sus frutos completaron los días para ser cosechados según criterio visual de coloración de los frutos del café Castillo. Pesando en cada recolección los frutos maduros, despulpados, lavados, secos, trillados y además tomando en el pico máximo de producción en el año porcentaje de Brix/Tratamiento.

4.1.5 Diseño experimental

Se realizó un diseño experimental de bloques completos al azar (BCA) con cinco tratamientos y 4 repeticiones para determinar el efecto del cloro como ión acompañante del potasio en la productividad del café, tal y como se describió en el Capítulo 1. Se empleó el mismo lote experimental de 900 m², con 20 unidades experimentales (UE) y los tratamientos descritos en el Capítulo anterior. Seleccionando 6 plantas centrales de los tratamientos, a las cuales se conservaba los frutos de café hasta su punto de maduración (Plantas efectivas, Figura 1-1).

Tabla 2-4. Descripción de los tratamientos y aportes de cloruro y sulfato por tratamiento y por año

Año.	Tratamiento	% Cl Aplicado	kg. ha ⁻¹ .año ⁻¹ .		
			K ₂ O	S	Cl
2017	1	100	104	0	80
	2	0	107	38	0
	3	50	105	19	40
	4	25	108	29	21
	5	75	107	10	61
2018	1	100	228	29	175
	2	0	227	96	0
	3	50	225	41	86
	4	25	229	62	43
	5	75	228	22	129
2019	1	100	356	44	273
	2	0	360	174	0
	3	50	360	109	138
	4	25	363	140	74
	5	75	361	78	205
2020	1	100	360	59	276
	2	0	360	188	0
	3	50	360	123	138
	4	25	366	156	74
	5	75	354	91	202

Tabla 2-5. Aplicación de cloruros según fecha de aplicación

Fecha de Aplicación	Aplicación kg/ha de Cloruros				
	T1	T2	T3	T4	T5
Septiembre-17	80	0	40	20	60
Diciembre-17	0	0	0	0	0
Febrero-18	93,3	0	40	20	66,6
Junio-18	80	0	0	0	0
Octubre-18	0	0	40	20	66,6
Diciembre-18	53,3	0	26,6	13,3	40
Marzo-19	160	0	80	40	120
Junio-19	53,3	0	26,6	13,3	40
Diciembre-19	93,3	0	46,6	26,6	66,6
Marzo-20	93,3	0	46,6	26,6	66,6
Junio-20	93,3	0	46,6	26,6	66,6

Tabla 2-6. Aplicación de productos de fertilizante en épocas del año

Fecha de Aplicación	Producto	Gramos/planta				
		T1	T2	T3	T4	T5
sep-17	SOP		32	16	24	8
	KCL	26		13	7	20
	YaraBela Nitromag	40	40	40	40	40
feb-18	SOP		38	17	26	9
	KCL	30		14	7	21
	DAP	5	5	5	5	5
	Kieserita	10	10			
	YaraLiva Nitrabor	25	25	25	25	25
	MgO			5	5	5
jun-18	YaraBela Nitromag	35	35	35	35	35
	DAP	5	5	5	5	5
oct-18	SOP		30	17	26	9
	KCL	27		14	7	21
	DAP	5	5	5	5	5
	Kieserita	10				
	UREA	20	20	20	20	20
	YaraLiva Nitrabor	10	10	10	10	10
dic-18	MgO		5	5	5	5
	SOP		23	11	16	6
	KCL	18		9	5	14
	DAP	30	30	30	30	30
	YaraLiva Nitrabor	40	40	40	40	40
mar-19	MgO					
	SOP		63	32	48	16
	KCL	53		27	14	40
	Kieserita	30	30	30	30	30
	UREA	40	40	40	40	40
jun-19	YaraLiva Nitrabor	20	20	20	20	20
	SOP		22	11	16	6
	KCL	18		9	5	13
dic-19	UREA	20	20	20	20	20
	SOP		36	18	27	9
	KCL	30		15	8	22
	DAP	30	30	30	30	30
	Kieserita	10	10	10	10	10
	UREA	10	10	10	10	10
mar-20	YaraLiva Nitrabor	50	50	50	50	50
	SOP		36	18	27	9
	KCL	30		15	8	22
	Kieserita	30	30	30	30	30
	UREA	40	40	40	40	40
jun-20	YaraLiva Nitrabor	20	20	20	20	20
	SOP		36	18	27	9
	KCL	30		15	8	22
jun-20	UREA	20	20	20	20	20

Tabla 2-7. Descripción del aporte nutricional durante el periodo del estudio

Año	N	P2O5	K2O	CaO	MgO
kg.ha-1.año-1					
2017	56	0	106	29	20
2018	163	46	227	86	28
2019	280	46	360	104	54
2020	321	92	360	121	72
Promedio	205	46	263	85	44

4.1.6 Análisis de datos

Se establecieron cinco tratamientos, y cada uno fue seleccionado con 120 zocas de café de cero (0) meses de desarrollo. Como variable de respuesta, se registró la producción de café en cereza para cada una de las cuatro repeticiones, numeradas del 1 al 20 durante todo su ciclo productivo. Para ello, se tomaron a partir de seis (6) plantas de café seleccionadas en cada repetición, las cuales estaban ubicadas en el centro de los tratamientos. Se utilizó un diseño de Bloques Completos al Azar (BCA), donde las parcelas fueron los bloques; los tratamientos (las dosis configuradas de acuerdo con las proporciones de aplicación de cloruros) fueron establecidos como sigue: T₁ = Testigo, el cual constó 100% Cloruro; T₂ = 0% Cloruro; T₃ = 50% Cloruros; T₄ = 25% Cloruros; T₅ = 75% Cloruros.

Con los datos obtenidos a partir de la aplicación de los tratamientos de fertilización diferenciada en las plantas de café, se realizó un análisis de varianza (ANOVA) y se realizó la respectiva corrección con intervalos al 95% de confianza para los promedios de mínimos cuadrados.

5. Resultados y discusión

La reducción de los cloruros, diseñados alternando fuentes potásicas (KCl y SOP), se realizó con el objetivo de cuantificar rendimientos del café durante los dos primeros años productivos, garantizando el impacto de esta reducción obteniendo aumentos en la producción de frutos de café.

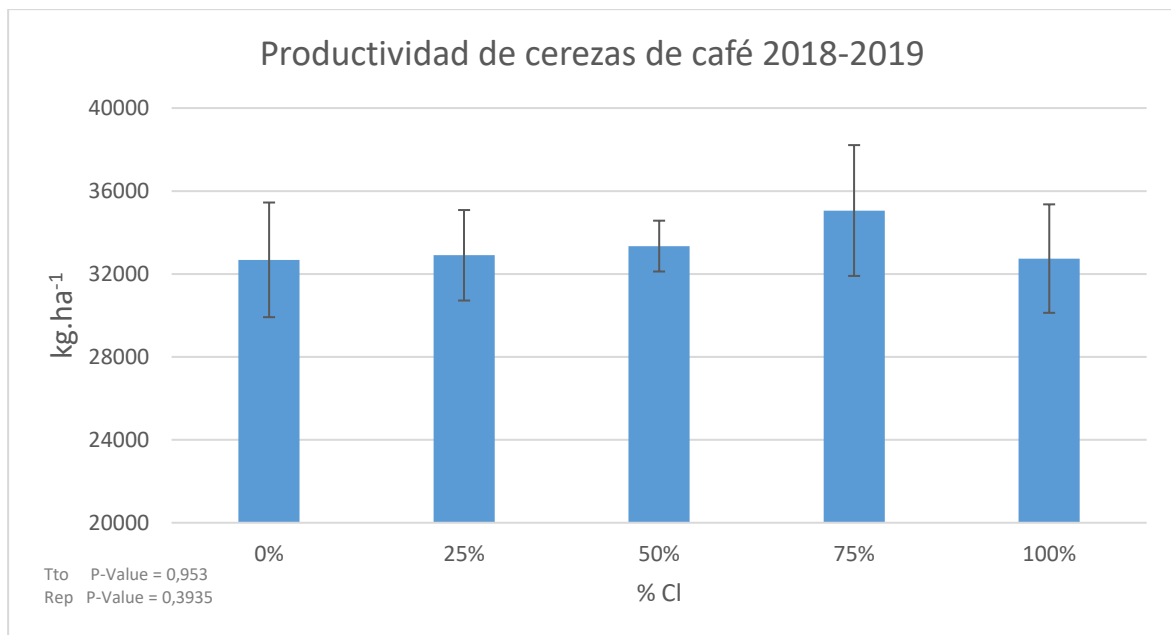
5.1 Resultado de la reducción de cloruros en la productividad del cultivo de café

El presente capítulo se enmarca en lo que es la productividad del café bajo la influencia de reducciones de cloruros, realizados por las dos fuentes alternativas de potasio: KCl (60% K₂O) y SOP (50%K₂O) en un escenario particular y fue el de 240 ddf (días después de floración) durante el primer periodo de evaluación que comprendió 2017/2018 y posteriormente la productividad de la cosecha 2018/2019 en la Finca Lusitania en Garzón-Huila, Colombia. Los resultados preliminares de este trabajo de investigación son de dos años de cosechas, los cuales se continúan hasta obtener cuatro (4) años continuos de producción del café, recomendable para analizar el rendimiento durante todo el ciclo productivo, los cuales culminarán en el año 2021.

5.1.1 Producción acumulada de café de los años 2018 y 2019

En la figura 2-1, se observa el impacto en la reducción de cloruros, sobre la producción acumulada de café rojo o cereza en los años 2018 y 2019.

Figura 2-1. Productividad de café: Cosecha acumulada periodos 2018 y 2019



La acumulación de producción de los años 2018 y 2019 no presentaron diferencias estadísticamente significativas entre los tratamientos, el T5 (75% Cl⁻) y T3 (50% Cl⁻), lograron evidenciar que el rendimiento de las plantas de café evaluadas se incrementa en la medida que es afectado por las reducciones de cloruros, demostrando que el mayor incremento en el rendimiento fue influenciado mediante la aplicación de 228 kg.ha⁻¹ de K₂O, 22 S y 129 Cl⁻, teniendo una reducción de 25% de Cloruro comparado con el Tratamiento control 100% y 0% Cl⁻, el cual obtuvo una disminución en productividad de -6,6% y -6,8% respectivamente. Resultados similares fueron descritos por Cuzato *et al.*, (2014), donde evidenciaron los mayores rendimientos del café se obtiene cuando es aportado 220 kg de K₂O en cv Mundo Novo de dos años de producción, sin embargo, es independientemente de la fuente aplicada de Potasio, observando la relevancia del balance nutricional en café, aportando mínimo esta cantidad de K₂O.

En esta región cafetera, donde se llevó a cabo el presente estudio, frecuentemente y con datos aportados por diversas investigaciones tales como la conducida por Ramírez *et al.*, (2014), el fenómeno de El Niño siempre lleva como consecuencia un aumento en la productividad, debido a factores climáticos como la sequía, pueden influir significativamente en las floraciones de las plantas de café; sin embargo, si se presentara

el escenario de prolongación del periodo de sequía entre un periodo de 30 a 90 días después de floración, se puede lograr una afectación en la productividad y calidad del cultivo del café, también confirmado por Encalada *et al.*, (2016), donde la productividad de un cultivo tiene una estrecha relación entre el clima y los procesos fisiológicos; además, una productividad efectiva no solo depende de la intensidad del estímulo climático sino también de su secuencia temporal a través de todo el ciclo del cultivo.

El potasio (K^+), nutre las plantas de café y con ello, ayuda a obtener incrementos en cosecha y le aporta al cultivo una tolerancia notable en contra de las enfermedades y plagas que más lo afectan, e incluso, aporta vigor a las plantas frente a las condiciones adversas del clima; aunque en el área de estudio no se presentó ninguna fluctuación significativa de variables climatológicas durante el periodo de evaluación (2017-2018), se evidenció que las plantas de café evaluadas estaban provistas de un adecuado nivel de nutrición gracias al aporte de las fuentes alternativas de potasio aplicadas en la presente investigación (KCl y SOP) para todos los Tratamientos establecidos. La Tabla 2-7 expone los efectos de los tratamientos evaluados aquí (fuentes alternativas de potasio a diferentes concentraciones de cloruros) sobre su incidencia en los requerimientos nutricionales de las plantas de café, determinaciones que se realizaron en términos de $kg\cdot ha^{-1}$ y $g\cdot pl^{-1}$ (Tabla 2-6 y 2-7). De acuerdo a lo expuesto, el tratamiento T5, KCl (75%) + SOP (25%), aportando 75% de cloruro, evidenció una mayor respuesta en las plantas de café tanto en $kg\cdot ha^{-1}$ como en $g\cdot pl^{-1}$, no pudiéndose demostrar exceso alguna en las evaluaciones por aportes de cloruros y monitoreos realizados en condiciones de campo sobre las plantas de café evaluadas en la presente investigación.

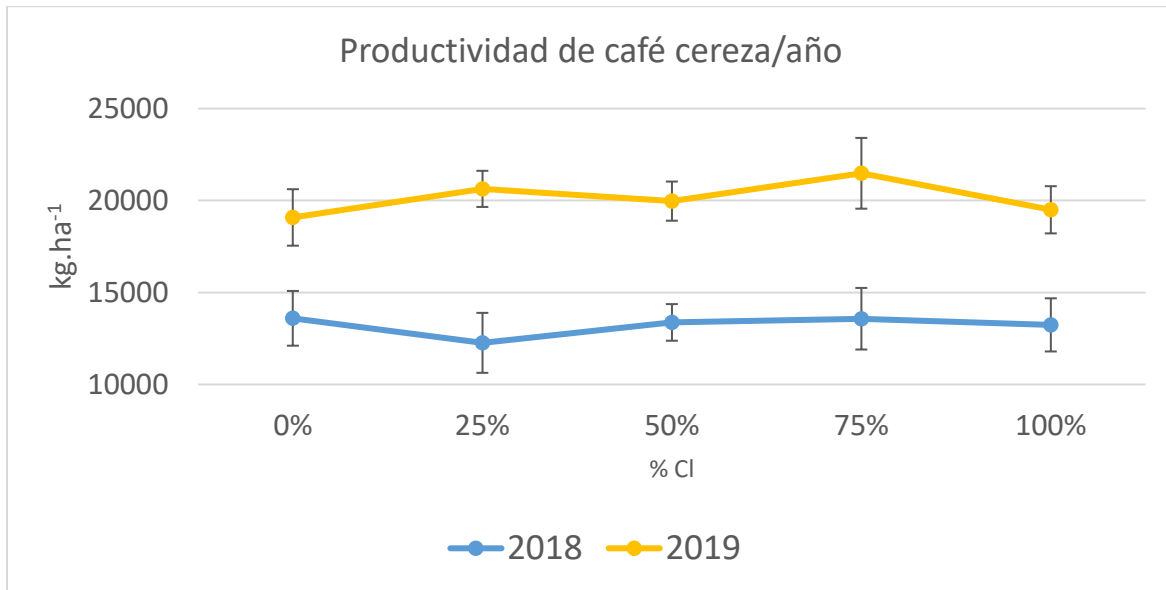
Luego de realizar las recolecciones y análisis de la información, se puede inferir que una adecuada aplicación de cloruros en las fuentes de fertilizantes potásicos trae consigo un efecto significativo en la mejora de la productividad de las plantas de café, debido a que se logra una apropiada nutrición del cultivo y balance nutricional descrito en el Capítulo 1. La Figura 2-1, expone la influencia de las reducciones de cloruros sobre el rendimiento de cerezas de café en el periodo del presente trabajo de investigación, en donde, los tratamientos T5 y T3 tuvieron una productividad similar y significativamente mejor, en comparación con el control y los otros tratamientos (Figura 2-1).

Este resultado puede ser explicado en parte por la mayor concentración de potasio en las dosis de K_2O aplicadas. La cantidad de K_2O en T5 (75% CI) (Tabla 2-7) se estableció en función de la alta expectativa de producción, lo cual resulta un escenario común en todos los tratamientos y la cantidad de K_2O en el T3 (50% CI), fue capaz de aportar K^+ con más concentración por gramos aplicados en la nutrición, partiendo del hecho de que su absorción y eficiencia del Potasio parte en la capacidad de las plantas de absorber este elemento por difusión, teniendo mejores resultados de productividad por su rápida absorción y la relación de disminuir la cantidad de cloruros resulta interesante a la hora del aumento en producción del café.

5.1.2 Productividad de café en los años 2018 y 2019

En la figura 2-2, se observa la respuesta de la productividad de café rojo o cereza a libre exposición solar en los años 2018 y 2019, sobre la reducción de cloruros.

La respuesta en productividad durante los dos años evaluados con relación a la reducción de cloruros no arrojó diferencias estadísticamente significativas. Sin embargo, se confirma lo descrito en cuanto a la correlación del aumento de productividad con respecto a la edad de las plantas, resultados similares a los encontrados por Barros *et al.*, (1999), en los cuales se aumentó 7 sacos beneficiados de 60 kg, entre los años 1993 y 1994 para todos los tratamientos de fuentes y dosis de potasio (KCl , K_2SO_4 y $K_2SO_4 \cdot 2MgSO_4$), y resultados contrarios a los reportados por Silva *et al.*, (2001), donde reporta la alternancia de producción en años de buenos rendimientos y años de bajos rendimientos durante su estudio en café cv Catuaí en los años 1995 a 1998 con fuentes variadas de KCl , SOP y KNO_3 . En los cuales se considera importante en cultivos de café tener aumentos continuos entre los años, considerando esta consecuencia debido a estados nutricionales óptimos de las plantas de café.

Figura 2-1. Productividad de cerezas de Café durante los años 2018 y 2019

El tratamiento con mayor incremento absoluto entre el año 2018 vs 2019 fue el T4 (25% Cl) y T5 (75% Cl), con 68,3% y 58,2% respectivamente, observando la positiva respuesta a la reducción de cloruros en cuanto al aumento en productividad, resultados corroborados por Barros et al., (1999), quienes mencionan que los mayores aumentos de productividad fueron los obtenidos por fuentes de SOP y los de menor productividad fueron los tratamientos a los cuales se les aplicó fuente de KCl, teniendo una reducción de 11,7 sacos beneficiados de 60 kg. Sin embargo, en la presente investigación, los tratamientos que presentaron menores incrementos absolutos, fueron los tratamientos a los cuales se les aplicó 100% Cl⁻ (T1) y 0% Cl⁻ (T2) con 47,3% y 40,3%, teniendo como referencia la esencialidad de este elemento y la importancia de la reducción de cloruros en los programas nutricionales, es decir, se debe realizar aportes de forma balanceada sin tener que llevarlos a excesos de este elemento o a déficit, También, Cuzato *et al.*, (2014), reportó la positiva respuesta en la productividad del café cuando existe interacciones y balance con dosis aplicadas de una fuente de roca potásica (F2 – Ekosil), comparada con aplicaciones tradicionales de KCl.

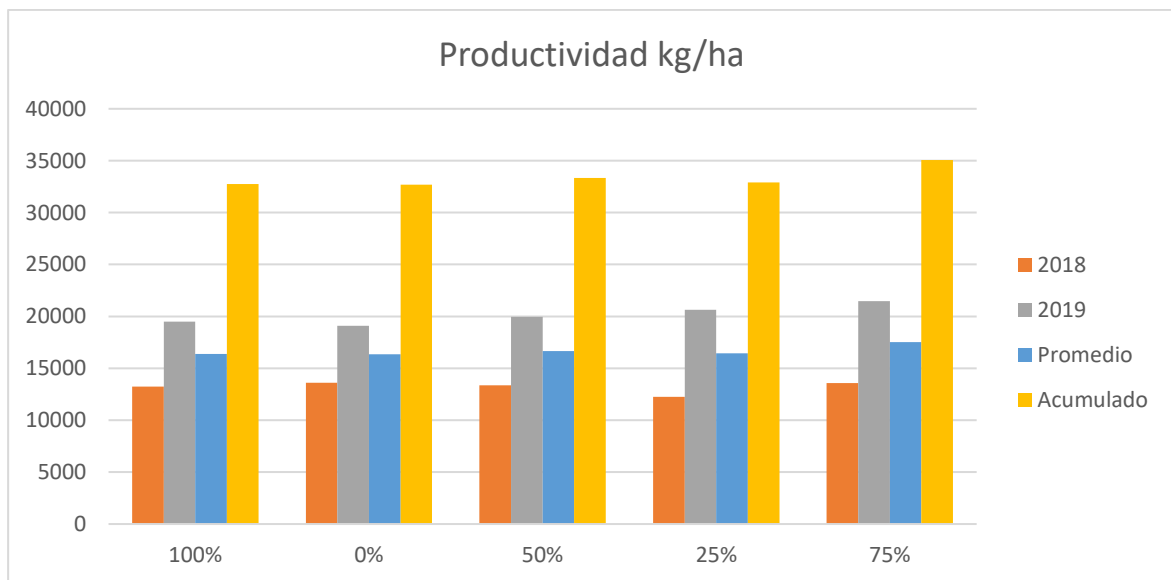
Se consideró que la producción de café fue mayor en el segundo periodo de evaluación que en el primero (Figura 2-2). Por lo tanto, se logra demostrar que la demanda de K⁺ por

parte del cultivo de café fue mayor en el segundo periodo de evaluación, especialmente en la etapa de producción de frutos y granos con un modelo lineal de respuesta de tasa de K^+ . Para evitar que los caficultores cuenten con periodos alternativos de producción (mayor producción cada dos años), requiriendo tener una buena relación entre frutos y niveles foliares (Relación Fuente Vertedero), implicando que las plantas de café cuenten con suficientes hojas en un año para mantener una gran producción en el año siguiente. El potasio estimula el llenado y la maduración del grano de café, aumentando su peso y volumen (Malavolta *et al.*, 1974; Cuzato *et al.*, 2014; Gonçalves *et al.*, 2018), razón por la cual es importante reducir sus iones acompañantes para garantizar un equilibrio nutricional

5.1.3 Productividad por hectárea de café rojo o cereza

En la figura 2-3, se observa la respuesta de la productividad de café rojo o cereza a libre exposición solar por hectárea en los años de investigación 2018 y 2019, sobre la reducción de cloruros.

Figura 2-2. Productividad del café durante los dos primeros años productivos



Durante la etapa fenológica de producción del fruto en el cultivo de café, Carvajal (1984), observó que la planta manifiesta síntomas de exceso de Cl⁻, cuando es medido y alcanza niveles superiores de 2875 ppm en el cuarto par de hojas, pudiendo observar quemaduras asociadas a este exceso del elemento.

Cuando se presentan aportes bajos del potasio, la planta absorbe una mínima parte (aproximadamente 2% de acuerdo con Malavolta, 1986; Cuzato et al., 2014) de este elemento en el suelo, siendo incapaz de suplementar y completar el llenado del grano en su etapa fenológica de crecimiento y provocando el aborto de algunos frutos; el resto del elemento es retenido por los minerales primarios del suelo (Anschütz et al., 2014), sin embargo, este escena no se presentó en el presente estudio bajo las condiciones agroecológicas en la finca Lusitania, obteniendo llenados de frutos y producciones esperadas para todos los Tratamientos evaluados, además de controlar el manejo de arvenses, plagas y enfermedades, reduciendo de manera considerable las covariables.

Tabla 2-1. Resultados del análisis de varianza para la variable rendimiento

Fuentes de Variación	Cosecha 2018	Cosecha 2019	Acumulado 2018 + 2019
Tratamientos	P-Value= 0,9572	P-Value= 0,8071	P-Value= 0,953
Bloques	P-Value= 0,2621	P-Value= 0,8157	P-Value= 0,3935

Significativo * p<0,05; Altamente significativo ** p<0,01

6. Conclusiones

Determinar las productividades y sostener aumentos en los años posteriores, es una de las variables de mayor importancia para los agricultores, y objetivo principal para la caficultura colombiana. La reducción de cloruros al 25% y 75%, presentó mejores incrementos absolutos entre los años productivos, Por tanto, reduciendo 25% de los aportes de cloruros, se logra aumentar 6,6% de la producción en dos años productivos, según las variables de la presente investigación.

Además, al reducir los cloruros con el 25%, no se presenta alternancia de producciones en los años, manteniendo un aumento sostenido. En este sentido, un balance en los aportes de Cl⁻ debe ser incluida en el programa nutricional para café en producción, ya que es considerado un elemento esencial para las plantas. De esta manera, se pudo mantener una adecuada relación Fuente – Vertedero, a través de una correcta nutrición, confirmando un incremento en la longevidad y producción del café.

7. CAPITULO III

Efecto de la reducción de cloruros sobre la calidad del café (*Coffea arabica* L.)

8. Introducción

El interés actual en la investigación a la par con el aumento en el consumo de café, están asociados con la discusión y difusión de los efectos benéficos para la salud humana atribuidos a las bebidas de café (Butt y Sultan, 2011; Sorane *et al.*, 2014), entre los que se encuentran propiedades protectoras contra enfermedades crónicas, como cáncer, diabetes y obesidad (Alkaltham *et al.*, 2020). Además, está demostrado que el sabor y el aroma del café son el resultado de la presencia de componentes volátiles, cafeína, proteínas, aminoácidos, ácidos grasos, compuestos fenólicos y la acción de las enzimas en algunos de estos componentes produciendo compuestos que afectan la calidad del café a nivel taza (Clemente *et al.*, 2015; Sorane, *et al.*, 2014). Los ácidos clorogénicos son los principales compuestos fenólicos no volátiles encontrados en el café y son los responsables de su astringencia (Clemente *et al.*, 2015).

Los cafés de calidad superior son aquellos que poseen compuestos químicos responsables del sabor y aroma tales como la cafeína, trigonelina, aldehídos, furanos, cetonas, azúcares, proteínas, aminoácidos, pirrol, piridina, pirazina, oxazol, ácidos carboxílicos, ácidos grasos y compuestos fenólicos en una proporción equilibrada para obtener buen cuerpo, acidez y suavidad de la bebida (Clemente *et al.*, 2015). El café posee sabores básicos cuya intensidad depende de factores como la zona de cultivo, el suelo, la recolección del fruto, el cultivar, procesamiento, el nivel de tostado, entre otros. La evaluación sensorial nos permite encontrar y valorar todas las características que definen su calidad. La bebida del café es el resultado de esta serie de procesos por los que pasa el grano, y tiene ciertas características derivadas de un complejo número de componentes químicos (SCAN, 2012). La producción de compuestos bioactivos relacionados con deseable sabor y aroma, implican reacciones químicas extremadamente complejas, en las

que algunos nutrientes minerales como el N, K, P, Mg, S, entre otros, desempeñan un papel clave (Clemente *et al.*, 2015).

Los fertilizantes son necesarios tanto para el crecimiento vegetativo de las plantas de café, como para la producción de granos de café de alta calidad (Njoroge, 1998; Pinkert, 2004). Los desequilibrios nutricionales pueden afectar significativamente la calidad del grano de café (Njoroge, 1997; Pinkert, 2004). Por el contrario, un equilibrio de nutrientes (N, P, K, Mg, Ca, S, Zn, Cu, Fe, B, Mo) en el suelo, promueve una mejor calidad del grano de café y se ha demostrado que el equilibrio de Ca + Mg / K es especialmente importante para este fin y para lo cual, debería estar en el orden de 4 y 10 (Njoroge, 1998; Pinkert, 2004). Los altos niveles de K y Ca acumulados en el grano de café tienden a reducir la calidad de los granos debido al desequilibrio que se presenta con el magnesio (Pinkert, 2004). Estudios recientes han asociado la nutrición mineral con la calidad del producto cosechado (Clemente *et al.*, 2015). Para el caso del café, que es un cultivo perenne, la información disponible sobre la relación entre la nutrición mineral y la calidad es más bien escasa. En el presente estudio, se le adjudica al potasio un papel preponderante en este sentido, al evaluar reducciones de cloruros aportados en programas nutricionales como ion acompañante de este elemento, alternando dos fuentes de potasio para tal fin, ellas son: KCl (60% K₂O) y K₂SO₄ (50% K₂O). Dadas estas condiciones, se plantea que el potasio contribuye a la calidad del café a nivel taza, al permitir que la enzima polifenol oxidasa esté presente en los frutos del café (Guimarães *et al.*, 2011; Moura *et al.*, 2016). El potasio es requerido y acumulado en grandes cantidades por las plantas de café, su estrecha relación en la producción y calidad del café se atribuye a la activación enzimática de diversos procesos metabólicos que ocurren en las plantas del café como la fotosíntesis, la síntesis de carbohidratos y proteínas y el mantenimiento de la turgencia celular (Malavolta, 2006; Gonçalves *et al.*, 2018). Además, el K⁺ influye en la formación de las cerezas y los granos de café, estimulando las actividades enzimáticas, así como la síntesis y translocación de carbohidratos, mejorando finalmente la calidad de la taza (Malavolta *et al.*, 1997; Cuzato *et al.*, 2014).

Por otro lado, se tiene que la enzima polifenol oxidasa- PPO es la enzima que está directamente relacionada con la calidad de la taza de café (Carvalho *et al.*, 2003; Clemente *et al.*, 2015) y elevado índice de coloración (Carvalho *et al.*, 1994). Diferentes niveles de actividad de la PPO están relacionados con diferentes clasificaciones de tazas de café

como sigue: para los cafés tipo río y rioysh, la actividad debe ser inferior a 55.99 U g⁻¹ de la muestra; para el café tipo duro, la actividad PPO debe estar entre el rango de 55.99 y 62.99 U g⁻¹ de la muestra evaluada; para el café tipo suave, la actividad PPO es entre 62.99 y 67.66 U g⁻¹ de la muestra, y para el tipo estrictamente suave, la actividad está por encima de 67.99 U g⁻¹ (Clemente et al., 2015; Sorane et al., 2014).

Se caracteriza el *C. arabica* por presentar excelentes calidades sensoriales (Illy et al., 2005) comparado con *C. Canephora* – Robusta (Farah, A. 2012), los cuales se destacan por presentar mejores productividades, pero con una calidad de bebida moderada (Leroy, T. 1997). Se destacan los atributos de calidades sensoriales por presentar menor cantidad de cafeína 1,2 % (*Arabica*) y 2,2% (*Canephoras*), mayor cantidad de lípidos 16,2 % y 10 %, mayor cantidad de sacarosa 8 % y 4 %, menores cantidades de ácidos clorogénicos 6,9 % y 10,4%, respectivamente (Puerta, G. 2011), lo cual es altamente significativo los valores presentados por *C. arabica* respecto a las variables cuantificadas de calidades sensoriales. De ahí a los constantes esfuerzos de realizar intentos de combinar estas dos variedades de café, para garantizar una alta calidad de taza (proveniente de *C. arábica*), con la resistencia de los robustas (Farah, A. 2012).

Guimarães et al. (2011) y Gonçalves et al. (2018), afirman que el potasio ha sido reconocido como el "elemento de calidad" en la nutrición de plantas de café y en general para otras plantas (Malavolta et al., 1997), debido al papel que cumple en los procesos metabólicos y la activación de enzimas que influyen en la composición química de los granos de café y, en consecuencia, en la calidad de la bebida resultante. Elementos para tener en cuenta surgen en virtud de que el anión, Cl⁻, presente en el KCl reduce la actividad de polifenol oxidasa, que está relacionada con la calidad de la taza de café (Silva et al., 2002). Adicionalmente, se tiene que, si presenta demasiada concentración de nitrógeno o potasio en las plantas de café, reducirá la calidad de la tasa (ver Figura 1-6). Dawid et al., (2018), argumentan que si se aplica K⁺ de acuerdo con la capacidad de remoción respecto a la cosecha, se requerirán altas tazas de aportes de K⁺ debido al requerimiento y la remoción que las plantas de café ejercen en las cosechas. Las plantas de café demandan altos requerimientos de N y K (Correa et al., 1983; Dubberstein et al., 2016). Existe una estrecha relación entre suministro de nitrógeno, número de hojas y número de botones florales. Mientras que los niveles adecuados de N de tejido son favorables para la producción de almidón y otros carbohidratos necesarios para la formación y crecimiento

de frutos, en síntomas de plantas deficientes se desarrolla particularmente cuando crecen las bayas (Dubberstein *et al.*, 2016).

El potasio también juega un papel importante en la fisiología del cafeto, especialmente durante el crecimiento y maduración del fruto, dos momentos clave y oportunos: el crecimiento del fruto del café y la maduración fisiológica. Adicionalmente a ello, la cantidad de K^+ exportada en la cosecha excede la de N, lo que ayuda a explicar por qué puede volverse limitante después de unos años (Mitchell, 1988; Dubberstein *et al.*, 2016). El Potasio tiene una función importante para mejorar la calidad del fruto, por mover los azúcares de la hoja para que se acumulen en el fruto (Barros *et al.*, 2002). Así mismo, se ha comprobado que el Potasio tiene un efecto directo en la calidad del café mejorando la actividad de polifenoloxidasas, el índice de color y el contenido de azúcares, todos directamente relacionados con la calidad del café (Barros *et al.*, 2002). Estudios realizados por Barros *et al.*, (2002) encontraron, que los tratamientos fertilizados a base de KCl tuvieron menores respuestas en cuanto a la calidad de la bebida, clasificándola como una bebida “dura”, atribuyéndole el efecto ejercido por el cloruro.

Los azúcares del café que para algunos no afecta la calidad de la taza de la bebida (Amorim, 1972), para otros es el responsable del aroma peculiar de la bebida, sabor y color (Pereira, 1997) y que entre mayor concentración de azúcares se relaciona con la mejor calidad de su bebida (Chagas, 1996). Según Prete, (1992) las concentraciones de azúcares pueden variar de 5 a 10%. Se considera que al aplicar KCl en planes nutricionales se disminuye los azúcares en los frutos de café y caso contrario cuando es aportado el requerimiento de Potasio a base de Sulfato de Potasio (Silva *et al.*, 1999), además de otras fuentes a base de sulfato de potasio como lo es: $K_2SO_4 \cdot 2MgSO_4$ obtuvieron también mejores resultados en calidad de café (Barros *et al.*, 1999). Se infiere que para llegar a la calidad óptima de café a nivel taza, se necesita menos Nitrato de Potasio en comparación con Potasio aplicado como sulfato o cloruro de Potasio, aunque el SOP, es preponderantemente el más determinante e influyente en cuanto a la obtención de calidad de taza de café, según Barros *et al.*, (2002). Otros autores consideran los contenidos de lípidos y azúcares con correlaciones negativas (Decazy *et al.*, 2003; Avelino *et al.*, 2005), además de presentar respuesta positiva a los aumentos de aplicaciones de K^+ (Vinecky *et al.*, 2017). Los lípidos según Leroy *et al.*, 2006, son considerados precursores del aroma del café y por su parte los azúcares son considerados precursores del sabor y calidad de

la bebida (Leroy *et al.*, 2011). Tanto lípidos como contenidos de azúcares se concentran en periodos de sequía en los frutos de café (Vinecky *et al.*, 2017).

Entre mayores contenidos de lípidos y ácidos grasos se cuenta en las almendras de café, mayor es la protección que se le pueda brindar al momento de la tosti3n, interfiriendo como un protector de aromas y sabores protegiendo el 3rea externa de los granos (Pimienta. 2003), por tal motivo los caf3s de mejores atributos de acidez y calidad se correlacionan con niveles altos de lípidos (Decazy *et al.*, 2003), los valores totales de lípidos para *Coffea arabica* puede variar entre 10,5 y 17% (Lago. 2001; Lercker *et al.*, 1996; Speer *et al.*, 2006), en condiciones de mayores alturas, menores temperaturas, sombríos, favorecen un mayor desarrollo y llenado del grano (Villareal *et al.*, 2012) lo que favorece al final en mayores acumulaciones de lípidos (Vaast *et al.*, 2006). Los azúcares en el café también son importantes en la formaci3n de la caramelizaci3n, responsables de la formaci3n del color, aroma y sabor del café (Mendonca *et al.*, 2007), en cuanto a la acidez del café que puede tener consecuencias positivas o negativas, se deriva en gran parte de fermentaciones de azúcares (Clemente *et al.*, 2015). En resultados obtenidos por Clemente *et al.*, 2015, los mejores caf3s en cuanto a calidad fueron los que presentaban mayor cantidad de acumulaci3n de azúcar, el cual podían presentar aproximadamente 7,23% (Malta *et al.*, 2003).

Adem3s de las características bioquímicas descritas previamente, existe calidad física del café, destacándose por presentar la mayor cantidad de almendras sanas, que cumplen requisitos de exportaci3n (FNC. Sin Fecha), relacionándose entre peso y volumen, donde los mayores porcentajes de caf3s supremos son los que se encuentran retenidos en las mallas superiores a la N° 17 obteniendo mejor estado del café pergamino seco (Montilla, J. *et al.*, 2008) y alta relaci3n de la genética de la variedad con el tamaño del grano (Puerta, G. 2016). Existen valores aproximados para las densidades aparentes del café almendra, según Oliveros *et al.*, (1985) presentan 776 g.L⁻¹ y 680 g.L⁻¹ (Uribe. 1977), los cuales pueden tener diferencias por las metodologías empleadas, variedades, factores climáticos (Montilla, J. *et al.*, 2008) y una alta correlaci3n a medida que aumenta la altura (Buenaventura, C. *et al.*, 2002). Las mermas de café son consideradas un descuento dependiendo del peso final del grano de exportaci3n (café verde), descontando la “cascarilla” o merma producida en el proceso de la trilla, correspondiendo al peso del pergamino, separado durante el proceso de Trilla (Puertas, G. 1999), encontrando,

además, alta relevancia con las variedades de café, demostrando que el café cv Catimor presenta mayores mermas que la variedad Typica (Torres, Y. 2018). Las mermas y el factor de café comprenden el proceso final de trilla para obtener el café de exportación o café almendra – Green coffee (Puertas, G. 1999), en los cuales se pueden obtener aumentos o pérdidas de calidad. Además de considerarse la merma, otra variable relevante paralela a esta es el factor de Trilla, el cual indica la cantidad de café pergamino necesario para obtener 1 saco de 70 kg de café de exportación, donde los valores más cercanos a 70 kg corresponden a cafés de mejor calidad física, menores defectos y granos más grandes (Puerta, G. 2016).

Por otro lado, los atributos sensoriales del café como la fragancia: olor de café molido seco, aroma: olor del café agregando agua caliente, sabor: percepción de la bebida al paladar, acidez: sensación brillante o agria al salivar, cuerpo: sensación de pesadez del líquido en la boca, balance: equilibrio de las sensaciones del café, dulzor: plenitud agradable del sabor (FNC. Sin Fecha), de los cuales estas características se cuantifican mediante modelos de escalas descriptivas del 1 al 9 (Puerta, 1996) y protocolos de atributos (SCAA. 2015), para al final obtener puntuación de taza, de la cual realizando mejores prácticas agrícolas (incluyendo la fertilización) se obtendrán tazas y calidades mejoradas de la bebida de café (Farah, A. 2012).

Al final todos estos atributos exaltan la capacidad de obtener un café de alto valor por su impacto en calidad física, además de aumentar su condición de venta de café, y ser valorado por atributos de calidad sensorial, razón por la cual existe un aumento continuo de consumo de café a nivel mundial.

9. Materiales y métodos

9.1.1 Descripción de las muestras

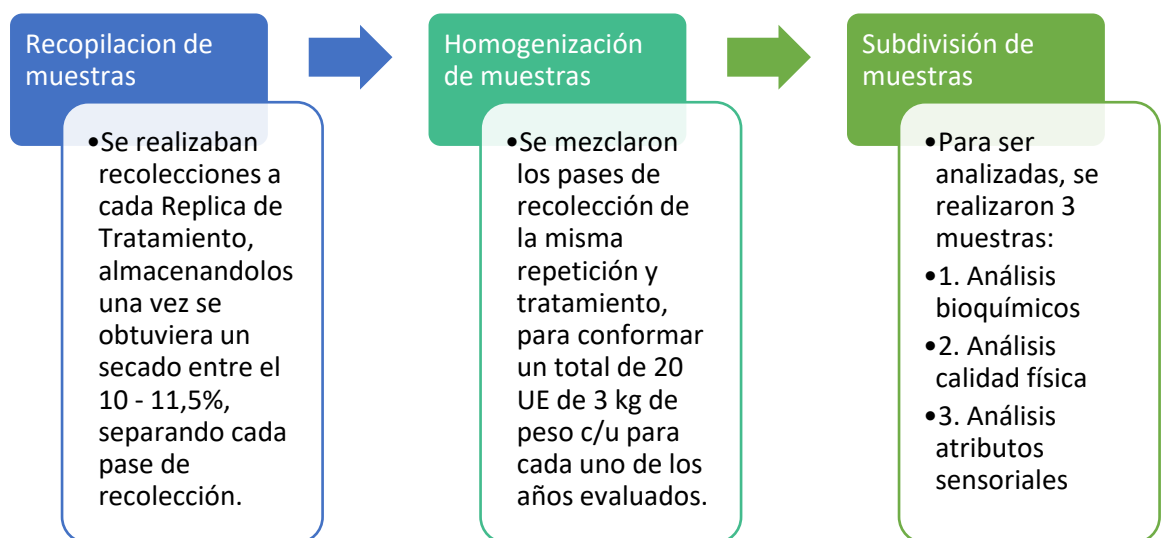
Recolectando 6 plantas por bloque y 4 repeticiones, para un total de 24 plantas de café arábigo (*Coffea arabica* L. var. Castillo) por Tratamiento en la Finca Lusitania en el corregimiento de El Mesón, Municipio de Garzón-Huila, Colombia, se sometieron a realizar los análisis de calidad para la presente investigación. Estas plantas corresponden a las plantas efectivas descritas en el Capítulo 2 (Figura 1-1), las mismas, a las cuales se les realizó la toma de datos de productividad, para posteriormente realizar proceso de beneficio del café. El café muestreado para cada tratamiento fue preparado en el área de estudio en sus propiedades por procesamiento postcosecha natural (CN) o semiseco (SC).

Realizando el proceso de selección en las plantas para cada tratamiento del café maduro, posteriormente realizando el despulpado, lavado y después el proceso de secado; realizando recolecciones, tomas de datos y almacenamiento del café seco. Este proceso fue realizado cada vez que se encontraban concentraciones de frutos maduros en las plantas de café, tomando ocho (8) recolecciones para el año 2018 (junio a diciembre) y siete (7) recolecciones para el año 2019 (marzo – octubre). Según su productividad, se tomaron pesos proporcionales a las recolecciones de café, homogenizando las repeticiones para cada tratamiento, para finalmente obtener cuatro (4) muestras por tratamiento correspondientes a las repeticiones en campo, hasta conformar una muestra de 2–3 kg de café seco y subdividiéndolo posteriormente de tal forma que quedaran las siguientes muestras para envíos a los diferentes laboratorios aliados.

- Muestra 1 (500 gr): Análisis de azúcar, lípidos y cafeína – Laboratorio ciencia de los alimentos, Universidad Nacional Sede Medellín.
- Muestra 2 (800 gr): Análisis atributos sensoriales - Coffee Roasting SAS, Chinchiná Caldas
- Muestra 3 (1.000 gr): Análisis calidad física en granos – - Coffee Roasting SAS, Chinchiná Caldas

Sobre estas muestras, se realizaron las evaluaciones de calidades y atributos sensoriales del café, conservando una contramuestra de 700 gr de café para cada una de las Unidades experimentales (UE), colocando todas las muestras en bolsas plásticas tipo Ecotact para ser almacenados en un lugar fresco y oscuro hasta las determinaciones de calidad física, sensorial y bioquímicas, de acuerdo a la metodología planteada por De Souza *et al.*, 2019.

Figura 3-1. Diagrama secuencia de recopilación de muestras





9.1.2 Análisis calidad física de granos

El análisis de calidad física de granos corresponde a detallar las clasificaciones del café pergamino seco según su tamaño, densidad, peso, defectos (Puerta., 2016), para

posteriormente eliminar el pergamino y dejar el café como tipo exportación, excelso, almendra u oro, sometiendo el café a pruebas mecánicas de tamizados por mallas de la 12 a la 18, antes de realizar el proceso de tostado del café. Para finalmente determinar las siguientes variables: Densidad de almendra, Merma, Factor, almendras sanas, defectos y clasificación de mallas, determinando el porcentaje de humedad entre el 10 – 12% de cada muestra mediante el medidor Kappa.

Tabla 3-1. Estándares de metodologías para variables de calidad físicas de granos de café

N°	Variable	Descripción	Método	Observaciones
1	Densidad de almendra	Peso de los granos de café sobre el volumen ocupado.	Pesaje de los granos de café, ocupados en un volumen estándar.	$\text{Densidad almendra} = \frac{\text{Peso almendra}}{1 \text{ lt}}$
2	Merma	Peso de granos después del proceso de trilla, obteniendo café almendra o tipo exportación.	Diferencia de los granos de café en pergamino seco a café excelso o exportación.	$\text{Merma} = \text{Peso granos cps} - \text{peso granos excelso}$
3	Factor	Cantidad de café pergamino seco para obtener 1 saco de 70 kg tipo exportación (almendra u oro).	Fracción de la muestra (250 gr) entre la cantidad de café excelso libre de defectos	$\text{Factor} = \frac{250 \text{ gr} \times 70 \text{ kg}}{\text{Peso excelso gr}}$
4	Almendras sanas	Separación de almendras defectuosas de la muestra de 250 gr de café trillada, pesando el café excelso solo de las almendras sanas.	Trilla, pesaje y separación de granos de café.	$\% \text{Almendra Sana} = \frac{\text{Peso a. sana} \times 100}{250 \text{ gr de muestra}}$
5	Defectos	Pesaje de los granos con defectos (brocados, partidos, ambar, blanqueados, grano negro, entre otros).	Clasificación y pesaje de granos defectuosos.	
6	Clasificación de mallas	Tamizaje por tamaños de mallas 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18. Siendo el valor 12 el de granos de menor tamaño.	Pesaje de granos en los diferentes tamaños de mallas.	 https://penagosclausen.co/equipos-para-laboratorio

9.1.3 Tostado del café

Los granos de café verde (800 g) se tostaron en un tostador Probatone™ a 200°C usando un tiempo de tostado de 8-10 min para que los puntos finales de tostado se determinaran visualmente, de acuerdo a la metodología descrita por SCAA (2015). Todas las muestras se tostaron hasta alcanzar un tostado medio según la escala descrita por SCAA. Los granos de café tostados se evaluaron el mismo día para realizar la evaluación sensorial, los granos de café tostados se molieron en un molino Bunn™ modelo G3 (Bunn, Springfield, EE. UU.).

9.1.4 Determinación del contenido de humedad y actividad del agua en café verde

El contenido de humedad y la actividad del agua (a_w) en granos de café verde, se determinaron por triplicado en línea con la metodología descrita por Kulapichitra *et al.*, (2019). Para la determinación de la humedad, se secaron aproximadamente 10 g de granos de café verdes enteros durante 16 ± 0.5 h, con el método de la estufa según la norma NTC 2325.

9.1.5 Descripción análisis bioquímicos

Las muestras de 500 gr de café fueron enviadas enumeradas del 1 al 20 (UE), al Laboratorio Ciencia de los alimentos – Universidad Nacional de Colombia sede Medellín, los cuales constataban de los 5 Tratamientos por las cuatro replicas, para determinar las siguientes variables bioquímicas:

Tabla 3-2. Metodologías analíticas para variables de calidad bioquímica de granos de café

Análisis bioquímico	Método	Descripción
Determinación del Contenido Lipídico Total	Extracción Soxhlet con solvente orgánico (AOAC., 2012).	Porcentaje totales de lípidos sometidos bajo el solvente metanol para determinar el porcentaje de ácidos grasos libres en la muestra de café.
Determinación del Contenido de Cafeína	Identificación y Cuantificación por HPLC (Shrestha., <i>et al.</i> 2016).	Separación de la cafeína empleando agua y metanol, utilizando un detector UV de 275 nm para detectar el porcentaje de cafeína de las muestras de café.
Determinación del Contenido de Proteínas	Determinación del Contenido de Nitrógeno total, Ensayo Kjeldahl (AOAC., 1995).	Se determinó mediante metodología de laboratorio con equipo Kjeldahl.

9.1.6 Análisis de Brix en cerezas de café

Durante el proceso de recolección de frutos maduros de café, se procedió a medir el extracto de las cerezas con el apoyo del refractómetro digital HI96811 Hanna, tomando la recolección de la cosecha principal de 2019 (octubre), pronosticada según la floración de ese mismo año. Se tomaron al azar 10 frutos de cada Unidad Experimental (UE) para los cinco Tratamientos y Cuatro repeticiones, posteriormente se promediaron estos datos para obtener un consolidado de 20 datos correspondientes a las UE.

Figura 3-2. Proceso de medición Brix en cereza



9.1.7 Análisis sensoriales

Para la elaboración de la calidad sensorial del café, se efectuaron ocho (8) pruebas sensoriales para cada tratamiento, teniendo en total dos mezclas de café sometidas al respectivo análisis de cada UE (unidad experimental), las cuales estaban dispuestas de la siguiente manera: i) toma de muestras entre los meses de mayo, junio y julio de 2018; ii) toma de muestras entre los meses de septiembre, octubre y noviembre de 2018. Ambos momentos de evaluación, estaban sujetos a variación de acuerdo con la época más alta

de floración en el área de estudio. Los análisis sensoriales fueron conducidos de acuerdo a los protocolos descritos por SCAA (2015), basándose en la metodología propuesta por Lingle (2011), donde se toma una muestra de 100 g de granos de café, a tamaño 17 e incluso superior, siendo moderadamente tostado y sometido a una temperatura monitoreada para que el tiempo de tostado estuviera en el rango de $8' \leq \text{Tiempo de tostado} \leq 12'$.

Se usó la escala descriptiva, cuantitativa, de 9 puntos de Cenicafé (Puerta, 1996), donde con 1, 2 y 3 se califican los defectos, rechazos; 4, 5 y 6 corresponde a la calidad media y 7, 8 y 9 califica al café de buena calidad que se clasificó en la presente investigación como calidad buena superior (Tabla 3-1). Los análisis sensoriales fueron hechos por la empresa CofeeRoasting S.A, empelando un panel de catación certificado Q-grader.

Tabla 3-3. Escala para la calificación y descripción de la calidad de la bebida de café

Calidad especial y superior			Calidad media				Rechazo	
9	8	7	6	5	4	3	2	1
Tostado, avellana, frutal, dulce, almendra, cítrico, malta, moras, caramelo, vino, clavos, vainilla, herbal, chocolate.			Fique	Verde, astringente, banano, césped	Acidez baja	Maíz, pronunciado amargo, madera, cereal, quemado	Fermento, flores, pulpa, sucio, plátano, grasa, áspero, cebolla, húmedo, agrio, coco	Vinagre, picante, tierra, ahumado, cuero, moho, podrido, hediondo, fenol

Fuente: Puerta (1996)

De cada muestra se prepararon 12 tazas, en concentración 11 g de café molido en 150 mL de agua filtrada a punto de hervir. Las muestras de café se presentaron en bandejas distribuidas al azar y en tazas codificadas en línea con lo planteado por Puerta *et al.* (2016) (Tabla 3-1). A los ocho (8) minutos después de la adición de agua, el polvo flotante se retira de las tazas y cuando el café alcanza los 60-65°C, se evalúan los demás atributos de acuerdo con la carta del protocolo SCAA descrita en SCAA (2015) para las características organolépticas del café, describiendo finalmente la escala de percepción de 9 puntos desarrollada en Cenicafé (Puerta, 1996; Riaño, 2013; Puerta *et al.*, 2016) (Tabla 4-1). Estos puntajes representan la calidad general de la preparación y se utilizan para asociarlos con la composición química determinada en el grano de café evaluado (Ver Tabla 3-1).

9.1.8 Análisis de datos

Posteriormente a los registros de producción (Capítulo 2), se seleccionaron muestras de café en pergamino seco para los periodos de evaluación de la presente investigación 2017-2018. Se empleó un diseño de Bloques Completos al Azar (BCA), donde las parcelas fueron los bloques; los tratamientos (las dosis configuradas de acuerdo con las aplicaciones de cloruros) fueron establecidos como sigue: T₁ = Testigo, el cual constó 100% Cloruro; T₂ = 0% Cloruro; T₃ = 50% Cloruros; T₄ = 25% Cloruros; T₅ = 75% Cloruros. Tomando datos de variables de calidad del café para cada uno de los tratamientos y replicas: Lípidos, Azúcares, cafeína, calidad física de granos, ° Brix y puntaje de calidad global de las cerezas de café, de acuerdo con el protocolo SCAA.

Con los datos obtenidos a partir de la aplicación de los tratamientos con proporciones diferenciadas de cloruros en el programa nutricional, se realizó un análisis de varianza (ANOVA) y se realizó la respectiva corrección con intervalos al 95% de confianza para los promedios de mínimos cuadrados.

10. Resultados y discusión

La reducción de cloruros con el fin de obtener mejores atributos sensoriales y aspectos de calidad física de granos de café, es parte del proceso de tecnificación e innovación que caficultores requieren para exaltar y diferenciar un café de valor. A continuación, se mostrarán resultados de la investigación en café variedad Castillo a libre exposición solar.

10.1 Impacto de la reducción de cloruro en la calidad del café.

La reducción de cloruros en programas de fertilización, está directamente influenciada por el uso del potasio como sal nutritiva, que lleva consigo el ion acompañante cloro en un alto porcentaje. El Potasio juega un papel preponderante en el cultivo del café, específicamente en la fisiología de las plantas, especialmente durante el crecimiento del fruto y maduración; la cantidad de K^+ exportada en la cosecha, generalmente excede al del N, lo que ayuda a explicar por qué puede volverse limitante después de unos años (Glander, 1958; Malavolta, 1986; Lima *et al.*, 2003), y a su vez el aporte en mayores cantidades de Cl que el nitrógeno.

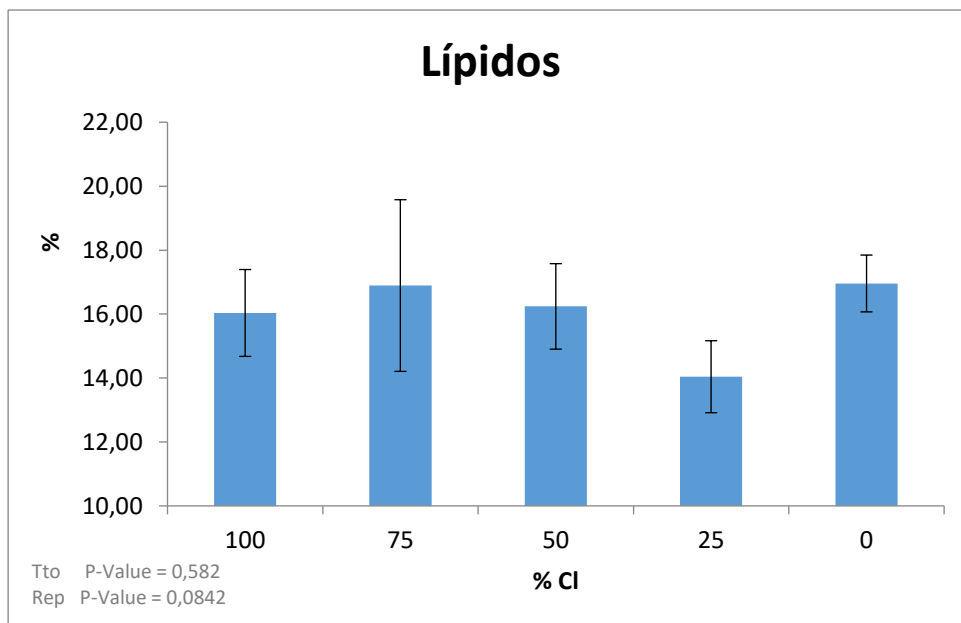
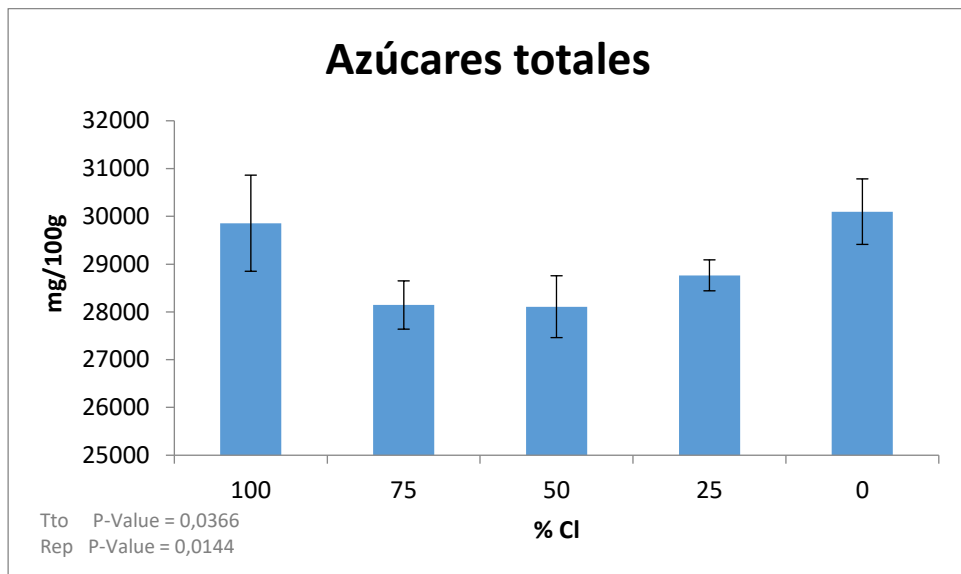
10.1.1 Efecto de reducción de cloruros en el contenido total de azúcares y lípidos en los granos de café

En la figura 3-3, se observa el impacto de la reducción de cloruros sobre el contenido de azúcares totales y lípidos en los granos de café, durante la cosecha del 2018.

La acumulación total de azúcares, obtenidos en los resultados de la reducción de cloruros en café, obtuvo diferencias significativas entre los tratamientos (Tabla 3-4). Los resultados

contrastan a los Tratamientos con 0% Cl⁻ (T2) y 100% Cl⁻ (T1), como los de mejor resultado en cuanto a la acumulación de azúcares, diferenciándose solamente por 0,24% de diferencia, dentro de las combinaciones generadas para disminuir los aportes de cloruros, el Tratamiento 4 con 25% de Cl⁻, fue el tratamiento que más se acercó a los valores del T1 y T2, con diferencias de 1,1% y 1,33% respectivamente. Contrario a los resultados reportados por Barros *et al.*, (1999) en donde se marca una diferencia entre las fuentes aplicadas de potasio en los azúcares totales en los frutos de café, obteniendo el mayor incremento en los granos de café aplicados con la fuente K₂SO₄ y disminuyendo linealmente cuando es aplicado en mayor concentración la fuente KCl. Según Chagas (1996), afirma que los mejores cafés para calidad sensorial, son los que presentan mayores cantidades de azúcares totales.

Figura 3-1. Contenido de azúcares totales y lípidos de granos de café año 2018



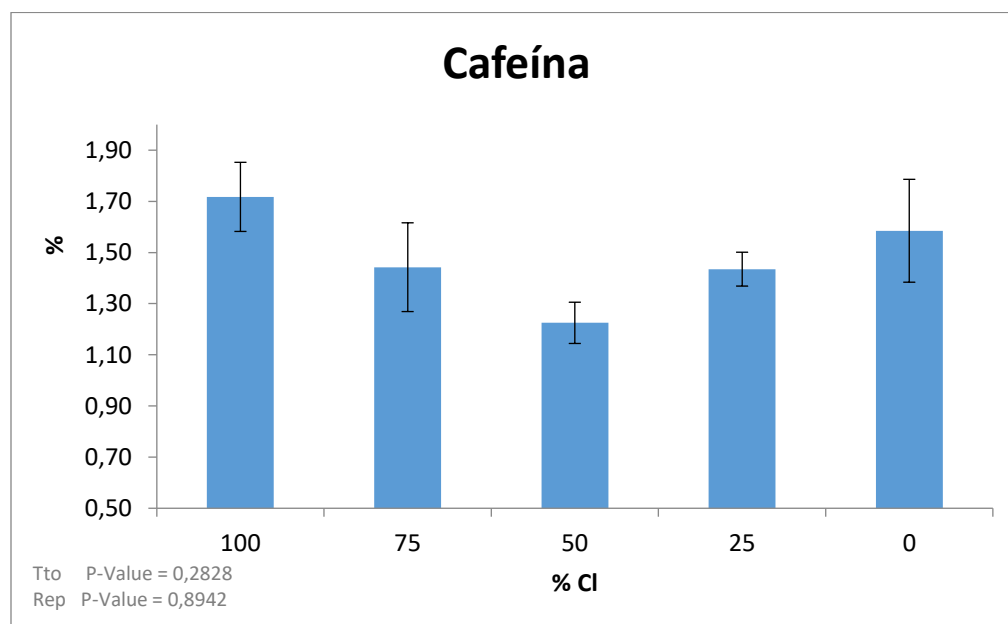
La tendencia fue muy similar y se correlaciona con los porcentajes de lípidos para cada tratamiento, sin obtener diferencias significativas (Tabla 3-4). Se evidencia el mayor contenido por parte del T2 con 0% CI, el único tratamiento que no consiguió la misma tendencia fue el T4 (25% CI) el cual fue el de menor contenido de Lípidos, diferenciándose

con 2,9% con el T2 de mayor contenido de lípidos, los cuales según estudios realizados por Amorim et al., (1976), cafés con mayor cantidades de carbohidratos son percibidos con mejor niveles de calidad.

10.1.2 Efecto de la reducción de cloruros en el contenido de cafeína de granos de café

En la figura 3-4, se observa el impacto de la reducción de cloruros en el contenido de cafeína en los granos de café excelso o tipo exportación, durante la cosecha del 2018.

Figura 3-2. Efecto de la reducción de cloruros en el contenido de cafeína año 2018



El contenido de cafeína no presentó diferencias estadísticamente significativas. El tratamiento con mayor porcentaje de cafeína en los granos de café tipo exportación (excelso u oro) fue superior en el T1 con 100% Cl⁻, y existió una reducción considerable con respecto al T3 50% Cl⁻, de - 0,5% comparado entre estos tratamientos, de esta manera podemos reflejar la importancia de manejar proporciones cercanas a 86 kg.ha⁻¹ de este elemento (Cloro), complementando aportes de potasio con fuentes alternativas como lo es

el SOP, hasta complementar los requerimiento del elemento K⁺. Se puede predecir que esto conlleva un mejor contenido de calidad, tal como se presentó en el T3, debido a que se acerca mucho más a condiciones de cafés muy suaves, características principales del café colombiano.

La Tabla 3-4 expone las características cualitativas de los granos de café respecto a la influencia de la reducción de cloruros evaluadas en la presente investigación.

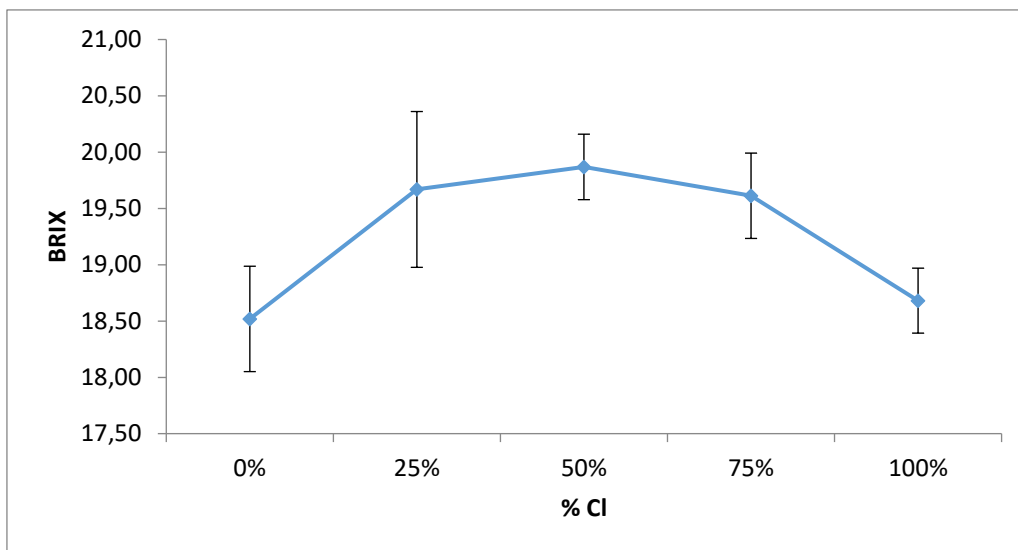
Tabla 3-1. Resultados del análisis de varianza de la composición bioquímica en granos verdes antes de ser tostados

Fuente de Variación/Compuesto Bioquímico	Glucosa	Cafeína	Lípidos
	mg.100g ⁻¹	%	%
Tratamientos	0,0366*	0,2828ns	0,582ns
Bloques	0,0104*	0,8942ns	0,0842ns

10.1.3 Efecto de la reducción de cloruros en el contenido de ° Brix de café cereza o rojo

En la figura 3-5, se observa el impacto de la reducción de cloruros en el contenido de °Brix de cerezas maduras de café, recolectadas en su punto óptimo de recolección, previo a su proceso de beneficiadero.

Figura 3-3. Contenido de °Brix en frutos maduros de café (2018) sometidos a reducciones de cloruros



El contenido de °Brix en el extracto de los frutos maduros de café, no se obtuvo diferencias significativas (Tabla 3-5). Se observa contundentemente una relación directa en el aumento de los °Brix dependiendo de las combinaciones que se puedan llevar a cabo para disminuir los % de Cloruros aplicados en el cultivo de café, se obtiene el mejor resultado en el T3 aplicando 50% de la dosis de cloruro, es decir aportando 86 kg. ha⁻¹, de 175 kg.ha⁻¹ del Tratamiento 1 (100% Cl⁻). Se puede inferir que al combinar diferentes fuentes de potasio con el objetivo de disminuir las concentraciones de Cl⁻ aplicados en los planes nutricionales, condicionan una mejoría en las concentraciones de ° Brix en las cerezas de café maduro, pudiendo desarrollar nuevas técnicas de postcosecha como diferentes procesos de fermentación, procesos de secado, lavados, entre otros, para tener cafés diferenciados de calidad.

Tabla 3-2. Resultados del análisis de varianza (Valor de Probabilidad) la composición de azúcares en cerezas maduras a los 240 días después de floración

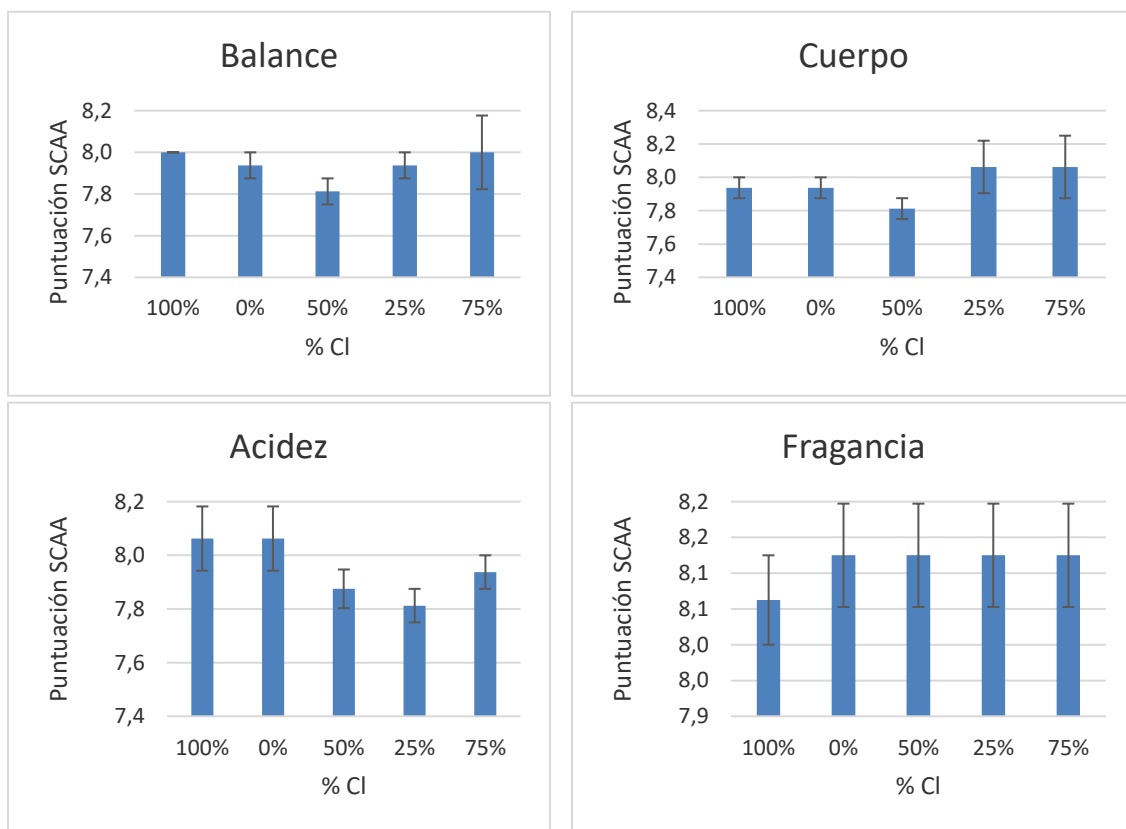
Fuente de Variación	Brix
Tratamientos	0,1267ns
Bloques	0,8321ns

*P<0,05 significativo; **p<0,001 Altamente significativo

10.1.4 Efecto de la reducción de cloruros sobre el balance, cuerpo, acidez y fragancia, como atributos sensoriales de tazas de café

La figura 3-6 detalla los resultados obtenidos de los atributos sensoriales del café cuantificados en la escala SCAA, en los cuales se estableció los resultados de la armonía de los cafés catados y la sensación que estos generan al degustarlos.

Figura 3-4. Influencia de aportes de Cloruro en Atributos sensoriales del café: Balance, Cuerpo, Acidez y Fragancia



Los atributos sensoriales del café analizados no presentaron diferencias estadísticamente significativas (Tabla 3-6). Estos atributos cuantificados se realizan con el fin de proponer y argumentar, las cualidades más sobresalientes del café. Se observa que al reducir los aportes de cloruros al 50% se disminuye el Balance, Cuerpo y acidez siendo el T3 con menores datos arrojados en estas tres variables, a excepción de la acidez la cual presenta 0,06 más que el T4 (25% Cl⁻), la fragancia representa resultados muy similares todos los

tratamientos a excepción del T1 (100% Cl), el cual obtuvo el menos resultado con 8,0 según la Puntuación de la SCAA.

Tabla 3-3. Resultados del análisis de varianza (Valor de Probabilidad) para algunos atributos de la taza del café “calidad de Taza”

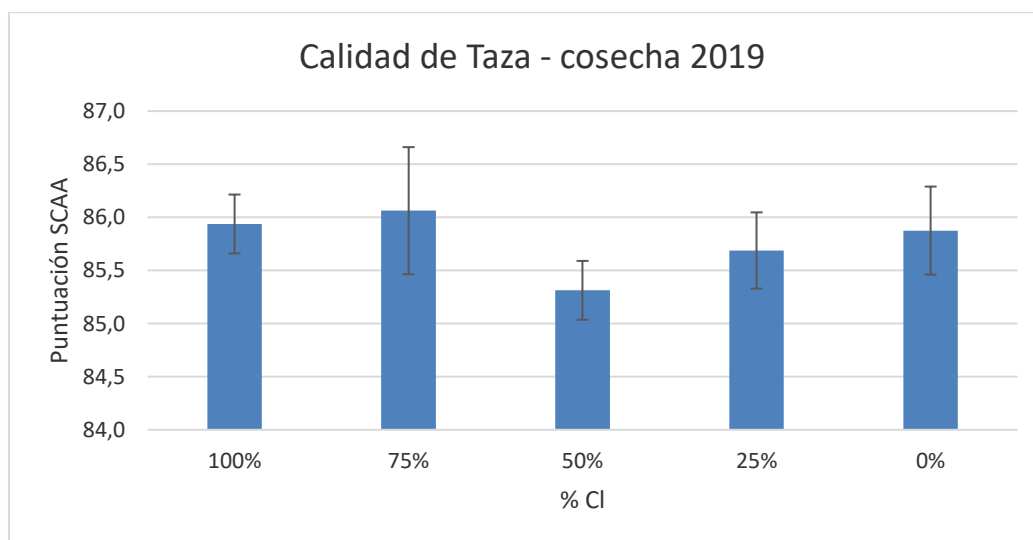
Fuente de Variación/Compuesto Bioquímico	Balance	Cuerpo	Acidez	Fragancia	Puntuación Total
	Puntuación SCA				
Tratamientos	0,6363ns	0,4449ns	0,2887ns	0,9335ns	0,7127ns
Bloques	0,5262ns	0,1049ns	0,5667ns	0,1256ns	0,3846ns

*P<0,05 significativo; **p<0,001 Altamente significativo

10.1.5 Efecto de reducción de cloruros en la puntuación SCAA como calidad de taza de café

En la figura 3-7, se observa el efecto de la reducción de cloruros en la calidad final de taza del café, descrita según los parámetros establecidos por SCAA.

Figura 3-5. Influencia de aportes de Cloruro en la Calidad de Taza del café



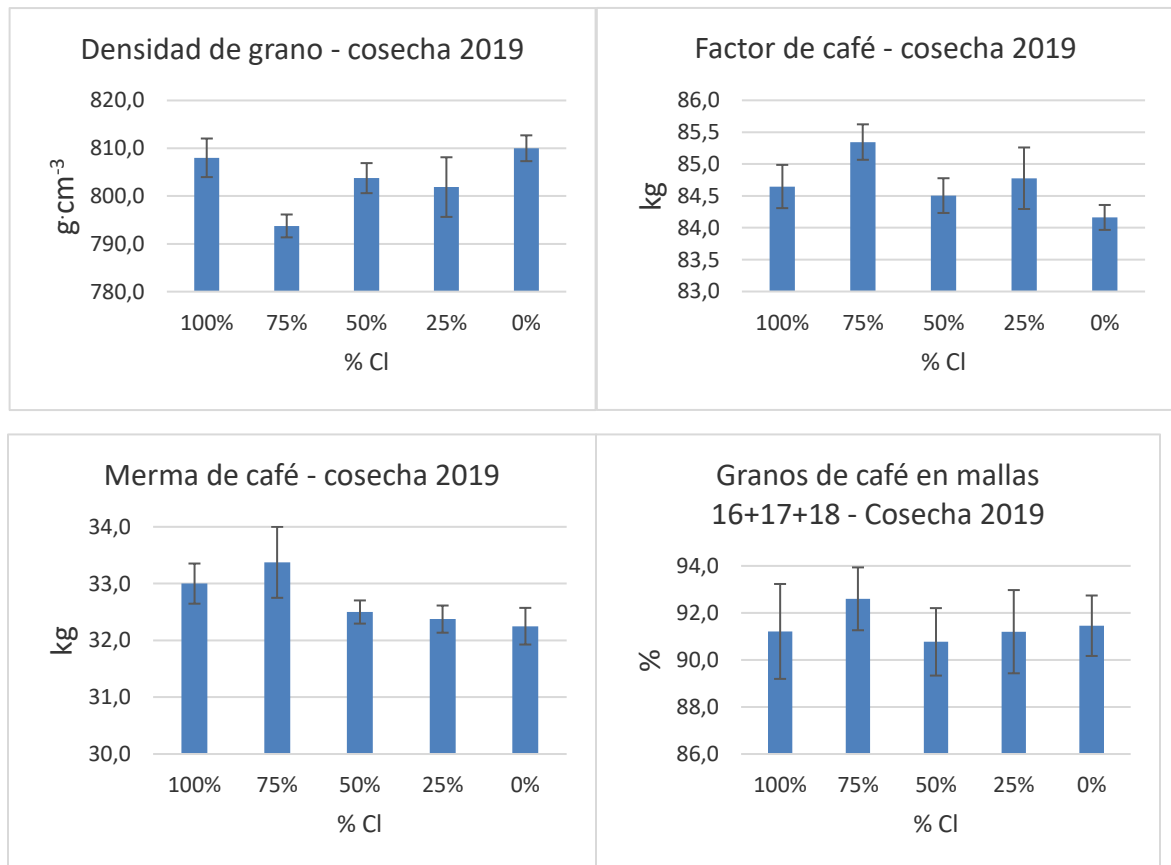
Los resultados finales, después de clasificarlos según la puntuación de la SCAA fueron satisfactorios para todos los tratamientos, sin obtener diferencias estadísticamente

significativas entre ellos, considerándose todos como cafés especiales al superar 84 en la puntuación. Resultados similares a los hallados por Clemente *et al.*, (2015), donde encontraron en cv Catuaí el óptimo en calidad de taza cuando existe rangos superiores de absorción del potasio. Se destaca el T5 (75% Cl) como el tratamiento con mejores atributos sensoriales, lo cual lo clasifican con una mejor puntuación comparado con los demás Tratamientos, obteniendo finalmente una clasificación de puntuación de 86. Se demuestra la importancia de establecer disminuciones de aportes de Cloruros y considerar manejar planes nutricionales balanceados en el cultivo de café, con el fin de obtener resultados satisfactorios y continuar prevaleciendo como cafés de alta calidad.

10.1.6 Efecto de la reducción de cloruros en la calidad física de los granos de café

En la figura 3-8, observamos el efecto de la reducción de cloruros en aspectos que contribuyen a la calidad físicas de granos de café.

Figura 3-6. Densidad, Factor, Merma, % granos en malla 16+17+18 en granos de café



Los atributos de calidad física de los granos de café presentaron diferencias significativas para la variable densidad de frutos (Tabla 3-7). El factor, merma y tamaño de granos en mallas 16-17-18, no presentaron diferencias significativas.

En línea con lo que describe Malavolta *et al.*, 1997 y Anschütz *et al.*, 2014, en la fase final, entre los 200 y 240 ddf- días después de floración, *C. arabica*, presentó un peso de fruto fresco de 0.53 g (247 días después de floración); evidenciándose según lo reportado por Clemente *et al.* (2015) un alargamiento del fruto hasta alcanzar su punto de madurez; es decir, un estadio en el cual los tejidos se ablandan, existe una marcada tendencia en que se presente un detrimento de acidez y una concentración de azúcares y es aquí precisamente, donde los compuestos aromáticos son sintetizados (Alkaltham *et al.*, 2020). Esta información se hace supremamente fundamental para los caficultores, porque el peso del fruto en el estadio de madurez es lo que dictamina la dinámica de comercialización de los granos de café. El patrón de crecimiento de los frutos presentados aquí, considera el peso fresco acumulado sobre el tiempo, y resulta confiable para describir el patrón de crecimiento de los frutos de café para efectos de la presente investigación. Además de esto, permite tomar decisiones a manejos agronómicos en el cultivo, dependiendo de su etapa fenológica (Ramírez., 2014), detallando: manejo de fertilización, manejo de plagas y enfermedades, pronóstico de recolección, entre otras.

Los resultados de la Figura 3-6, demuestran la percepción económica en la venta del café, al obtener bonos económicos adicionales dependiendo de la disminución de las pérdidas de cafés con defectos físicos. Se observa que el T2 (0% Cl⁻), es el tratamiento con mejor Factor de venta de café, requiriendo 84,1 kg de café pergamino seco para convertirlo a 70 kg de café verde tipo exportación, comparado con el T5 (75% Cl⁻), el cual requiere 85,3 kg de café pergamino seco para producir esa misma cantidad de café de exportación, demostrando que el café responde a la reducción de cloruros en relación a la calidad física de los granos de café y a su vez correlacionándose con el menor resultado de mermas y densidad de granos de café para el mismo T5 (75% Cl⁻) con 16,25 g.cm⁻³ comparado con el mismo T2 (0% Cl⁻) de mayor densidad entre los Tratamientos: 810 g.cm⁻³, sin embargo el T5 (75% Cl⁻) es el que presenta el mayor tamaño de granos ubicados en malla 16+17+18, resultados que difieren a lo reportado por Clemente *et al.*, (2015) quien atribuye el mayor tamaño de la almendra del café a la menor productividad. Sin embargo, no es

congruente con el peso de dicho grano en comparación a su tamaño (densidad). Mientras que los otros Tratamientos, presentan resultados muy similares entre ellos, teniendo una variación entre el T1 y T3 de 0,51%, datos respaldados al presentar más del 80% del tamaño de café superior, presentados por Alvarado *et al* (2005), lo cual permite ser mayormente atractivo a los mercados internacionales.

Tabla 3-4. Resultados del análisis de varianza (Valor de Probabilidad) para la calidad física del grano de café.

Fuente de Variación/Variable	Densidad	Factor de conversión	Merma	Mallas 16+17+18
Tratamiento	0,01072*	0,1968ns	0,2903ns	0,956ns
Bloque	0,0175*	0,3824ns	0,6736ns	0,8981ns

*P<0,05 significativo; **p<0,001 Altamente significativo

11. Conclusiones

En el presente trabajo, se encontró que el café responde a diferentes reducciones de cloruros en los programas de nutrición, sin alterar condiciones de esencialidad de la calidad de los granos. Sin embargo, al disminuir 25% de cloruros se obtiene las mejores puntuaciones en calidad de taza y mayores % de lípidos; se logró comprobar que la calidad física de los granos de café, bajo las condiciones de este trabajo de investigación, están influenciadas por las reducciones de cloruros aportados en los planes nutricionales, obteniendo mejores densidades, factores y mermas de granos café cuando se aplica 0% de cloruros; y también, se obtienen mayores porcentajes de granos en las mallas 16-17-18 cuando es aportado 75% de cloruros.

Definitivamente, la reducción de cloruros empleando las fuentes KCl y SOP para elaborar planes nutricionales balanceados para el café *Coffea arabica* var. Castillo, demostró tener ventajas en la calidad sensorial y física de los granos de café. Aumentando la rentabilidad de los caficultores y conservando los atributos sensoriales de una excelente taza de café.

12. Conclusiones y recomendaciones generales

12.1 Conclusiones

Se encontró que aplicando 25% menos cantidad de Cl^- en las plantas de café, aumenta la eficiencia de la absorción del nitrógeno, ahorrando aplicaciones de fertilizantes nitrogenados, teniendo una alternativa más de reducir el impacto de generar huella de carbono a la atmósfera.

En conclusión, al reducir 75% de cloruros en la fertilización se logró mejores incrementos absolutos en dos años consecutivos de producción, demostrando el aumento continuo de las plantas de café siempre en cuando se cuente con un buen balance nutricional.

Para finalizar, el café respondió a diferentes reducciones de cloruros en los programas de nutrición, sin alterar condiciones de esencialidad de la calidad de los granos, aumentando la rentabilidad de los caficultores y conservando puntación ejemplar de un café suave colombiano.

12.2 Recomendaciones

Con base en lo anterior, es posible afirmar que al reducir los cloruros en la fertilización se debe realizar en función de las curvas de acumulación de nutrientes en los granos de café, ya que éstas muestran claramente los estadios en las que las plantas de café presentan mayores requerimientos de los elementos en sus etapas; permitiendo identificar los períodos en los que la planta necesitan mayor concentración de nutrientes y el tiempo adecuado para la aplicación de fuentes de fertilizantes, proporcionando así una mejor utilización, evitando pérdidas y aumentando la eficiencia del producto aplicado.

El cloro es considerado un nutriente esencial, pero requerido en pequeñas cantidades; esto para tenerlo en cuenta y disminuir el riesgo de altas aplicaciones de este micronutriente sobre los cultivos, sobre el suelo y su interacción con el ambiente. Se recomienda no sobrepasar aportes de cloro por encima de los macronutrientes N y K⁺.

Se pudo comprobar, que la reducción de cloruros al 25%, influyó principalmente en la absorción del nitrógeno, por tal motivo constantemente se debe perfeccionar los planes de nutrición mineral, suministrando en los momentos oportunos las fuentes más apropiadas para la absorción de los principales elementos y la interacción que ocurre entre ellos.

En virtud de los resultados obtenidos en esta investigación, la reducción de cloruros, probó ser una estrategia para disminuir aplicaciones de fuentes de nitrógeno y reducir el impacto que genera al ambiente, aumentar productividades entre los años sin afectar la calidad de su tasa, el cual será otra área de enfoque de los programas nutricionales.

Referencias Bibliográficas

- Alkaltham, M.S., Salamatullah, A. and Hayat, K. (2020). Determination of coffee fruit antioxidants cultivated in Saudi Arabia under different drying conditions. *J Food Meas Charact.* <https://doi.org/10.1007/s11694-020-00378-4>
- Alvarado, G., Posada, H. E., & Cortina, H. A. (2005). Castillo: Nueva variedad de café con resistencia a la roya. Centro Nacional de Investigaciones de Café (Cenicafé). *Avances Técnicos Cenicafé* No 337.8p.
- Alves, F.R.; Melo, M.N.; Almeida, H.J. and De Mello, P.R. (2016). Growth and nutritional disorders of coffee cultivated in nutrient solutions with suppressed macronutrients. *Journal of Plant Nutrition*, 39(11), 1578-1588. <https://doi.org/10.1080/01904167.2016.1161777>
- Anschütz, U.; Becker, D. and Shabala, S. (2014). Going beyond nutrition: Regulation of potassium homeostasis as a common denominator of plant adaptive responses to environment. *Journal of Plant Physiology*, 171, 670–687. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jplph.2014.01.009>
- AOAC., (2012). Official Method 948.22. Fat (crude) in nuts and nut products. Gravimetric methods, in: Official Methods of Analysis of AOAC International, 19th ed., AOAC International, Gaithersburg, MD, USA, 2012.
- AOAC., (1995). AOAC, Official Method 920.87. Protein/Total Protein, Titrimetric Method. AOAC—Association of Official Analytical Chemists (1995). Official methods of analysis of AOAC International (16th ed.) Gaithersburg, MD, USA: AOAC International.
- Aparecida, DA.; Guimarães, R.J.; Colombo, A.; Scalco, M.S. e Dominghetti, A.W. (2015). Critical ranges for leaf nitrogen and potassium levels in coffee fertigated at the production phase. *Revista Ciência Agronômica*, 46 (1), 126-134. doi.org/10.1590/S1806-66902015000100015
- Asher, C.J. and P.G. Ozanne. (1967). Growth and Potassium Content of Plants in Solution Cultures Maintained At Constant Potassium Concentrations. *Soil Sci.* 103:155-161.
- Avelino, J.; Barboza, B.; Araya, J.C.; Fonseca, C.; Davrieux, F.; Guyot, B.; Cilas, Ch. (2005). Effects of slope exposure, altitude and yield on coffee quality in two altitude

- terroirs of Costa Rica, Orosi and Santa María de Dota. *J.Sci.Food.Agric.*85:1869-1876.doi. 10.1002/jsfa.2188
- Bassirirad, H. (2000). Kinetics of nutrient uptake by roots: responses to global change. *New Phytol.* 147:155-169.
- Benavides, A. (2011). Absorción de iones en la raíz. Departamento de Horticultura, Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro. Disponible en: http://exa.unne.edu.ar/biologia/fisiologia.vegetal/absorcion_de_iones_en_la_raiz.pdf
- Bergmann, W. (1992). "Nutritional disorders of plants," in Gustav Fisher Verlag Jena (Stuttgart), 741.
- Ben-Zioni, A.; Vaadia, Y. and Lips, S.H. (1971). Nitrate uptake by roots as regulated by nitrate reduction products of the shoot. *Physiol. Plant.* 24: 288-290.
- Buenaventura, C. et al., 2002. <https://biblioteca.cenicafe.org/bitstream/10778/1020/1/arc053%2802%29119-131.pdf>
- Castro, T.S., Flores, M., Wanner, N., Dietsch, T.V., Banks, J., Urena, R.N. and Chandler, M. (2014). Evaluation of a non-destructive sampling method and a statistical model for predicting fruit load on individual coffee (*Coffea arabica*) trees. *Sci Horticulture Amsterdam*, 167, 117–126. <http://dx.doi.org/10.1016/j.scienta.2013.12.013>
- Cakmak, I. (2005). The role of potassium in alleviating detrimental effects of abiotic stresses in plants. *J. Plant Nutri and Soil Science.*168(4).521-530.
- Cenicafé- Centro Nacional de Investigaciones de Café. (2011). Cultivemos café. https://www.cenicafe.org/es/index.php/cultivemos_cafe/planta/la_variedad_castillo
- Carvalho, V.D.;De Rezende, C.S.J.; Chalfoun, S.M.; Botrel, N.; Steiner-Gomes, E. (1994). Relação entre a composição físico-química e química do grão beneficiado e a qualidade de bebida do café. *Pesq. Agrope. Bras.* 29(3):449-454.
- Carvajal, J. F. (1972). Cafeto: cultivo y fertilización (No. 633.73322 C331). International Potash Institute, Berne (Suiza).
- Cerda, R.; Allinne, C.; Gary, C.; Tixier, P.; Harvey, C.; Krolczyk, L.; Mathiot, C.; Clément, E.; Aubertot, J. and Avelino, J. (2017). Effects of shade, altitude and management on multiple ecosystem services in coffee agroecosystems. *Europ J Agnomy*, 82, 308–319. <http://dx.doi.org/10.1016/j.eja.2016.09.019>
- Chagas, De Re. S.J. (1996). Caracterização química e qualitativa de cafés de alguns municípios de três regiões produtoras de Minas Gerais. II. Valores de acidez titulável e teores de açúcares (redutores, não redutores e totais). Universidad Federal de Lavras. MSc Thesis. 97p. Disponible en:

<http://www.sbicafe.ufv.br/bitstream/handle/123456789/36/102784f.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

Chen, W., He, Z. L., Yang, X. E., Mishra, S., & Stoffella, P. J. (2010). Chlorine nutrition of higher plants: progress and perspectives. *Journal of Plant Nutrition*, 33(7), 943-952.

Christensen N., T. Jackson, y R. Powelson. (1982). Suppression of take-all root rot and stripe rust diseases of wheat with chloride fertilizers. Proc. Int. Plant Nut. College, 9th. 1:111-116.

Ciguenza, R. N. (2019, 18 de marzo). Huila es el departamento líder cafetero con 16% del área cultivada. La República. Recuperado de: <https://www.larepublica.co/especiales/ruta-del-cafe/huila-es-el-departamento-lider-cafetero-con-16-del-area-cultivada-2840686>.

Clemente, J.M.; Prieto, M.H.; Corrêa, A.L.; Finger, F.L. and Cecon, P.R. (2015). Effects of nitrogen and potassium on the chemical composition of coffee beans and on beverage quality. *Acta Scientiarum-Agronomy*, 37(3), 297-305. <http://dx.doi.org/10.4025/actasciagron.v37i3.19063>

Coffee iq. (2011). Café arábigo. Características. Cultivo, miscelánea, mundo del café. <https://www.coffeeiq.co/cafe-arabica-caracteristicas/>.

CONPES- Consejo Nacional de Política Económica y Social. (2009). Documento CONPES 3577. Política nacional para la racionalización del componente de costos de producción asociado a los fertilizantes en el sector agropecuario. Bogotá, D.C., 34p. Recuperado de: <https://www.ica.gov.co/getattachment/b527d0c9-e862-4c26-8347-e5076fd9b1a9/2009CP3577.aspx>.

Cortina, G.H., Moncada, B.M. y Herrera, P.J.C. (2012). Variedad Castillo®. Preguntas frecuentes. *Avances Técnicos Cenicafé* 426, 1-12. Recuperado de: <https://www.cenicafe.org/es/publications/avt04261.pdf>.

Cuzato, M.M.A., Peres, S.R., Costa, C.C.A. and Amaral, C.G.S. (2014). Effect of potassium sources and rates on arabica coffee yield, nutrition, and macronutrient export. *Rev Bras Ciênc Solo*, 38 (5), 1448-1456. <http://dx.doi.org/10.1590/S0100-06832014000500010>

DaMatta, F.M., Ronchi, C.P., Maestri, M. and Barros, R.S. (2007). Ecophysiology of coffee growth and production. *Braz J Plant Physiol*, 19(4), 485-510. <http://dx.doi.org/10.1590/S1677-04202007000400014>

Darley, C. P., Skiera, L. A., Northrop, F. D., Sanders, D. and Davies, J. M. (1998). Tonoplast inorganic pyrophosphatase in *Vicia faba* guard cells.

- Dávila, L. (2018). Así fue la cosecha cafetera del Huila en 2017. Recuperado de: La Nación, <https://www.lanacion.com.co/2018/01/05/asi-fue-la-cosecha-cafetera-del-huila-2017/>.
- Dawid, J. and Hailu, G. (2018). Inorganic fertilizers requirement of coffee (*Coffea arabica* L.)-Review. *Journal of Biology, Agriculture and Healthcare*, 8(21), 24-34. Retrieved from: <https://www.iiste.org/Journals/index.php/JBAH/article/view/45147/46590>.
- De Barros, S.E.; Dias, N.F. e Gontijo, G.P. (2002). Qualidade de grãos de café beneficiados em resposta à adubação potássica. *Sci agric (Piracicaba, Braz.)*, 59 (1), 173-179. <http://dx.doi.org/10.1590/S0103-90162002000100025>
- De Freitas, R.B.; Alves, J.D.; Magalhaes, M.M.; Goulart, P.D.P.; do Nascimento, M.N. and Fries, D.D. (2007). Adubação do cafeeiro com nitrato de potássio via solo e folha, no outono-inverno e primavera-verão: efeitos na atividade da redutase do nitrato, no crescimento das plantas e na produção. *Ciênc Agrotec*, 31(4), 945-952. <http://dx.doi.org/10.1590/S1413-70542007000400001>
- De Souza, G.B.M., Dos Santos, S.M.B., Good, K.C.S. and De Toledo, B.M. (2019). Correlation between the composition of green Arabica coffee beans and the sensory quality of coffee brews. *Food Chem*, 292, 275-280. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2019.04.072>
- Decazy, F.; Avelino, J.; Perriot, C.; Pineda, C.; Cilas, C. (2003). Quality of different Honduran coffees in relation to several environments. *Journal of Food Science*. 68(7):2356-2361.
- Dubberstein, D., Partelli, F.L., Machado, D.J. and Curitiba, E.M. (2016). Concentration and accumulation of macronutrients in leaf of coffee berries in the Amazon, Brazil. *Australian Journal of Crop Science*, 10(5), 701-710. <http://dx.doi.org/10.21475/ajcs.2016.10.05.p7424>
- Encalada, C.M., Soto, C.F. and Morales, G.D. (2016). Coffee (*Coffea arabica* L.) seedling growth with four shade levels under two soil and climate conditions of Ecuador. *Cultivos Tropicales*, 37 (2), 72-78. <http://dx.doi.org/10.13140/RG.2.1.4335.7681>
- Evans, H. J. and Wildes, R. A. (1971). Potassium and its role in enzyme activation. *International Potash Institute*, Berne, 13-19.
- FAO- Food and Agriculture Organization. (2000). The coffee guide. FAO Economic and Social Development Series (Eds.). Abidjan, Côte d'Ivoire. Retrieved from: <http://www.fao.org/3/AD219E/AD219E01.htm>.
- Farah, A. (2012). Coffee: Emerging Health Effects and Disease Prevention. https://www.researchgate.net/publication/271328645_Coffee_emerging_health_effects_and_disease_prevention
- Ferraz, G.A.; Da Silva, F.M.; Carvalho, L.C.; Alves, M. and Franco, B.C. (2012). Variabilidade espacial e temporal do fósforo, potássio e da produtividade de uma

- lavoura cafeeira. *Engenharia Agrícola*, 32(1), 140-150.
<http://dx.doi.org/10.1590/S0100-69162012000100015>
- Figuroa, H.J. y Mendoza, A.J. (2010). Cuantificación de minerales K, Ca, Mg y P en pulpa y pergamino de café (*Coffea arabica* L. var. Typica). *Revista Venezolana de Ciencia y Tecnología de Alimentos*, 1 (2), 221-230. Recuperado de: <http://oaji.net/articles/2017/4924-1495306975.pdf>.
- Fixen, P. E. (1993). Crop responses to chloride. *Adv. Agron*, 50, 107-150.
- Flores, R.A., Melo, M.N.B., Almeida, J.H. and De Mello, P.R. (2016). Growth and nutritional disorders of coffee cultivated in nutrient solutions with suppressed macronutrients. *Journal of Plant Nutrition*, 39(11), 1578-1588.
<http://dx.doi.org/10.1080/01904167.2016.1161777>
- FNC-Cenicafé. (2019). Anuario meteorológico 2018. Federación Nacional de Cafeteros de Colombia-FNC; Centro Nacional de Investigaciones de Café- CENICAFÉ (Eds.). Chinchiná-Caldas, Colombia. 492p. Recuperado de: <http://biblioteca.cenicafe.org/bitstream/10778/660/16/Anu2018.pdf>.
- Fonseca, F.L., Figueiredo, A.G., Teixeira, L.A., Pereira, F.L., Meira, B.F., Martins, M.A., Vilela, B.S. and Vilela, D.M. (2018). Development and application of biopolymer coatings to specialty green coffee beans: Influence on water content, color and sensory quality. *LWT - Food Science and Technology*, 96, 274–280.
<https://doi.org/10.1016/j.lwt.2018.05.037>
- Franco, C.M. e Mendes, H.C. (1949). Sintomas de deficiências minerais no cafeeiro. *Bragantia*, 9 (9-12), 165-173. <http://dx.doi.org/10.1590/S0006-87051949000300002>
- FNC, 2019. Informe del Gerente al Congreso Nacional de Cafeteros. <https://federaciondecafeteros.org/app/uploads/2019/12/Informe-del-Gerente-al-87-Congreso-Nacional-de-Cafeteros-2019.pdf>
- García, F. O. (2008). Cloro en trigo: Resultados de las experiencias en la región pampeana argentina Años 2001 a 2006. *Informaciones Agronómicas*, 38, 17-21.
- Garrido, V.M. (1993). Interpretación de análisis de suelos. Hojas divulgadoras 5. Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación. Secretaria General de Estructuras Agrarias. Instituto Nacional de Reforma y Desarrollo Agrario (Eds.). 40p. Recuperado de: https://www.mapa.gob.es/ministerio/pags/biblioteca/hojas/hd_1993_05.pdf.
- Goikovic, C.V.; Saavedra, G. (2007). Algunos aspectos de la salinidad en el cultivo del tomate y prácticas agronómicas de su manejo. *IDESIA(Chile)*.25(3): 47-58.
<https://scielo.conicyt.cl/pdf/idesia/v25n3/art06.pdf>
- Gonçalves, DL.; Gontijo, G.P.; Lopes, D.C.; Pereira, R.T. and De Jesus, L.J. (2018). Alternative sources of potassium in coffee plants for better soil fertility, productivity, and beverage quality. *Pesq Agropec Bras*, 53 (12), 1355-1362.
<http://dx.doi.org/10.1590/s0100-204x2018001200008>

- González, M.A., López, C.A., Carvajal, J.F. y Briceño, J.A. (1977). Efecto de la fuente de potasio en el acumulación de cloruros y sulfatos en el cafeto. *Agron Cost*, 1(1), 31-37. Recuperado de: https://www.mag.go.cr/rev_agr/v01n01_031.pdf.
- Hocking, P.J. (1980). The composition of phloem exudate and xylem sap from tree tobacco (*Nicotiana glauca* Groh.) *Ann. Bot. (London)*. 45: 633-643.
- Hsiao, T.; Lauchli, A. (1986). Role of potassium in plant–water relations. In *Advances in Plant Nutrition*.2: 281-312. Preager New York.
- ICO- International Coffee Organization. (2019). Total production by all exporting countries in thousand 60kg bags. Retrieved from: <http://www.ico.org/historical/1990%20onwards/PDF/1a-total-production.pdf>.
- ICO- International Coffee Organization. (2014). Coffee; botany, breeding. 222 Gray's Inn Road, London. http://www.ico.org/es/botanical_c.asp.
- Instituto Geográfico Agustín Codazzi-IGAC. (2014). Instructivo para los levantamientos de suelos. 92p. Disponible en: <http://igacnet2.igac.gov.co/intranet/UserFiles/File/procedimientos/instructivos/I40100-06-14.V1Codigos%20para%20los%20levantamientos%20de%20suelos.pdf>
- Illy, A.; Viani, R. (2005). Espresso coffee: the science of quality. Elsevier Academic Express. San Diego California. (USA). ISBN: 0-12-370371-9.390p. <https://books.google.es/books?hl=es&lr=&id=AJdlfSFCmVIC&oi=fnd&pg=PP2&dq=ILLY,+A.%3B+VIANI,+R.+Espresso+coffee:+the+science+of+quality.+%C3%81+msterdam+:+Elsevier,+2005.+398p.&ots=mm0sYdBTdR&sig=lqWKCuiMwbBJGXU8GgQRZ0b8DWc#v=onepage&q&f=false>
- IPI- International Potash Institute. (1981). Potassium Sulphate and Potassium Chloride. Their influence on the yield and quality of cultivated plants. IPI Research Topics No. 9. Zehler, E., Kreipe, H. and Gething, M.A. (Eds.). Worblaufen-Bern/Switzerland. 109p. Retrieved from: <https://www.ipipotash.org/uploads/udocs/26-ipi-research-topics-no-9.pdf>
- Ismail Cakmak y Atila M. Yazici (23 de Febrero de 2015). El Magnesio, un Nutriente Olvidado que Puede Salvar tu Cultivo. Extraído de <https://www.intagri.com/articulos/nutricion-vegetal/magnesio-nutriente-olvidado-salvar-cultivo>
- Johnston, E., Poulton, P.R., Fixen, P.E. and Curtin, D. (2013). Phosphorus: its efficient use in agriculture in: Sparks, D. L. (ed.) *Advances in Agronomy* Vol.123 Elsevier Editorial.177-228pp. <http://dx.doi.org/10.1016/B978-0-12-420225-2.00005-4>
- Kant, S., & Kafkafi, U. (2002). Absorción de potasio por los cultivos en distintos estadios fisiológicos. The Hebrew University of Jerusalem, Faculty of Agricultural, Food and Environmental Quality Sciences, Rehovot, Israel.
- Khalajabadi, S. S. (2008). *Fertilidad del suelo y nutrición del café en Colombia: guía práctica*. Federación Nacional de Cafeteros de Colombia.

- Kyrkby, E., & Römheld, V. (2007). Micronutrientes en la fisiología de las plantas: funciones, absorción y movilidad. *Ecuador: Quito*.
- Kulapichitr, F., Borompichaichartkul, C., Suppavorasatit, I. and Cadwallader, K. (2019). Impact of drying process on chemical composition and key aroma components of Arabica coffee. *Food Chem*, 291, 49-58. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2019.03.152>
- Lago, R.C.A. (2001). Lipídios em grãos de café. *B.CEPPA, Curitiba*. 19(2): 319-340.
- Laviola, G.B., Prieto, M.G., Bartolomeu de Souza, R., Alvarez, V.H. (2007). Dinámica del calcio e magnesio em folhas e frutos de Coffea arábica. *R. Bras. Si. Solo*. 31:319-329.
- Leroy, T.; Montagnon, C.; Cilas, C.; Yapo, C.; Charmetant, P.; Eskes, A.B. (1997). Reciprocal recurrent selection applied to Coffea canephora Pierre. III. Genetic gains and results of first cycle intergroup crosses. *Euphytica*. 95:347-354. doi.org/10.1023/A:1003074716379.
- Leroy, T.; Ribeyre, F.; Bertrand, B.; Charmetant, P.; Dafour, M.; Montagnon, C.; Marracini, P., Pot. D. (2006). Genetics of coffee quality. *Braz. J. Plant. Physiol.* 18(1): 229-242.
- Leroy, T.; De Bellis, F.; Legnate, H.; Kananura, E.; Gonzalez, G.; Pereira, L.F.; Carvalho, A.A.; Charmetant, P.; Montagnon, C.; Cubry, P.; Marraccini, P.; Pot, D.; de Kochko, A. (2011). Improving the quality of African robustas: QTLs for yield- and quality-related traits in Coffea canephora. *Tree Genetics & Genomes*. 7(4):781-810 DOI 10.1007/s11295-011-0374-6.
- Lima, F.O. and Malavolta, E.I. (2003). Studies on mineral nutrition of the coffee plant (*Coffea arabica* L. cv. Catuaí Vermelho). LXIV. Remobilization and re-utilization of nitrogen and potassium by normal and deficient plants. *Braz J Biol*, 63(3), 481-490. <http://dx.doi.org/10.1590/S1519-69842003000300014>
- Lince, S.L. y Sadeghian, K.S. (2016). Producción de café (*Coffea arabica* L.) en función de las propiedades del suelo, en dos localidades de Quindío, Colombia. *Revista de Investigación Agraria y Ambiental*, 7(1), 71-82. <https://doi.org/10.22490/issn.2145-6453>
- Malta-Ribeiro, M.; Dias, N. F.; Gontijo, G. P.T. (2003). Composição química, produção e qualidade do café fertilizado com diferentes fontes de nitrogênio. *Ciencia e Agrotecnologia*. 27(6): 1246-1252. DOI: 10.1590/S1413-70542003000600006
- Manning, D.A.; Baptista, J.; Sánchez, L.M. and Brandt, K. (2017). Testing the ability of plants to access potassium from framework silicate minerals. *Science of the Total Environment*, 574, 476–481. <http://dx.doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.09.086>
- Marschner, H. (1986). Mineral nutrition of higher plants. Academic Press, Londres. pp. 7-73, 285-299.

- Martins, L.D., de Souza, M.L., Tomaz, M.A. and Teixeira, A.J. (2015). The nutritional efficiency of *Coffea* spp. A review. *African Journal of Biotechnology*, 14(9), 728-734. <http://dx.doi.org/10.5897/AJB2014.14254>
- Martins, P.E. and Furlani Jr., E. (2010). Yield performance and leaf nutrient levels of coffee cultivars under different plant densities. *Sci Agric (Piracicaba, Braz)*, 67 (6), 720-726. <http://dx.doi.org/10.1590/S0103-90162010000600015>
- Mendonca, V.L. L.M.; Fonseca, R.G.; Guimaraes, A.N.; Meira, F.; Marques, E.R. (2007). Composição química de grãos crus de cultivares de *Coffea arabica* L. suscetíveis e resistentes à Hemileia vastatrix B. *Ciencia Agrotecniá Lavras*. 31(2):413-419.
- Montilla, P.J.; Arcila, P.J.; Aritzabal, L.M.; Montoya, R.E.C.; Puerta, Q.G.I.; Oliveros, T.C.; Cadena, G.G. (2008). Caracterización de algunas propiedades físicas y factores de conversión del café durante el proceso de beneficio húmedo tradicional. *Cenicafé*. 59(2): 120-142.
- Moura, W.M., Soares, Y.J.B., Amaral, J.A., Gravina, G.A., Barili, L.D. and Vieira, H.D. (2016). Biometric analysis of arabica coffee grown in low potassium nutrient solution under greenhouse conditions. *Genet Mol Res*, 15(3), gmr.15038753. <http://dx.doi.org/10.4238/gmr.15038753>
- Nagao, M.A., Kobayashi, K.D. and Yasuda, G.M. (1986). Mineral deficiency symptoms of coffee. Research extension series 073. HITAHR-College of Tropical Agriculture and Human Resources. University of Hawaii (Eds.). Honolulu, Hawaii. 16p. Retrieved from: <https://www.ctahr.hawaii.edu/oc/freepubs/pdf/RES-073.pdf>.
- Nitsos, R. E. and Evans, H. J. (1969). Effects of univalent cations on the activity of particulate starch synthetase. *Plant Physiol.* 44(9): 1260-1266. doi: 10.1104/pp.44.9.1260.
- Pereira, A. R.G (1997). Efeito da inclusão de grãos defeituosos na composição química e qualidade do café (*Coffea arabica* L.) "estritamente mole". Universidad Federal de Lavras. Thesis de grado. 111p. <http://www.sbicafe.ufv.br/bitstream/handle/123456789/341/155994f.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Pinkert, C. (2004). Nutrient and quality analysis of coffee cherries in Huong Hoa district, Vietnam. Note 280. Plant Research International (Eds.). Wageningen University and Research Centre, The Netherlands. 86p. Retrieved from: <https://edepot.wur.nl/38916>.
- Prabhakaran, N.K.P. (2010). Coffee. In: The agronomy and economy of important tree crops of the developing world. (pp.181-208). Elsevier Insights (Eds.). <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-384677-8.00006-0>
- Prabhu, A. S., Fageria, N. K., Huber, D. M. and Rodrigues, F. A. (2007). Potassium nutrition and plant diseases. In Mineral Nutrition and Plant Disease.

- Prete, C. C.E. (1992). Condutividade elétrica do exsudato de grãos de café (*Coffea arabica*, L.) e sua relação com a qualidade da bebida. Piracicaba. Tesis de la escuela superior de agricultura Luis de Quiroz. Universidad de Sao Paulo. 135p. <http://www.sbicafe.ufv.br/bitstream/handle/123456789/392/101376f.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Puerta, Q G.I. (1999). Influencia del proceso de beneficio en la calidad del café. *Cenicafé*. 50(1): 78-88.
- Pérez, N.S. (2017). Efecto del CaCl₂ sobre el contenido de proteínas, prolina, acidez titulable, clorofila y contenido relativo de agua en Aloe Vera expuesta a salinidad por NaCl. *Biota Colombiana*. 18(1):29-40.
- Puerta, Q.G.I., González, R.F., Correa, P.A., Álvarez, L.I., Ardila, C.J., Girón, O.O., Ramírez, Q.C., Baute, B.J., Sánchez, A.P., Santamaría, B.M. y Montoya, D.F. (2016). Diagnóstico de la calidad del café según altitud, suelos y beneficio en varias regiones de Colombia. *Cenicafé*, 67(2),15-51. Recuperado de: <https://www.cenicafe.org/es/publications/2.Diagnostico.pdf>.
- Puerta, Q, G.I (2016). Calidad física del café de varias regiones de Colombia según altitud, suelos y buenas prácticas de beneficio. *Cenicafé*. 67(1): 7-40.
- Ramírez, B. V. H., Moreno, A. M., & López, J. C. (2012). Evaluación temprana de la deficiencia del nitrógeno en café y aplicaciones. *Avances Técnicos Cenicafé* No 420.4p.
- Ramírez, B.V.H., Gaitán, B.A., Benavides, M.P., Constantino, C.L., Gil, P.Z., Sadeghian, K.S. y González, O.H. (2014). Recomendaciones para la reducción del riesgo en la caficultura de Colombia ante un evento climático de El Niño. *Avances Técnicos Cenicafé* 445. 12p.
- Ramírez. 2014. La fenología del café, una herramienta para apoyar la toma de decisiones. *Avances Técnicos Cenicafé* 441. 12p.
- Riaño, L.C. (2013). Efecto de la humedad del café crudo en las propiedades del café tostado. *Entramado*, 9(2), 214-222.
- Rojo, J.E. y Pérez, U.E. (2014). Café I (*G. Coffea*). *Reduca (Biología) Serie Botánica*, 7(2),113-132..
- Rosales, V.M.A.; Franco, N.J.D.; Moreno, R.F.J.; Colmero, F.J.M.(2020) Beneficios de una fertilización rica en cloro para la agricultura y sus efectos en la salud humana. *Horticultura*. 4(239):42-47.
- Sadeghian, S., Mejía, B., & Arcila, J. (2006). Composición elemental de frutos de café y extracción de nutrientes por la cosecha en la zona cafetera de Colombia. *Cenicafé*.57(4):251-261.
- Sadeghian, K.S.; Arias, S.E. (2018). Lixiviación del potasio en suelos de la zona cafetera y su relación con la textura. *Bioteología en el Sector Agropecuario y Agroindustrial*, 16(1), 34-42. <http://dx.doi.org/10.18684/bsaa.v16n1.632>

- Sadeghian, K.S. Gonzalez, O.H. (2012). Alternativas generales de fertilización para cafetales en la etapa de producción. *Avances Técnicos Cenicafé*. No 424.8p.
- Sadeghian, K.S.; Mejia, M.B.; Gonzalez, O.H. (2013). Acumulación de Nitrógeno, Fósforo y Potasio en los frutos de café. *Avances Técnicos Cenicafé*. No 429.8p.
- Sadeghian, K.S.(2008). Fertilidad del suelo y nutrición del café en Colombia. *Boletín Técnico Cenicafé* No 32. 45p.
- Suaréz, S. J.C.; Rodriguez, B.E.; Duran, B.E.H. (2015). Efecto de las condiciones de cultivo, las características químicas del suelo y el manejo de grano en los atributos sensoriales de café (*Coffea arabica* L.) en taza. *Acta Agron*, 64(4), 342-348. doi.org/10.15446/acag.v64n4.44641
- Salisbury, F. B., & Ross, C. W. (2000). *Fisiología Vegetal*. España: Paraninfo. 523p.
- SCAA-Specialty Coffee Asociation Of America. (2015). SCAA Protocols/ Cupping Speciality Coffee. Retrieved from: <https://sca.coffee/research/protocols-best-practices?page=resources&d=cupping-protocols>
- SCAN- Sustainable Commodity Assistance Network. (2012). Evaluación sensorial del café. Plataforma Nacional de Café Sostenible–SCAN Guatemala (Eds.). 37p. Recuperado de: <http://scanprogram.org/wp-content/uploads/2012/08/20151026-Evaluacion-sensorial-del-cafe.pdf>.
- Sen-Gupta, A., Berkowitz, G. A.; Pier, P. A. (1989). Maintenance of photosynthesis at low leaf water potential in wheat. *Plant.Physiol.*89:1358-1364.
- Shrestha, S., Rijal, S. K., Pokhrel, P., Rai, K. P. (2016). A simple HPLC method for the determination of caffeine content in tea and coffee. *J. Food Sci. Technol.* 9, 74. doi.org/10.3126/jfstn.v9i0.16200
- Silva, S.J., Lima, N.J., Prieto, M.H. and Álvarez, V.V. (2018). Relationship between coffee leaf analysis and soil chemical analysis. *Rev Bras Cienc Solo*, 42: e0170109, 1-13. doi.org/10.1590/18069657rbcsc20170109
- Silva, E.B., Nogueira, F.D., Guimaraes, P.T.G. and Furtini, N.A.E. (2001). Coffee tree response to potassium fertilization in low and high yields. *Pesq Agropec Bras*, 36(11), 1331-1337. doi.org/10.1590/S0100-204X2001001100002
- Silva, B.E.;Dias, N. F.; Gontijo, G.P.T.; De Rezende, S.J.; Costa, L.(1999). Fontes e doses de potássio na producao e qualidade do grão de café beneficiado. *Pesq Agropec Bras*. 34(3): 335-345.
- Sobreira, F.M.; Guimaraes, R.J.; Colombo, A.; Scalco, M.S.; Carvalho, J.G. (2011). Nitrogen and potassium fertigation in coffee at the formation phase, with high plant density. *Pesq Agropec Bras*. 46(1):9-16. doi.org/10.1590/S0100-204X2011000100002

- Sorane, G.K., dos Santos, S.M. and Toledo, B.M. (2014). Bioactive compounds content in roasted coffee from traditional and modern *Coffea arabica* cultivars grown under the same edapho-climatic conditions. *Food Research International*, 61, 61–66. <http://dx.doi.org/10.1016/j.foodres.2014.04.031>
- Speer, K.; Kölling, S. I.(2006). The lipid fraction of the coffee bean. *Braz. J. Plant. Physiol.* 18(1): 201-2016.
- Tiemann, T., Maung, A.T., Duc, D.N., Minh, T.T., Fisher, M., Nalin, d.P.E. and Oberthür, T. (2018). Crop Nutrition for Vietnamese Robusta Coffee. *Better Crops*, 102(3), 20-23..
- Torres, Y. (2018). Tesis: Calidad física y sensorial de dos variedades de café (*Coffea arabica* L.), cultivados en dos pisos altitudinales producidos en el distrito de inkawasi – cusco. <http://repositorio.unajma.edu.pe/handle/123456789/420>
- UPME- Unidad de Planeación Minero Energética. (2018). Potasio. Caracterización y análisis de mercado internacional de minerales en el corto, mediano, y largo plazo con vigencia al año 2035. CRU Consulting (Eds.). Santiago, Chile. 54p. Recuperado de:http://www1.upme.gov.co/simco/Cifras-Sectoriales/Datos/mercado-inter/Producto3_Potasio_FINAL_11Dic2018.pdf.
- Uribe, H.A. (1977). Constantes físicas y factores de conversión en café. *Avances Técnicos Cenicafé*. No 65. 4p.
- Vignola, R., Watler, W., Poveda, C.K., Vargas, C.A., Mora, A.M., Rivera, V.P. y Morales, M. (2018). Prácticas efectivas para la reducción de impactos por eventos climáticos en el cultivo de café en Costa Rica. *Catie; Minae; Dcc; Fundecooperación (Eds.)*. San José, Costa Rica, 115p. Recuperado de: <http://www.mag.go.cr/bibliotecavirtual/reduccion-impacto-por-eventos-climaticos/Informe-final-cafe.pdf>.
- Villareal, P.D.; Baena, C.L.; Posada, S. H. E. (2012). Análisis de lípidos y ácidos grasos en café verde de líneas avanzadas de *Coffea arabica* cultivadas en Colombia. *Cenicafé*. 63(1): 19-40.
- Vinecky, F.; Davrieux, F.; Mera, A.C.; Alves, G.S.C.; Lavagnini, G.; Leroy, T.; Andrade, A.C. (2017). Controlled irrigation and nitrogen, phosphorous and potassium fertilization affect the biochemical composition and quality of Arabica coffee beans. *J Agric Sci*, 155 (6), 902-918. [doi.org/10.1017/S0021859616000988](http://dx.doi.org/10.1017/S0021859616000988)
- Von Uexkull, H. R. (1996) El Cloro en la nutrición de la Palma aceitera. *Informaciones Agronómicas*.24: 4-6.
- White, P. y M. Broadley. 2003. Calcium in plant. *Annals of Botany* 92: 487-511.
- Xu, G., Magen, H.; Tarchitzky, J.; Kafkafi, U. (1999). Advances in chloride nutrition of plants. *Advances in agronomy*, 68, 97-150.

Zapata, A.P.C.; Andrade, C.H.J.; Nieto, A.Z.K. (2017). Comportamiento ecofisiológico del cafeto (*Coffea arabica* L.) cv. Castillo en sistemas agroforestales de Tibacuy, Cundinamarca. *Rev U.D.C.A Act. & Div. Cient*, 20(1), 61-70. doi.org/10.31910/rudca.v20.n1.2017.63