



UNIVERSIDAD  
**NACIONAL**  
DE COLOMBIA

**Composición química asociada al perfil de taza de un café especial variedad Castillo® proveniente de Barbosa Antioquia y beneficiado bajo diferentes procesos de fermentación**

**Johanna Marcela Acosta Arbeláez**

Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín

Facultad de Ciencias Agrarias

Medellín, Colombia

2020

**Composición química asociada al perfil de taza de un café especial variedad Castillo® proveniente de Barbosa Antioquia y beneficiado bajo diferentes procesos de fermentación**

**Johanna Marcela Acosta Arbeláez**

Trabajo de investigación presentado como requisito parcial para optar al título:

**Magister en Ciencia y tecnología de los alimentos**

Director

Ph.D. Jesús Humberto Gil González

Codirector

Ph. D. Héctor José Ciro Velásquez

Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín

Facultad de Ciencias Agrarias

Medellín, Colombia

2020

## **Declaración de obra original**

Yo 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.

---

Nombre

Fecha DD/MM/AAAA

## **Agradecimientos**

Agradezco al Centro de los Recursos Naturales Renovables La Salada (SENA La Salada, Caldas, Antioquia) por la financiación de este proyecto.

Al administrador y propietario de la finca la Lupita Elkin Henao y su familia por su participación desde la cosecha del café hasta el análisis de calidad.

Al instructor Andrés Ruiz y Wilson Barragán por compartir su conocimiento y experiencia en la realización de este trabajo.

Al Laboratorio de servicios tecnológicos y todo su personal por el apoyo en la realización de las pruebas que dan sustento al presente trabajo.

## Resumen

### **Composición química asociada al perfil de taza de un café especial variedad Castillo® proveniente de Barbosa Antioquia y beneficiado bajo diferentes procesos de fermentación**

El café es uno de los productos básicos más comercializados, cuya producción ha aumentado de manera constante a lo largo de los años. Se estima que la producción actual es de 176,1 millones de toneladas a nivel mundial, siendo Brasil, Vietnam y Colombia los principales productores. Este aumento en la producción está asociado al creciente interés de los consumidores por los cafés especiales, orgánicos, de comercio justo, amigables con el medio ambiente y con beneficios para la salud; entre otras tendencias que se viene tomando los mercados mundiales. El objetivo de este estudio fue Identificar la composición química y calidad sensorial del café obtenido por diferentes métodos de proceso (seco, semi-seco y húmedo). Se evaluó el efecto de los métodos de procesamiento sobre el café (*C. Arábica*) variedad Castillo® cultivada en Antioquia (Colombia), para lo cual se realizaron 20 análisis químicos al café verde que comprenden: compuestos volátiles y compuestos nutricionales (ácidos orgánicos, ácidos clorogénicos, carbohidratos, cafeína y minerales), y se relacionaron con el perfil de taza del café tostado. Posteriormente, se analizaron los datos agrupados en tres grupos: a) compuestos volátiles y perfil de taza, b) compuestos nutricionales y perfil de taza, analizados mediante un análisis de componentes principales (ACP) y c) ácidos clorogénicos en café verde y perfil de taza mediante un análisis de estadística descriptiva. En el grupo “a” dos CP explicaron aproximadamente el 64,18% de la variación total, mientras que en el grupo “b” la distribución de las varianzas de los componentes resultantes de los tres primeros CP explicó el 100% de la variabilidad. El ACP mostró que el método de procesamiento en seco presenta una diferencia significativa en cuanto a su perfil químico y sensorial con respecto a los otros métodos evaluados y es una herramienta que permitirá tomar elecciones más asertivas al momento de elegir un método de procesamiento.

**Palabras claves:** Café, Arabica, húmedo, semi-seco, seco, ACP

## Abstract

### **Chemical composition associated with the cup profile of a special Castillo® variety coffee from Barbosa Antioquia and benefited under different fermentation processes**

Coffee is one of the most traded commodities, whose production has steadily increased over the years. Current production is estimated to be 176.1 million tons worldwide, with Brazil, Vietnam and Colombia being the main producers. This increase in production is associated with the growing interest of consumers for specialty coffees, organic, fair trade, environment-friendly, and with health benefits; among other trends taking place in world markets. The aim of this study was to identify the chemical composition and sensory quality of the coffee obtained by different process methods (dry, semi-dry and wet). The effect of the processing methods on the Castilla® variety coffee (*C. Arabica*) cultivated in Antioquia (Colombia) was evaluated, for which 20 chemical analyzes were carried out on green coffee that includes; volatile compounds and nutritional compounds (organic acids, chlorogenic acids, carbohydrates, caffeine and minerals) and were related to the cup profile of roasted coffee. Afterwards, the data were analyzed by grouping them into three groups: a) volatile compounds and cup profile, b) nutritional compounds and cup profile, analyzed by principal component analysis (PCA) and c) chlorogenic acids in green coffee and cup profile in roasted coffee using descriptive statistical analysis. In group “a”, two PCs explained approximately 64.18% of the total variation, while in group “b” the distribution of the variances of the components resulting from the first three PCs explained 100% of the variability. The PCA showed that the dry processing method presents a significant difference in terms of its chemical and sensory profile with respect to the other evaluated methods and it is a tool that will allow making more assertive choices when choosing a processing method.

**Keywords:** Coffee, Arabica, Wet, semi-dry, dry, PCA

# Contenido

<b>1. Introducción .....</b>	<b>11</b>
<b>2. Objetivos .....</b>	<b>14</b>
2.1. Objetivo general .....	14
2.2. Objetivos específicos .....	14
<b>3. Revisión de literatura.....</b>	<b>15</b>
3.1. Cafés Especiales.....	15
3.2. Variedades de café .....	16
3.3. Caracterización física del grano de café.....	17
3.4. Métodos de procesamiento.....	18
3.5. Caracterización química del grano de café .....	22
3.5.1. Carbohidratos .....	22
3.5.2. Ácidos clorogénicos.....	23
3.5.3. Cafeína.....	25
3.5.4. Minerales.....	26
3.5.5. Ácidos Orgánicos .....	28
3.5.6. Compuestos volátiles.....	29
3.6. Calidad sensorial .....	31
<b>2. Materiales y métodos .....</b>	<b>33</b>
2.1. Recolección de fruto .....	33
2.2. Caracterización física del fruto de café .....	34
2.3. Métodos de procesamiento del café .....	35
2.3.1. Método de procesamiento húmedo .....	35
2.3.2. Método de procesamiento semi-seco Honey Amarillo .....	35
2.3.3. Método de procesamiento semi-seco Honey Rojo.....	35
2.3.4. Método de procesamiento seco.....	36

2.3.5. Preparación de las muestras .....	36
2.4. Preparación de las muestras de café obtenido por los diferentes métodos de procesamiento.....	36
2.5. Análisis químico y sensorial del café obtenido por diversos métodos de procesamiento.....	37
2.5.1. Determinación de ácidos clorogénicos.....	37
2.5.2. Determinación de carbohidratos .....	38
2.5.3. Determinación de cafeína.....	39
2.5.4. Determinación de ácidos orgánicos.....	40
2.5.5. Determinación de minerales .....	40
2.5.6. Determinación de compuestos volátiles .....	42
2.5.7. Calidad sensorial.....	43
2.6. Análisis estadístico .....	47
<b>3. Resultados y discusión.....</b>	<b>49</b>
3.1. Caracterización fisicoquímica de los frutos de café .....	49
3.2. Análisis químico y sensorial del café fermentado y seco.....	52
3.2.1. Grupo A. Compuestos volátiles y perfil de taza (PT).....	52
3.2.2. Grupo B. Ácidos orgánicos, carbohidratos, cafeína, minerales y perfil de taza.....	60
3.2.3. Grupo C. Ácidos clorogénicos .....	64
<b>4. Conclusiones .....</b>	<b>67</b>
<b>5. Recomendaciones .....</b>	<b>68</b>
<b>6. Bibliografía.....</b>	<b>69</b>
<b>7. Anexos.....</b>	<b>79</b>

## Lista de Tablas

<b>Tabla 1.</b> Diferencias de compuestos químicos en las especies de café.....	16
<b>Tabla 2.</b> Ventajas y desventajas de los diferentes métodos de procesamiento.....	19
<b>Tabla 3.</b> Concentración de los minerales en granos de café verde.....	27
<b>Tabla 4.</b> Contenido de ácidos en granos de café según la especie .....	28
<b>Tabla 5.</b> Compuestos volátiles del café verde obtenidos por SPME y su correlación en el perfil de taza. ....	30
<b>Tabla 6.</b> Ecuaciones lineales y coeficiente de determinación para los ácidos orgánicos, carbohidratos, cafeína y minerales. ....	42
<b>Tabla 7.</b> Puntuaciones promedio de catación, resultado de los cuatro métodos de procesamiento. ....	44
<b>Tabla 8.</b> Descriptores organolépticos de catación, resultado de los métodos de procesamiento húmedo, seco, semi-seco honey rojo y semi-seco honey amarillo.....	46
<b>Tabla 9.</b> Peso promedio del fruto de café de la variedad castillo ® recolectadas de acuerdo con la característica de color. ....	49
<b>Tabla 10.</b> Determinación de grados Brix para cerezas recolectadas por características de color rojo y morado. ....	50
<b>Tabla 11.</b> Determinación de pH para cerezas recolectadas por características de color rojo y morado.....	51
<b>Tabla 12.</b> Compuestos volátiles en el perfil de los métodos de procesamiento semi-seco honey amarillo, semi-seco honey rojo, seco y húmedo (los porcentajes corresponden a las abundancias relativas). ....	54
<b>Tabla 13.</b> Relación del compuesto volátil con perfil de taza.....	55
<b>Tabla 14.</b> Componentes principales en compuestos volátiles y perfil de taza en café para los cuatro procesos de fermentación.....	57
<b>Tabla 15.</b> Componentes principales nutricionales y perfil de taza en café especial variedad Castillo ®, como resultado de cuatro procesos de fermentación diferentes .....	60

## Lista de Figuras

<b>Figura 1.</b> Etapas del desarrollo del fruto de café, y épocas de mayor susceptibilidad del fruto a diferentes factores bióticos y abióticos. ....	18
<b>Figura 2.</b> Contenido de carbohidratos de bajo peso molecular que se encuentran en los granos de café verde (Procesados en seco). ....	23
<b>Figura 3.</b> Estructuras químicas de los ácidos clorogénico. ....	25
<b>Figura 4.</b> Estructura química de la cafeína ....	26
<b>Figura 5.</b> Lote de café variedad Castillo®, finca La Lupita, Barbosa - Antioquia. ....	33
<b>Figura 6.</b> Frutos de café agrupados por características de color. ....	34
<b>Figura 7.</b> Correspondencia de compuestos volátiles y perfil de taza en cuatro procesos de fermentación. ....	55
<b>Figura 8.</b> Componentes principales de las dimensiones 1 y 2 de la correlación de compuestos volátiles y perfil de taza en cuatro procesos de fermentación. ....	58
<b>Figura 9.</b> Componentes principales de las dimensiones 1 y 2, para el análisis de ácidos orgánicos, carbohidratos, cafeína, minerales y perfil de taza para cuatro métodos de procesamiento. ....	62
<b>Figura 10.</b> Componentes principales de las dimensiones 3 y 1, para el análisis de ácidos orgánicos, carbohidratos, cafeína, minerales y perfil de taza para cuatro métodos de procesamiento. ....	62
<b>Figura 11.</b> Concentración promedio del ácido neoclorogénico y el ácido clorogénico por tipo de fermentación. ....	65

## 1. Introducción

El café es uno de los productos básicos más comercializados, cuya producción ha aumentado de manera constante a lo largo de los años. Se estima que la producción actual es de 176,1 millones de toneladas a nivel mundial, siendo Brasil, Vietnam y Colombia los principales productores (USDA, 2020). Este aumento en la producción está asociado al creciente interés de los consumidores por los cafés especiales, orgánicos, de comercio justo, amigables con el medio ambiente y con beneficios para la salud; entre otras tendencias que se viene tomando los mercados mundiales (Samoggia & Riedel, 2019; Ufer et al., 2019).

Los mercados internacionales señalan cada vez más la demanda de productos diferenciados, por lo cual, los sectores agrícolas consideran estos productos como opciones de mayor valor para aumentar los ingresos de la explotación y, así mantener una participación activa en el mercado, ofreciendo cafés de alta calidad y que supere la expectativa de los consumidores (Bote & Jan, 2017; Oberthür et al., 2011).

Este hecho ha dado origen a una cultura cafetera que se basa en la acción colectiva de más de medio millón de familias productoras de café que atienden directamente sus cultivos, realizan una recolección selectiva del grano y un trabajo de procesamiento de post-cosecha, con miras a cumplir con los diversos controles de calidad a los que está sometido el café colombiano desde la finca hasta los centros mundiales de consumo (FNC, 2016). Es por esto, que este producto se ha convertido en uno de los grandes motores de la economía colombiana con una producción en 2019 de 14,8 millones de sacos de 60 kg (FNC, 2020). Además, la caficultura se destaca por ser uno de los sectores que más ha integrado social y económicamente a los colombianos, con proyectos que han aportado al desarrollo en cuanto a obras de infraestructura comunitaria y domiciliaria, al igual que programas en educación, salud y seguridad alimentaria (FNC, 2017).

La calidad del café depende de diferentes variables del cultivo como: nivel de sombra, altitud, temperatura diaria, cantidad y distribución de las precipitaciones, características físicas y químicas del suelo, nutrición, genotipo y lugar de origen, así como medidas agronómicas como la poda y el tamaño del fruto de café. Estas variables influyen de forma directa en los atributos del café, tales como; físicos (longitud, tamaño o peso de los granos de café), características organolépticas (acidez, aroma, cuerpo, regusto, sabor,

preferencia general o equilibrio) y constituyentes químicos (cafeína, trigonelina, ácido clorogénico, entre otros) (Agwanda et al., 2003; Bote & Jan, 2017; Oberthür et al., 2011).

Por otra parte, los métodos de procesamiento del café también influyen en la preservación y mejora de la calidad intrínseca del café. Estudios previos han reportado los atributos y defectos que generan los diferentes métodos de procesamiento desde el punto de vista químico y sensorial (Hamdouche et al., 2016; Pereira et al., 2020). Los métodos de procesamiento en las diferentes regiones productoras son principalmente el húmedo, semi-seco (honey amarillo y rojo) y seco. En el procesamiento húmedo, la pulpa y/o el mucílago se eliminan mecánicamente y los granos se fermentan en tanques con un determinado volumen de agua. El proceso semi-seco es una variación del proceso húmedo, en el que los frutos del café se despulpan, pero el proceso de fermentación ocurre directamente bajo el sol en una plataforma, este proceso se caracteriza por el resultado de tres colores de pergamino diferentes: amarillo, rojo y negro; causada por las enzimas del mucílago que cambian de color después de ser oxidadas por el aire. Por su parte el procesamiento en seco, se utiliza para fermentar y secar al sol el café sin lavar en plataformas de madera y/o cemento (Evangelista et al., 2014; Hamdouche et al., 2016; Pereira et al., 2020).

Durante el método de procesamiento se llevan a cabo procesos catabólicos de oxidación de sustancias orgánicas para producir otros compuestos orgánicos y energía. En este proceso los carbohidratos (glucosa, fructosa, maltosa, sacarosa y lactosa) son los principales sustratos que se fermentan, pero algunas bacterias pueden fermentar otros compuestos como ácidos orgánicos, aminoácidos, purinas y pirimidinas (Puerta Q. & Echeverry Molina, 2015). Además, durante la fermentación se producen varios cambios fisiológicos en los granos, como la disminución del contenido de agua y azúcares simples, el desarrollo de precursores de aroma y sabor, además de cambios en el color, la densidad, los grados brix del mucílago, formación de etanol, dióxido de carbono y diversos ácidos carboxílicos como láctico, málico, acético, propiónico, butírico, cítrico, succínico junto con aldehídos y cetonas, entre otros compuestos orgánicos (Avallone et al., 2001; Haile & Kang, 2019).

La determinación de la composición química y su relación con el perfil sensorial del café ha sido reportada por diferentes autores (Bressanello et al., 2017; Figueiredo et al., 2018; Kulapichitr et al., 2019; Souza et al., 2019), sin embargo, aún son necesarios estudios que permitan comprender y relacionar diferentes variables que afectan la calidad final del café con el fin de generar una oferta confiable, reproducible y sostenible en el tiempo. Por

lo cual es necesario combinar técnicas analíticas que permitan una correcta caracterización de los métodos de procesamiento con herramientas estadísticas que simplifiquen la información generada; de esta forma se podrá seleccionar los procesos que mejor perfil químico, de sabor y aroma se generan durante la fermentación y el secado. Entre las técnicas estadísticas de análisis descriptivo más sólidas, se encuentra el análisis de Componentes Principales (ACP), el cual reduce las dimensiones de los datos de acuerdo con sus similitudes y diferencias sin perder información, utilizando las combinaciones lineales de las variables, que se definen como componentes principales (Kaiser, 1961).

De acuerdo a lo anterior y con el fin de reforzar la discusión acerca de los métodos de procesamiento y su relación con la composición química y el perfil sensorial del café, este estudio plantea Identificar la composición química y calidad sensorial del café obtenido por diferentes métodos de procesamiento, húmedo, semi-seco honey amarillo, semi-seco honey rojo y seco, usando como herramienta un análisis estadístico multivariado.

## **2. Objetivos**

### **2.1. Objetivo general**

Identificar la composición química y calidad sensorial del café obtenido por diferentes métodos de proceso (seco, semi-seco y húmedo).

### **2.2. Objetivos específicos**

- Estandarizar técnicas para la cuantificación de compuestos químicos (carbohidratos, ácidos orgánicos, ácidos clorogénicos, cafeína, minerales y compuestos volátiles) del café obtenido mediante métodos de procesamiento (seco, semi-seco y húmedo).
- Determinar la composición química de café verde obtenido mediante métodos de procesamiento (seco, semi-seco y húmedo).
- Identificar la calidad sensorial del café obtenido por diferentes métodos de procesamiento (seco, semi-seco y húmedo).
- Relacionar la composición química del café verde obtenido por diferentes métodos de procesamiento (seco, semi-seco y húmedo) con la calidad sensorial.

### 3. Revisión de literatura

En la época actual, los cafés con sabor y calidad específicos tienen un valor agregado, es por esto, por lo que la demanda de los consumidores de productos diferenciados por las características de calidad inherentes también está creciendo. Por lo tanto, para mantener su participación en el mercado mundial, es imperativo producir café de calidad alta y estable que satisfaga la demanda y las preferencias de los consumidores (Bote & Jan, 2017). Pero cuando se habla de calidad del café, se hace referencia a atributos físicos (longitud, tamaño o peso de los granos de café), características organolépticas (acidez, aroma, cuerpo, regusto, sabor, preferencia general o equilibrio) y constituyentes químicos (cafeína, trigonelina, ácido clorogénico, entre otros). Cada uno de estos atributos depende de variables del cultivo como: nivel de sombra, altitud, temperatura diaria, cantidad y distribución de las precipitaciones, características físicas y químicas del suelo, nutrición, genotipo y lugar de origen, así como medidas agronómicas como la poda y el tamaño del fruto de café (Agwanda et al., 2003; Bote & Jan, 2017; Oberthür et al., 2011).

#### 3.1. Cafés Especiales

El término cafés especiales, de acuerdo con la FNC (FNC, 2008), se refiere cuando el consumidor está dispuesto a pagar un precio superior que llegue al productor, debido a que el café tiene atributos que lo diferencian como cafés de origen, cafés de preparación, cafés sostenibles y/o cafés orgánicos.

- Cafés de Origen: Se dividen en tres subcategorías, regionales (provenientes de una región específica sin mezclar), exóticos (cultivadas en zonas bajo condiciones excepcionales) y de finca (producidas en una sola finca).
- Los cafés de preparación: Tienen una apariencia y forma especial, se clasifican como: selectos (mezcla de varios tipos de café), café caracol (granos en forma de caracol) y café supremo (de acuerdo al tamaño del grano, retenido en malla # 18) que dan una calidad en taza excepcional.
- Los cafés sostenibles: Tienen un alto compromiso con la protección del medio ambiente, promueven el desarrollo social promoviendo el mercado justo.
- Cafés orgánicos: No utilizan productos químicos en toda la cadena del café y tiene un sello de calidad que lo certifica.

Además de esta clasificación, los granos de café verde de alta calidad muestran pocos o ningún defecto físico y cuando se tuestan, tienen un carácter distintivo en la taza y altos puntajes en catación (Tolessa et al., 2016). Cuando un café es considerado especial, su calificación sensorial es superior a 80 puntos sobre 100 (Guambi D. et al., 2018). Siendo la calificación final entre 80-84.9 puntos la valoración baja de café especial (Tolessa et al., 2016). Según la Asociación de Cafés Especiales de América (SCAA por las siglas en inglés), en la actualidad SCA, el puntaje de catación está asociado a ciertos atributos sensoriales (fragancia/aroma, sabor, sabor residual, acidez, cuerpo, uniformidad, balance, taza limpia, dulzor y puntaje del catador) los cuales tienen un puntaje de valoración de 1 a 10 siendo la suma de todos los puntajes por cada atributo la clasificación final de la evaluación sensorial (Guambi D. et al., 2018). Para caracterizar el café, es necesario identificar la variedad del café, los atributos físicos, químicos y sensoriales del grano que se trabaja y así poder identificar las características para considerarlo especial.

### 3.2. Variedades de café

Existen dos especies principales de café, Arábica (*Coffea Arabica L.*) y Robusta (*C. Canephora*), siendo la Arábica la variedad que más se cultiva en Centroamérica y Suramérica, como cafés suaves lavado, esta especie tiene características de balance, acidez natural e intensos aromas que son apreciados por los compradores, volviendo a la especie Arábica la más comercializada. La especie Robusta se procesa generalmente por vía seco, otorgándole notas terrosas, amargor fuerte y acidez baja (Puerta Q., 2008). Algunas de las diferencias químicas que se pueden encontrar entre las dos especies se muestran en la **Tabla 1**.

**Tabla 1.** Diferencias de compuestos químicos en las especies de café.

Compuesto	<i>Coffea Arábica L.</i>	Robusta ( <i>C. Canephora</i> )
Cafeína (%)	1,2	2,2
Lípidos (%)	16-18	10-11
Diterpenos en forma libre y esterificada (%)	0,7-2,5	1,1-3,5

Tomado de la fuente (Puerta Q., 2008)

Algunos mejoramientos genéticos de las variedades del café Arábica que se han realizado son las variedades Típica, Borbón, Caturra, Colombia, Tabi, Castillo® y Castillo®

Regionales, siendo la variedad Castillo® y Castillo® Regionales, las últimas liberadas en el 2005, estas tienen características de resistencia a la Roya, buen tamaño de grano, productividad, excelente granulometría y calidad de taza (Cortina et al., 2013).

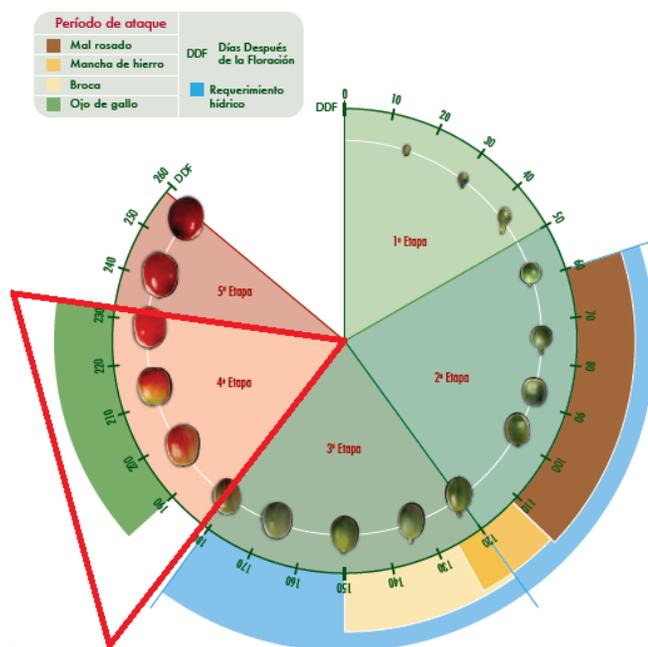
### 3.3. Caracterización física del grano de café

Luego de seleccionar la variedad de café con menor vulnerabilidad a enfermedades y mejores características de producción, es necesario determinar el mejor momento de recolección del fruto para su procesamiento. De acuerdo con Arcila (Arcila, 2007), el desarrollo del fruto dura de 220 a 240 días en promedio, dependiendo de la región y consta de:

- **Etapas 1:** Primeras 7 semanas después de la floración, en la cual el fruto tiene el tamaño de un fósforo.
- **Etapas 2:** Semanas 8 a la 17 después de la floración. El fruto crece en forma acelerada y adquiere su tamaño final, y la semilla tiene consistencia gelatinosa.
- **Etapas 3:** Semanas 18 a la 25 después de la floración. La semilla adquiere consistencia sólida y gana peso.
- **Etapas 4:** Semanas 26 a la 32 después de la floración. El fruto se encuentra fisiológicamente desarrollado y comienza a madurar.
- **Etapas 5:** Después de la semana 32. El fruto se sobremadura y se torna de un color violeta oscuro y finalmente se seca. En esta etapa generalmente el fruto pierde peso

El proceso de recolección se inicia en la cuarta etapa de desarrollo del fruto (**Figura 1**), en la cual el endospermo llena el grano entero y es la época de maduración o cambio de color del fruto (Flórez et al., 2013), ya que este brinda características organolépticas de color, textura, aroma, sabor entre otros, que son determinantes de la calidad y vida útil (Marín L. et al., 2003).

**Figura 1.** Etapas del desarrollo del fruto de café, y épocas de mayor susceptibilidad del fruto a diferentes factores bióticos y abióticos.



Tomado de la fuente (Flórez et al., 2013)

### 3.4. Métodos de procesamiento

Después de la recolección de los frutos de café, los granos de café son sometidos a diferentes métodos de procesamiento (húmedo, semi-seco y seco).

En el método seco los frutos de café se dejan secar al sol en capas de aproximadamente 10 cm durante 10–25 días, hasta obtener un contenido de humedad alrededor del 13 % para luego remover el mucílago seco. Durante este proceso, la fermentación microbiana natural y las acciones enzimáticas conducen a la descomposición de la pulpa y el mucílago con el fruto de café intacto (Duarte et al., 2010; Lee et al., 2015).

El método húmedo se lleva a cabo en los frutos rojos y maduros de café, iniciando con la eliminación mecánica del exocarpio y el mucílago, seguido por un lavado y fermentado durante 24 a 48 horas, para finalizar con un secado alrededor del 13 % en base húmeda (b.h) para así obtener el producto final llamado café pergamino (Duarte et al., 2010; Lee et al., 2015).

En el método semi-seco el exocarpio y la mayor parte del mucílago se eliminan en el proceso de despulpado, para luego ser secados al sol o secado mecánico, hasta alcanzar el 10 % al 12 % base húmeda (b.h). y obtener el producto final (Duarte et al., 2010; Hameed et al., 2018).

Algunas ventajas y desventajas de los diferentes métodos de procesamiento son descritos en la **Tabla 2**.

**Tabla 2.** Ventajas y desventajas de los diferentes métodos de procesamiento.

Métodos de procesamiento	Ventajas	Desventajas
Seco	Proceso simple	Proceso largo (3-4 semanas)
	Bajo costo	Sobre fermentación.
	Fácil de realizar y manejar en países con condiciones ambientales de temperatura y humedad estables que permitan realizar el secado del grano.	Contaminación por hongos / moho.
	Mayor tasa de secado	Mayor índice de grano defectuoso.
	Amigable con el medio ambiente por la disminución de uso de agua	Menos atributos de calidad deseables (cuerpo pesado con dulzura y atributos complejos)
Húmedo	Ahorro de tiempo	Alto costo
	Atributos de calidad deseables	Requiere más pasos en el método de procesamiento
	Incrementa los contenidos de estaquiosa y sorbitol.	Necesita más adecuación física para la ejecución de los pasos adicionales en el procesamiento de grano

	Mayores concentraciones de ácidos clorogénicos en café verde.	Sólo se necesitan frutos maduros
	Mayor producción de ácidos orgánicos.	Necesita arreglos extra
	Atractivo mercado de exportación	Menos amigable con el medio ambiente
	Menor índice de granos defectuosos.	
Semi-seco	Sabor más limpio con menos acidez y cuerpo.	Alto costo
	Pueden usarse frutos poco maduros, maduros y demasiado maduros	Menos práctico globalmente
	Mayor contenido en cafeína.	Laborioso
	Nivel intermedio de CGA	Menos amigable con el medio ambiente
	Contenidos de trigonelina más bajos	

Tomado de las fuentes (Duarte et al., 2010; Kleinwächter et al., 2015)

Durante el método de procesamiento se llevan a cabo procesos catabólicos de oxidación de sustancias orgánicas para producir otros compuestos orgánicos y energía. En este proceso los carbohidratos (glucosa, fructosa, maltosa, sacarosa y lactosa) son los principales sustratos que se fermentan, pero algunas bacterias pueden fermentar otros compuestos como ácidos orgánicos, aminoácidos, purinas y pirimidinas. La velocidad y los productos generados en la fermentación del café dependen de factores que inciden directamente en el metabolismo de los microorganismos como: temperaturas externas, tipo de sistema de fermentación, tiempo de proceso, calidad del café en baba, acidez del sustrato, disponibilidad de oxígeno e higiene en el proceso productivo (Puerta Q. & Echeverry Molina, 2015). Durante la fermentación y dependiendo del manejo poscosecha del café, se presentan diferentes tipos de aromas y sabores. Para el caso de los cafés procesados por método húmedo, se presentan perfiles de frutos cítricos y frutos de árbol, para el caso de los cafés

procesados por el método seco, se presentan perfiles desde las bayas, frutos tropicales, frutos secos, vino, especiado queso; además podrían presentarse defectos como sabores a pudrición, fenol y moho (todos ellos clasificados como defectos graves) (Arcos Á., 2017; Puerta Q., 2010)

En el café, el mucílago es la materia prima que se fermenta. La calidad y cantidad de esta materia prima depende de varios factores, principalmente de la madurez del fruto; y el promedio de la proporción en peso del mucílago en el fruto maduro alcanza 14,85 % del peso del fruto fresco (Boyacá V., 2018). El contenido de humedad del mucílago es de 85 % y el endospermo 51 % para café recién cosechado. El mucílago está compuesto por 27 % fructosa, 21 % glucosa, 9 % sacarosa y 7,3 % ácidos orgánicos. El endospermo al contrario tiene altos niveles de sacarosa y bajas concentraciones de monosacáridos, mientras que los ácidos orgánicos más prevalentes son el ácido cítrico, ácido málico y ácido quínico (De Bruyn et al., 2017).

La fermentación del café es crítica para eliminar el mucílago y dicho proceso es facilitado por enzimas que naturalmente están en la cereza y por la microbiota adquirida del ambiente. Los microorganismos juegan un papel principal en la degradación del mucílago al producir enzimas, alcoholes y ácidos durante el proceso de fermentación. Las bacterias ácido lácticas más frecuentemente aisladas son: *Leuconostoc*, *Lactobacillus plantarum* y *Lactobacillus brevis*. También se han detectado levaduras, pero su papel en la degradación del mucílago es controvertido. Los microorganismos pectolíticos más comúnmente encontrados son: *Erwinia disolución*, *E. herbicola* y *Klebsiella pneumoniae* (Avallone et al., 2001).

Durante la fermentación se producen varios cambios fisiológicos en los granos, como la disminución del contenido de agua y azúcares simples, el desarrollo de precursores de aroma y sabor, además de cambios en: color, densidad, °brix del mucílago, formación de etanol, dióxido de carbono y diversos ácidos carboxílicos como láctico, málico, acético, propiónico, butírico, cítrico, succínico junto con aldehídos y cetonas, entre otros compuestos orgánicos (Avallone et al., 2001; Haile & Kang, 2019; Puerta Q., 2010).

Independientemente del método de procesamiento (húmedo, seco y semi-seco) los granos de café deben ser secados hasta obtener una humedad promedio entre 11- 13 % en base seca. Existen diferentes técnicas de secado; puede ser el secado al sol (patios de

cemento, carros secadores, Elbas o casa Elba y marquesinas o secadores parabólicos) y secado mecánico (cámaras en las que se introduce aire caliente con una temperatura máxima de 50°C, impulsado por un ventilador el cual distribuye el aire), donde la principal diferencia entre ellos es que el proceso de transferencia de masa de agua y calor se realiza en forma continua, mientras que el secado al sol sigue el ritmo de las condiciones ambientales día y noche (Cenicafé & FNC, 2004).

### **3.5. Caracterización química del grano de café**

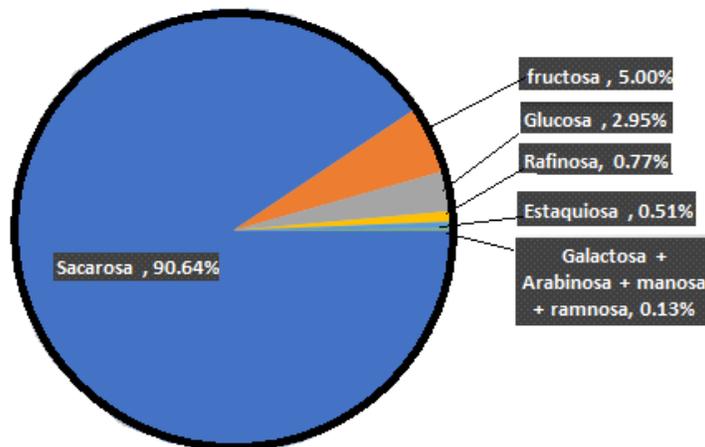
Los métodos de procesamiento postcosecha húmedo, semi-seco y seco, afectan directa e indirectamente la composición química del grano de café, especialmente por la solubilidad de ciertos compuestos presentes en éste, lo cual ha llevado a continuar con las investigaciones para determinar y cuantificar la composición química de los cafés procesados por métodos secos y semi-secos (Duarte et al., 2010). El café, en su forma química, está compuesto por agua y materia seca. La materia seca de los granos de café está constituida por minerales y sustancias orgánicas solubles o insolubles en agua como: carbohidratos, ácidos clorogénicos, cafeína, lípidos, proteínas, ácidos carboxílicos y fenólicos, además de compuestos volátiles que dan el aroma al grano (Saeed et al., 2019).

A continuación, se describe la composición química de los granos de café.

#### **3.5.1. Carbohidratos**

El café contiene una mezcla compleja de compuestos, incluyendo altas cantidades de carbohidratos, los cuales representan el 60 % de grano de café verde. De este porcentaje, la sacarosa es el principal carbohidrato de bajo peso molecular que se encuentra en el grano de café verde (**Figura 2**), pero el contenido de los monosacáridos puede variar como consecuencia del procesamiento postcosecha (De Oliveira Petkowicz, 2015).

**Figura 2.** Contenido de carbohidratos de bajo peso molecular que se encuentran en los granos de café verde (Procesados en seco).



Tomado de la Fuente (De Oliveira Petkowicz, 2015)

Los carbohidratos son los principales responsables de la viscosidad de la bebida de café y están asociados con la estabilidad de la espuma de café en taza, ayudan a disminuir la pérdida de sustancia volátiles y gracias a las reacciones que la sacarosa sufre durante la tostión (fragmentación, deshidratación y reacciones de Maillard) se pueden producir diferentes productos volátiles y no volátiles, muchos conocidos por su contribución a las propiedades organolépticas de la bebida de café (De Oliveira Petkowicz, 2015).

### 3.5.2. Ácidos clorogénicos

El método de procesamiento húmedo tiene la característica de permitir el contacto de los granos de café con el agua entre 24 a 48 horas. Esto puede generar una pérdida de compuestos solubles en agua como azúcares, ácidos clorogénicos y cafeína por lixiviación. Al contrario de los métodos de procesamiento secos y semi-secos en los cuales los granos de café no sufren un alto contacto con agua, pero sí pueden sufrir descomposición de algunos compuestos químicos como los ácidos clorogénicos por la exposición al sol (Duarte et al., 2010).

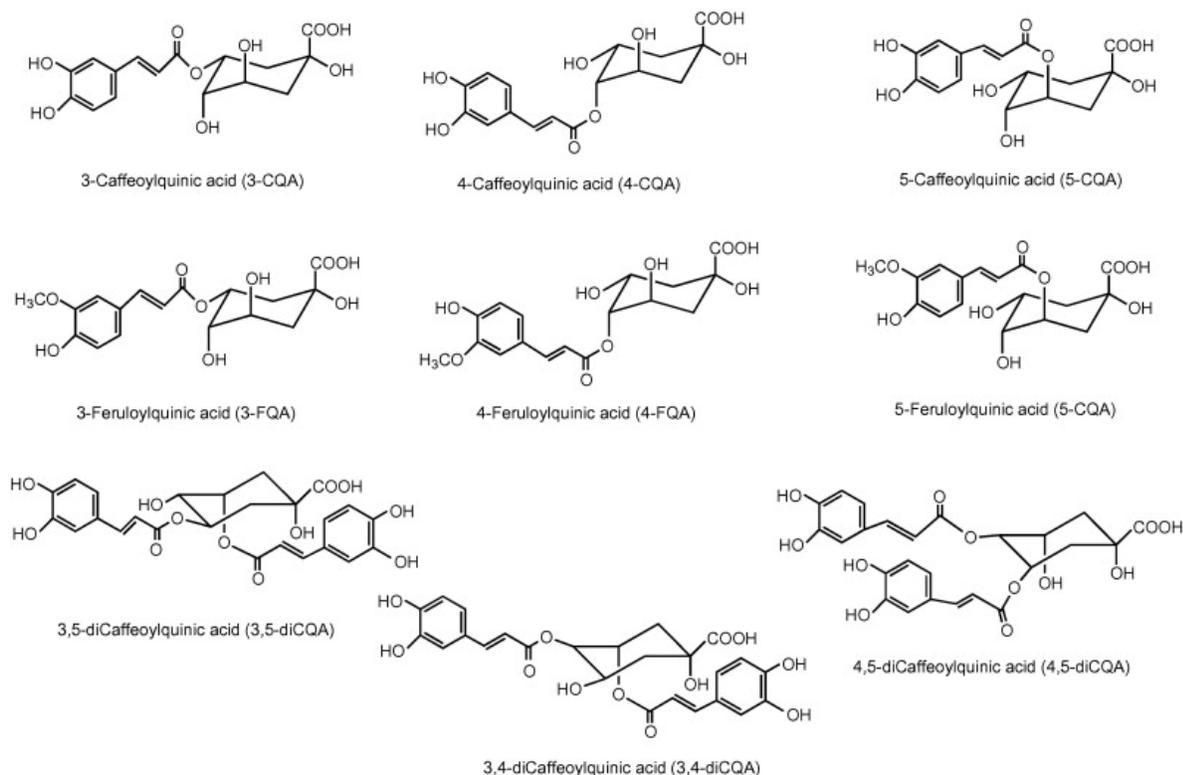
El café es una buena fuente de antioxidantes, principalmente los ácidos clorogénicos y entre mayor sea la ingesta de productos ricos en antioxidantes es posible asociar un menor estrés oxidativo en el cuerpo humano. Hay muchas evidencias de que una dieta rica en antioxidantes, especialmente de plantas, hierbas, especias y bebidas, muestra un efecto

protector sobre la salud humana y reduce el riesgo de diversas enfermedades (Jeszka-Skowron et al., 2016).

Los ácidos clorogénicos (ACG) son una familia de ésteres que son isómero del ácido quínico (AQ) que llevan uno o más derivados de cinamato como el ácido cafeico, ferúlico y p-coumárico. En los granos de café verde se encuentran nueve isómeros principales: tres de los ácidos cafeoilquínico (ACQ) (3, 4 y 5 ACQ), tres de los ácidos dicafeoilquínico (diACQ) (3,4, 3,5 y 4,5 diACQ) y tres de los ácidos feruloilquínico (AFQ) (3, 4 y 5-AFQ) (**Figura 3**). Aunque los ácidos clorogénicos están presentes en varias plantas, los granos de café verde son una de las principales fuentes comestibles y en la actualidad se ha dado un creciente mercado de consumo de granos de café verde para el control de peso. El 5-ACQ es el más abundante en los granos de café verde, que comprende > 50 % (p/p de materia seca) del total de ACG; 3 y 4-ACQs comprenden cada uno aproximadamente el 10% (p/p de materia seca) del ACG total en granos de café verde (Narita & Inouye, 2015).

Los ácidos clorogénicos en los granos de café verdes se analizan convencionalmente mediante el método HPLC-UV con una columna de fase inversa y su contenido varía según los genes, las especies, el clima, el estado de nutrientes del suelo, el proceso de procesamiento, como la descafeinado, y el grado de madurez (Narita & Inouye, 2015).

**Figura 3.** Estructuras químicas de los ácidos clorogénico.

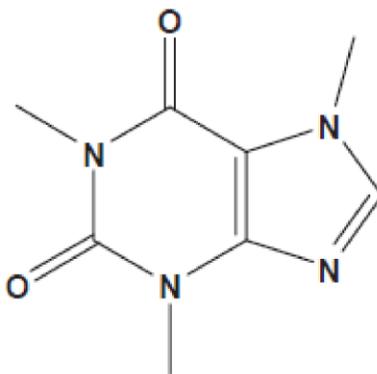


Tomado de la Fuente (Fujioka & Shibamoto, 2008)

### 3.5.3. Cafeína

Hay dos tipos de alcaloides presentes en los granos de café, la cafeína (1,3,7 trimetilxantina) y la trigonelina, siendo la cafeína la sustancia psicoestimulante más consumida en todo el mundo (**Figura 4**) (Stefanello et al., 2019). La cafeína es de gran importancia en el café debido a sus propiedades fisiológicas y carácter amargo que le otorga al café. El contenido de cafeína en los granos de café verde varía según la especie; la variedad robusta contiene entre 2,2 y 2,8 % de cafeína y la especie arábica entre 0,6 y 1,2 % y la concentración no depende ni del medio ambiente o de factores agrícolas (Wei & Tanokura, 2015), pero es de interés en las investigaciones la posibilidad de la disminución de su concentración cuando se realizan métodos de procesamiento húmedos en comparación con los semi-secos y secos, por su alta solubilidad en agua (Duarte et al., 2010).

**Figura 4.** Estructura química de la cafeína.



Tomado de de la fuente (Stefanello et al., 2019)

#### 3.5.4. Minerales

El método de procesamiento poscosecha se elige generalmente por la disponibilidad de agua o por la tradición de la región productora, sin embargo, el método de procesamiento tiene una marcada influencia en la composición química del café, particularmente en el contenido de minerales presentes, esto se debe a que los cafés procesados en húmedo presentan mayor difusión de los minerales al agua que los procesados por métodos seco y semi-seco (Cruz et al., 2015). El café verde tiene un contenido total de elementos de aproximadamente el 5 % (m/m), incluidos los esenciales, no esenciales y tóxicos. Estos contenidos dependen principalmente del origen del café, que es el principal factor asociado con el tipo de suelo, la variedad de café, las prácticas de campo, el clima y el procesamiento. Además, la contaminación del suelo y el agua, el uso de fertilizantes inorgánicos y/o algunos pesticidas aumentan el contenido total de metales pesados en el suelo. La contaminación inorgánica también puede ocurrir durante los procesos de producción y almacenamiento del café (Şemen et al., 2017).

Los elementos que generalmente se determinan en los granos de café se pueden dividir en los grupos principales. El primero, llamado elementos principales o macronutrientes, consiste en Ca, K, Mg, Na, S y P. Elementos menores (o micronutrientes) se clasifican en el segundo grupo: Cl, Co, Cr, Cu, Fe, Mn, Mo, Ni, Se, Sr y Zn. Los analitos tales como: Al, As, B, Ba, Br, Cd, Hg, Pb y Sn se consideran en el grupo de elementos traza (Jeszka-Skowron et al., 2016) y su concentración varía de acuerdo al elemento (**Tabla 3**) (Wei & Tanokura, 2015) y son determinados utilizando diferentes técnicas analíticas como espectrometría de absorción

atómica (AAS), emisión de rayos X inducida por partículas (PIXE), análisis instrumental de activación de neutrones (INAA), espectrometría de emisión de plasma óptico acoplado inductivamente (ICP-OES) y espectrometría de masas de plasma acopladas inductivamente (ICP-MS) (Şemen et al., 2017).

**Tabla 3.** Concentración de los minerales en granos de café verde.

<b>Mineral</b>	<b>Cantidad</b> (p/p x 10 <sup>-4</sup> % del peso seco).
<b>Ba</b>	1,6-10,2
<b>Br</b>	0,3-1,8
<b>Ca</b>	(0,79-1,87) x10 <sup>3</sup>
<b>Cd</b>	0,70-0,75
<b>Co</b>	0,02-0,62
<b>Cr</b>	<0,08-1,01
<b>Cs</b>	0,02-0,19
<b>Cu</b>	7,2-76,9
<b>Fe</b>	24,8-108
<b>K</b>	(1,21-2,14) x10 <sup>4</sup>
<b>La</b>	(0,35-1,50) x 10 <sup>-2</sup>
<b>Mg</b>	(0,14-2,09) x 10 <sup>3</sup>
<b>Mn</b>	13,4-57,7
<b>Na</b>	2,4-118,0
<b>Pb</b>	<0,01
<b>Rb</b>	13,5-73,0
<b>Sc</b>	(0,53-1,92) x 10 <sup>-3</sup>
<b>Sr</b>	1,3-18,0
<b>Zn</b>	3,6-61,3

Tomado de la fuente (Wei & Tanokura, 2015)

Aunque el contenido de elementos metálicos en el café es de solo el 4 %, estos pueden ser un buen indicador de la autenticidad del café (Wei & Tanokura, 2015).

### 3.5.5. Ácidos Orgánicos

Los ácidos orgánicos tienen gran importancia en algunas propiedades sensoriales del café, como la acidez, están estrechamente ligadas a los contenidos de los ácidos orgánicos. Estos son afectados por diversos factores poscosecha, como los métodos de procesamiento húmedo, semi-seco y seco. En general los ácidos representan el 11 % del grano recién recolectado y el 6 % del grano tostado (Ribeiro et al., 2018). En el mucílago, el contenido de ácidos orgánicos representa el 7,3 %, encontrándose abundantemente: ácido málico, ácido quínico y ácido glucónico. Por otro lado, en el endospermo los ácidos orgánicos representan el 2,4 % y contiene abundantes cantidades de ácido cítrico, ácido málico y ácido quínico (De Bruyn et al., 2017).

Los principales ácidos orgánicos en los granos de café verde son cítrico, málico, clorogénico y quínico (Rodrigues et al., 2007). Estos tienen funciones tan importantes como la producción de energía, el almacenamiento del carbono, la biosíntesis de los aminoácidos, las interacciones entre los microorganismos de la planta y los mecanismos que permiten a la planta hacer frente al exceso de cationes y a los suelos con bajo contenido de nutrientes; además, contribuyen al sabor siendo responsables de la acidez (Vallarino & Osorio, 2019). El contenido de ácidos orgánicos en las plantas está determinado por factores diferentes como la temperatura, la luz, la fertilización, el suministro de agua, la variedad, entre otros (**Tabla 4**) (Puerta Q., 2011).

**Tabla 4.** Contenido de ácidos en granos de café según la especie

Ácido	Arábica (%)*	Robusta (%)
Cítrico	1,16 -1,38	0,67 – 1,00
Málico	0,46 – 0,67	0,25 – 0,38
Fosfórico	0,11	0,14 -0,22
Oxálico	Trazas a 0,2	Trazas a 0,2
Succínico	Trazas a 0,15	0,05 -0,35
Fórmico	Trazas a 1,4	Trazas a 0,39
Acético	Trazas	Trazas a 0,2

\*Porcentaje en base seca. Tomado de la fuente (Puerta Q., 2011)

### 3.5.6. Compuestos volátiles

El aroma del café está intrínsecamente relacionado con la composición química del fruto de café. Durante el tostado del grano de café verde, se pueden observar diversas reacciones químicas que generan una amplia variedad de compuestos volátiles (Toledo et al., 2016).

Arruda y otros (Arruda et al., 2012) discuten que las diferencias entre los precursores glúcidos y amino ácidos de compuestos volátiles durante el proceso de fermentación (húmedo vs seco), están asociados a varios factores entre los que citan: a) el normal proceso metabólico de la semilla (endospermo) que se ve favorecido en los lavados (presencia de agua) en los cuales el embrión consume azúcares como precursor energético (ATP) para la formación de proteínas y b) la conservación de la pulpa (pericarpio, mesocarpio y endocarpio) en la fermentación en seco, la cual favorece la presencia de azúcares reductores y aminoácidos libres totales.

En el estudio de los compuestos volátiles, existen varias técnicas analíticas para su identificación, entre las cuales se encuentran: purga y trampa, microextracción en fase sólida (SPME) e inyección directa por muestreo de espacio por cabeza. El método SPME es el más utilizado en el estudio del aroma por sus cualidades de reproducibilidad, costo y rapidez (Akiyama et al., 2008).. Este método es una herramienta de extracción que trae algunas capacidades únicas en el análisis cromatográfico de soluciones diluidas en matrices difíciles, tanto gaseosas como líquidas. SPME tiene tres pasos principales: adsorción de solutos, establecimiento del equilibrio de los solutos adsorbidos y la fibra de recubrimiento, y desorción de los analitos a un sistema de cuantificación y medición. Esta técnica de adsorción/desorción es efectiva porque esencialmente elimina la necesidad de disolventes o complicados métodos de preparación de muestra para determinar la concentración de volátiles (Mottaleb et al., 2014). Algunos compuestos identificados en café, y su respectivo descriptor en el perfil de taza (PT), se presentan en la **Tabla 5**.

**Tabla 5.** Compuestos volátiles del café verde obtenidos por SPME y su correlación en el perfil de taza.

Descriptor	Compuesto
<b>Ácido</b>	Ácido 3-Metilbutirico
<b>Mantecoso / aceitoso</b>	2- y 3-Metilbutanal
	2,3-Butanediona
	2,3-Pentanediona
	( Z)-2-Nonena
	( E)-2-Nonenal
	2,6-(E,Z)-Nonadienal
<b>verde/Baya negra</b>	Formato de 3-Mercapto-3-metilbuil
<b>verde / terroso</b>	2-Metoxi-3-(1-metiletil) pirazina
	2-Metoxi-3-(1-metilpropil) pirazina
<b>Nuez / asado</b>	1-(3,4-Dihidro-2 H-pirrol-5-il)-etanona
	2-Etil-3,5-dimetilpirazina
	2,3-Dietil-5-metilpirazina
	6,7-Dihidro-5-metil-5 H-ciclopentapirazina
<b>Fenólico</b>	2-Metoxifenol
	4-Etil-2-metoxifenol
	4-Etenil-2-metoxifenol
	3-Metil-1 H-indol
	3-Metil-2-buteno-1-tiol
<b>Humo / asado</b>	2-Furanemetanetiol
	2-((Metiltio)metil)furan
<b>Salsa de soja</b>	3-(Metiltio)propanal
<b>Dulce / caramelo</b>	2-Hidroxi-3-metil-2-ciclopentan-1-ona

	4-Hidroxi-2,5-dimetil-3(2 H)-furanona
	2-Etil-4-hidroxi-5-metil-3(2 H)-furanona
	3-Hidroxi-4,5-dimetil-2(5 H)-furanona
<b>Dulce / afrutado</b>	Linalool
	Benzeneacetaldehyde
	( E)-Beta-damascenona
	4-(4 '-Hidroxifenil)-2-butanona

Tomado de la fuente (Akiyama et al., 2008)

### 3.6. Calidad sensorial

Las características organolépticas, evaluadas según la Asociación de Cafés Especiales de América (SCAA por las siglas en inglés), para la aceptación y definir la calidad del café son (Guambi D. et al., 2018):

- **Fragancia/Aroma:** La fragancia se evalúa sobre base seca (tostado y molido) y el aroma sobre base húmeda. La evaluación sensorial se inicia con la valoración del olor del café molido en seco y luego se valora el aroma que describe cuando se ha añadido agua en ebullición.
- **Gusto:** Es una impresión combinada de todas las sensaciones gustativas y aromas retronasales que van de la boca a la nariz.
- **Regusto:** Cualidades positivas del sabor que emanan de la parte posterior de la lengua y permanecen en la boca.
- **Acidez:** El equilibrio sal/acidez en la bebida.
- **Equilibrio amargo/dulce:** La relación amargo/dulce está en función de la combinación, en distintas proporciones, del sabor amargo y del sabor dulce.
- **Sensación en la boca:** Es una combinación de peso y textura y se basa en la sensación táctil del líquido en la boca, entre la lengua y el paladar.
- **Uniformidad de la taza:** Gusto constante de las distintas tazas de la muestra evaluada.
- **Equilibrio o balance de la taza:** Cómo se contrastan los atributos gusto, regusto, sensación en la boca y las proporciones sal/acidez y amargo/dulce.
- **Limpieza:** Se refiere a la ausencia de impresiones negativas.

- **Puntaje del catador:** El catador realiza una valoración global de la calidad de la taza, según su criterio o impresión, calificando en la escala ordinal de 0 a 10.
- **Calificación total de la evaluación sensorial:** Es la suma de los 10 atributos sensoriales, por tanto, se tiene una valoración de la muestra sobre 100 puntos.

De acuerdo con el proceso de beneficio el café, este adquiere ciertas características; por ejemplo, el procesamiento húmedo tiene notas moderadas en amargor, cuerpo, acidez y aromas pronunciados. El procesado vía seca se caracteriza por tener mayor cuerpo y amargor; además, es posible apreciar distintas características sensoriales de acuerdo a la variedad de café; la variedad Colombia, se caracteriza por la acidez, sabor, cuerpo y aroma; la variedad Borbón presenta el amargor más equilibrado y excelentes características organolépticas; mientras en la variedad Caturra predomina la acidez, amargor, cuerpo y aroma pronunciado; finalmente, la variedad Típica presenta características muy suaves y equilibradas en todas las cualidades (Puerta, 1998).

## 2. Materiales y métodos

### 2.1. Recolección de fruto

La recolección se realizó en la finca La Lupita del municipio de Barbosa-Antioquia, latitud: 6,409595, longitud: -75,357056 y altitud: 1.735 msnm. La finca produce fruto de café (*C. arabica*) variedad Castillo® y ha tenido una producción consistente de cafés especiales en los últimos 3 años (2014-2017) con puntaje en la calificación sensorial superior a 80 puntos. Los procesos de recolección, en esta investigación, garantizan que la muestra de café sea representativa del lote cultivado, evitando recolección de café de los bordes y otros árboles que no representan la generalidad de éste.

El experimento se desarrolló en un mismo lote (**Figura 5**) con el fin de caracterizar el grano de café proveniente de cuatro métodos de procesamiento (húmedo, seco, semi-seco honey amarillo y semi-seco honey rojo), en seis muestreos entre abril de 2017 y abril de 2018. A cada una de estos procesos se le realizó el análisis químico (minerales, carbohidratos, ácidos orgánicos, ácidos clorogénicos, cafeína, carbohidratos y volátiles) por triplicado. La recolección se realizó manualmente, tomando los frutos de las ramas productivas ubicadas en el tercio medio del árbol. Después de la cosecha, fueron almacenados en bolsas herméticas y, posteriormente, seleccionados para descartar los frutos verdes, amarillos-verde, rojos-verde, dañados por insectos, sobremaduros y secos antes del procesamiento por alguno de los cuatro métodos.

**Figura 5.** Lote de café variedad Castillo®, finca La Lupita, Barbosa - Antioquia.



**Fuente:** Elaboración propia

A continuación, se describen la caracterización fisicoquímica que se realizó:

## 2.2. Caracterización física del fruto de café

La caracterización física de los frutos de café se realizó con el fin de determinar el rango ideal de concentración de sólidos soluble para establecer su influencia en el perfil fisicoquímico y de taza. Este proceso se realizó en el SENA (Centro de los Recursos Naturales Renovable, La Salada, Caldas-Antioquia).

Los granos de café se clasificaron de acuerdo con el color, diferenciando seis grupos de frutos: verdes, amarillas-verde, rojas-verde, rojas, moradas y moradas-deshidratadas (**Figura 6**). Partiendo de esta selección, se eliminaron frutos con defectos como: abiertas o con plaga. Adicionalmente, a los frutos agrupados por color rojo, morado y morado-deshidratado, se les determinó: el peso, los sólidos solubles expresados como grados Brix, y el pH. Los frutos verdes, amarillas-verde, rojas-verde, fueron descartados ya que los frutos verdes pueden causar defectos en taza.

Los grados Brix se midieron en un refractómetro digital Atago, marca Pocket colocando dos gotas de 20 fruto de café sobre el prisma. Para medir el pH se utilizó un pH-metro digital marca Atago, serial 664089, el cual es sumergido en un beaker de 25 mL que contiene 10 frutos de café y 10 mL de agua destilada, esta mezcla es agitada constante y se sumerge el electrodo en todo el extracto (Cuéllar-Soares & Castaño-Castrillón, 2001).

**Figura 6.** Frutos de café agrupados por características de color.



Clasificación visual de los frutos utilizados en este estudio, antes del procedimiento. Los frutos se describen como (1). Fruto verde, (2) Frutos amarillo-verde, (3) Frutos rojo-verde, (4) Fruto rojos, (5) Frutos morados, (6) Frutos morados – deshidratados. **Fuente:** Elaboración propia

### **2.3. Métodos de procesamiento del café**

Se emplearon 28 kg de frutos de café de color morado agrupados de a 7 kg, los cuales se sometieron a cuatro procesos de fermentación diferentes, descritos a continuación:

#### **2.3.1. Método de procesamiento húmedo**

Siete kilogramos de frutos de café morado despulpados, con un rango de grados Brix entre 21% y 24%, fueron sometidas a fermentación en tanques expuestos al aire por un período de 24 horas. Transcurrido el tiempo de fermentación, los frutos fueron lavados con agua mediante agitación retirando el mucílago y las impurezas; en total se realizaron cuatro lavados sucesivos. Seguidamente, los granos fermentados y lavados se sometieron a secado solar, hasta alcanzar un 13 % (b.h). Posteriormente, los granos permanecieron en marquesina durante estabilización entre 2 a 3 días hasta llegar a 11 % de humedad (Puerta Q, 2012). En promedio este método de procesamiento toma entre 6 a 7 días realizarlo de acuerdo con las condiciones climáticas de la región.

#### **2.3.2. Método de procesamiento semi-seco Honey Amarillo**

Siete kilogramos de fruto de café morado, con un rango de grados Brix entre 21 % y 24 %, se despulparon de modo mecánico; seguidamente, se realizó el secado solar en marquesina con abertura para la entrada y salida de aire. El secado se llevó a cabo hasta alcanzar un 13 % de humedad y posteriormente los granos de café secos se estabilizaron en marquesina entre 2 a 3 días hasta alcanzar 11 % humedad. Dicho secado se realizó para evitar la formación de hongos que dañan el aspecto físico y la composición química, además de establecer calidad por amplios periodos de tiempo (Cruz et al., 2010; Díaz, 2014) En promedio este método de procesamiento tomó entre 8 a 12 días de acuerdo a las condiciones climáticas de la región.

#### **2.3.3. Método de procesamiento semi-seco Honey Rojo**

Siete kilogramos de frutos de café morado, con un rango de grados Brix entre 21 % y 24 %, se sometieron al proceso de semi-seco; , el cual consistió en fermentar los frutos sin despulpar por dos días en tanque, en un lugar fresco, libre de moscas, evitando que los contenedores usados estén expuestos al sol directo. En este proceso, el fruto alcanza un estado de fermentación y empieza a liberar lixiviados. Transcurridos dos días, se procedió a despulpar el fruto de café. En el proceso de despulpado fueron lavados los granos que presentaron alguna coloración oscura. Adicionalmente, se mantuvo una agitación constante

del pergamino con mucílago, con el objeto de evitar formación de cúmulos que favorezcan la aparición de hongos. El secado se realizó en marquesina con abertura para salida y entrada del aire hasta llegar a 13 % de humedad y posteriormente los granos de café secos se estabilizaron en marquesina entre 2 a 3 días hasta alcanzar 11 % humedad (Díaz, 2014). En promedio este método de procesamiento tomó entre 8 a 12 días realizarlo de acuerdo a las condiciones climáticas de la región.

#### **2.3.4. Método de procesamiento seco**

Se procedió a la selección de frutos de café morado y se inició con el proceso de secado en secadores parabólicos, teniendo cuidado de mover cada hora los frutos durante las horas más calientes del día (de las 11 a las 17 horas). El secado se realizó en marquesina con abertura para salida y entrada del aire hasta llegar a 13 % de humedad; posteriormente, los granos de café secos se estabilizaron en marquesina entre 2 a 3 días hasta alcanzar 11% humedad (Díaz, 2014). En promedio este método de procesamiento toma entre 12 a 16 días realizarlo de acuerdo a las condiciones climáticas de la región.

#### **2.3.5. Preparación de las muestras**

Los granos de café fermentados y secos fueron trillados en un equipo mecánico (Ingesecc Ltda, Bogotá, Colombia) con capacidad para 250 g. La masa promedio obtenida de pergamino seco y trillado para cada uno de los métodos fue: 5,3 kg de Húmedo, 6,7 kg de Honey Amarillo, 5,7 kg de Honey Rojo, y 5,5 kg de Seco. De cada bache se separó 250 g para análisis químicos en café verde, los cuales fueron almacenados en ultracongelación a -80 °C en bolsas herméticas, debidamente rotuladas hasta el análisis. El material restante se llevó al área sensorial para su catación.

### **2.4. Preparación de las muestras de café obtenido por los diferentes métodos de procesamiento.**

Los granos de café verde fueron reducidos a polvo fino empleando un molino analítico de cuchillas (IKA, modelo A11). El proceso de molienda consistió en sumergir 15 g de café verde en nitrógeno líquido durante 5 minutos; posteriormente, se aplicaron pulsos cortos de molienda hasta obtener un tamaño de partícula cercano a 1 mm.

## **2.5. Análisis químico y sensorial del café obtenido por diversos métodos de procesamiento.**

Las muestras de café obtenidas por los diversos métodos de procesamiento fueron analizadas mediante técnicas de cromatografía líquida (HPLC), cromatografía de gases (CG); y espectrometría de emisión óptica con fuente de plasma de acoplamiento inducido (ICP-OES).

Para el análisis de los ácidos clorogénicos, ácidos orgánicos y cafeína se utilizó un cromatógrafo líquido de alta eficiencia (Agilent Technologies) provisto de detector de arreglo de diodos (DAD) desgasificador, bomba cuaternaria, auto muestreador, horno y controlador. El análisis de los datos se realizó con el software Agilent Lab Advisor B.02.06, 2014.

El análisis de carbohidratos se realizó con un cromatógrafo líquido de alta eficiencia marca Shimadzu con detector de índice de refracción (RID), desgasificador, bomba cuaternaria, auto muestreador, horno y controlador. El análisis de los datos se desarrolló en el software LabSolutions Lite

Para el análisis de volátiles se empleó un cromatógrafo gaseoso marca Shimadzu GC-2010 provisto con detector de espectrometría de masas (MS-QP2010S), auto muestreador e inyector Split (splittless estándar).

Por último, en el análisis de minerales se utilizó un equipo ICP-OES, modelo 5100 (Agilent Technologies), usando el Software ICP Expert 7.201.8252.1614.

### **2.5.1. Determinación de ácidos clorogénicos**

Este componente se determinó mediante cromatografía líquida (HPLC) de acuerdo con la norma (DIN, 2015) correspondiente a la determinación del contenido de ácidos clorogénicos en café tostado y café soluble.

Los estándares y reactivos utilizados fueron: ácido clorogénico y ácido neoclorogénico (Sigma Aldrich), acetato de plomo (Carlo Erba), acetato de zinc, ácido acético, hexacianoferrato de potasio (II), metanol, acetonitrilo (Merck) y agua grado HPLC, filtro 0,45 µm. Millipore Corp (EE.UU).

Condiciones cromatografías: se utilizó un HPLC-DAD (Agilent Technologies) provisto de una columna Zorbax Eclipse plus C<sub>18</sub> a una temperatura isocrática de 30 °C. La detección de los compuestos se realizó a una longitud de onda de 324 nm. La fase móvil estuvo compuesta por: el solvente A (1000 mL H<sub>2</sub>O Milli-Q + 10 mL ácido fosfórico, H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub>, al 85 %

de pureza) y el solvente B (acetonitrilo grado HPLC); el corrido se realizó en modo gradiente con un flujo de 1 mL/min el cual inició aumentando de 90 % solvente A hasta 80 % por 20 min, luego pasó de 70 % solvente A hasta alcanzar los 25 min y por último un incremento a 60 % de solvente A manteniéndose 15 min, el volumen de inyección fue de 10  $\mu$ L.

Adicionalmente, se prepararon soluciones madre de ácido clorogénico y ácido neoclorogénico mediante disoluciones en agua Milli-Q. Las soluciones estándar de trabajo se obtuvieron diluyendo las soluciones madres con agua Milli-Q hasta obtener concentraciones de 61, 159, 319 y 641 mg/L para el ácido clorogénico; y 18, 44, 90 y 181 mg/L para el ácido neoclorogénico. Las soluciones estándar se almacenaron en un refrigerador a 4°C.

Para el tratamiento de la muestra se tomó 1 g de café verde previamente tamizado y se depositó en un Erlenmeyer de 250 mL con 100 mL de una solución de metanol al 70 % v/v, se agitó por 1 min y se dejó en contacto por 12 horas a 4°C. Luego de transcurrido el tiempo, se realizó la filtración de cada muestra en un filtro cualitativo de 110 mm. Al filtrado se adicionó 1 mL de reactivo Carrez I (21,9 g de acetato de zinc cristalizado, 3 mL de ácido acético glacial llevado a un volumen de 100 mL con agua HPLC), 1 mL de reactivo Carrez II (10,6 g de hexacianoferrato de potasio (II) diluido y aforado a 100 mL) y 50 mL de solución metanol al 70 % v/v. La mezcla fue agitada por 1 min, dejando reposar por 15 min para posterior filtrado con papel Whatman N°1 y aforado a 100 mL con solución metanol a 70 % v/v. Finalmente, una porción se filtró en membrana de nylon de 0,45  $\mu$ m antes de inyectarse al HPLC.

### **2.5.2. Determinación de carbohidratos**

La determinación de carbohidratos se realizó utilizando el método de extracción descrita por (Mullin & Emmons, 1997), donde los reactivos utilizados fueron estándares de glucosa, fructosa y sacarosa (Sigma Aldrich) y acetonitrilo (Merck.)

Condiciones cromatográficas: el análisis de carbohidratos se realizó por cromatografía líquida acoplada a un detector de índice de refracción. La columna Zorbax NH<sub>2</sub> analytical (4,6 x 150 mm, 5  $\mu$ m, Agilent) se utilizó para la separar la sacarosa, la glucosa y la fructosa a temperatura ambiente. La separación cromatográfica se realizó con una fase móvil de elución isocrática de 75 % de acetonitrilo y 25 % de agua. El flujo se ajustó a 1 mL/min, el volumen inyectado fue de 10  $\mu$ L y el tiempo total de corrido de 30 min (Liu et al., 2019). Para la curva de calibración se preparó una solución madre de fructosa, sacarosa y glucosa mediante disoluciones en agua Milli-Q. Las concentraciones de trabajo fueron: fructosa, 1.378, 7.023, 13.591, 75.015, 111.876 y 690.635 mg/L; glucosa, 581, 6.560, 9.793, 61.633, 84.205 y 589.645

mg/L; y sacarosa, 1.070, 5.980, 17.820, 72.412 y 69.2163 mg/L. Las soluciones estándar de trabajo se obtuvieron diluyendo las soluciones madres con agua Milli-Q. Las soluciones estándar se almacenaron en un refrigerador a 4°C.

La extracción de carbohidratos se realizó a partir de 3 g de café verde previamente molido los cuales se extrajeron con 100 mL de agua Milli-Q a 90 °C en un Erlenmeyer. La mezcla se dejó enfriar a temperatura ambiente, se vortizó y luego del reposo se filtró por gravedad. El filtrado se aforó a un volumen de 100 mL; seguidamente, una alícuota de 2,5 mL se llevó a un balón volumétrico de 10 mL, aforando con acetonitrilo grado HPLC. La mezcla final se filtró usando un filtro de nylon de 0,45 µm para analizar el contenido de azúcares mediante HPLC-RID (Liu et al., 2019).

### **2.5.3. Determinación de cafeína**

El contenido de cafeína en el café fermentado y seco se determinó de acuerdo con la norma colombiana (INCOTEC, 2010), utilizando estándar de cafeína (Agilent Technologies), óxido de magnesio (Carlos Erba) y el metanol (Merck).

Condiciones cromatográficas: El análisis de cafeína se realizó por cromatografía líquida de alta eficiencia empleando HPLC-DAD (Agilent) provisto de una columna Zorbax Eclipse plus C18. Los análisis se llevaron a cabo de forma isocrática. Para su determinación se utilizó una mezcla de agua y metanol (24 %) como eluyente a un caudal de 1 mL/min. La separación se realizó a temperatura a 40°C y el volumen de inyección fue de 10 µL. El estándar a diferente concentración y las muestras de café se inyectaron por triplicado. La cuantificación de la cafeína se realizó a una longitud de onda de máxima absorbancia ( $\lambda = 272$  nm), obtenida por espectrometría UV.

La curva de calibración se realizó mediante dilución de una solución madre con agua Milli-Q hasta obtener concentraciones de 15, 29, 146, 726 y 1.442 mg/L. Las soluciones estándar se almacenaron en un refrigerador a 4°C.

La extracción de la cafeína se llevó a cabo mezclando 0,2 g de café verde molido, 0,5 g de óxido de magnesio y 25 mL de agua Milli-Q. La mezcla fue sometida a extracción en baño maría a 90°C por 20 min; posteriormente, se enfrió a temperatura ambiente por 10 min. De la mezcla resultante se filtró el sobrenadante y se llevó a 50 mL con agua Milli-Q para ser analizado por HPLC-DAD.

#### 2.5.4. Determinación de ácidos orgánicos

La determinación de ácidos orgánicos se llevó a cabo de acuerdo con la metodología de (Rodrigues et al., 2007). Los reactivos empleados para el análisis fueron los siguientes ácidos orgánicos: quínico, succínico, málico, acético y cítrico (Sigma Aldrich), fosfato de sodio monohidratado y ácido fosfórico (Merck).

Condiciones cromatográficas: La fase móvil de HPLC para la determinación de ácidos se preparó con fosfato de sodio monohidratado y ácido fosfórico hasta obtener un buffer a pH 2,9; el método de elusión fue isocrático a un flujo de 0,7 mL/min. Se utilizó la columna SinergiTM 4  $\mu$ m Hydro-RP 80 A (250 x 4,6 mm) phenomenex a temperatura ambiente. La detección de los ácidos se realizó a la longitud de onda de máxima absorbancia para cada analito ( $\lambda = 205$  nm) empleando un detector PDA.; el volumen de inyección fue de 20  $\mu$ L.

Para la curva de calibración se preparó una solución madre, que contenía 200 mg/L de los ácidos quínico, succínico, málico, acético y cítrico, la cual fue diluida para obtener soluciones de trabajo a concentraciones de 100, 80, 60, 20, 5 mg/L.

La extracción de los ácidos se realizó de acuerdo al procedimiento descrito por (Evangelista et al., 2014) con modificaciones: tomando 0,5 g de café verde molido en un erlenmeyer al cual se le adiciona 5 mL de agua Milli-Q; posteriormente la mezcla fue sometida a vortex por 10 min y se centrifugó, a 10000 gravedades por 10 min a 4°C. Del sobrenadante se tomó 1 mL y se adicionó 2 mL de agua Milli-Q, 100  $\mu$ L de carrenz I, 100  $\mu$ L de carrenz II y 800  $\mu$ L de metanol. La mezcla se dejó reposar por 10 min y luego se centrifugó a 5000 rpm por 5 min. El sobrenadante fue filtrado por 0,45  $\mu$ m y el filtrado se inyectó en el HPLC.

#### 2.5.5. Determinación de minerales

Las muestras de café fueron sometidas a un proceso de digestión ácida asistida por microondas (Milestone Ethos) de acuerdo a la nota de aplicación PRO High versatile Rotor, para matrices de agricultura PRO-AG-06 y el análisis de minerales se realizó mediante espectroscopia de emisión óptica de plasma con acoplamiento inductivo (ICP-OES) 5100 (Agilent Technologies).

Materiales: los reactivos utilizados para el análisis de minerales fueron: solución patrón de hierro, potasio, calcio, magnesio, manganeso, cinc, cobre y aluminio (Merck), ácido nítrico,

HNO<sub>3</sub> 65 % (Merck), peróxido de hidrógeno H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 30 % (Panreac) y agua Milli-Q del sistema de agua Millipore.

Condiciones ICP-OES: El equipo contó con sensor de temperatura, terminal 640-260, Software EasyCONTROL y Rotor de alto rendimiento Pro 24/16. Este método proporciona la digestión ácida de la muestra en un dispositivo de vaso cerrado utilizando control de temperatura de calentamiento para posterior inyección en el equipo ICP-OES 5100 (Agilent Technologies), con un tiempo de lectura de 5 segundos, un flujo de nebulizador de 0,7 L/min, flujo de plasma de 12 L/min, tiempo de estabilización de 15 segundos, modo de visualización radial y altura de visualización 8 mm.

Las curvas de calibración se realizaron desde 0,63 mg/L hasta 1 mg/L para calcio, desde 0,63 mg/L hasta 20 mg/L para hierro y magnesio, desde 0,03 mg/L hasta 1 mg/L para manganeso, cinc y cobre, desde 0,31 mg/L hasta 5 mg/L para potasio y desde 0,06 mg/L hasta 1 mg/L para aluminio. Las soluciones estándar se almacenaron en un refrigerador a 4°C hasta la lectura.

Para determinar los minerales a 0,3 g de café verde molido se agregaron 8 mL de ácido nítrico HNO<sub>3</sub> al 65 % y 2 mL de peróxido de hidrógeno H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 30 %. Seguidamente, se ejecuta el programa de microondas en el cual se inicia los primeros 20 min a temperatura interna del vaso a 180°C y externa de 120°C a presión de 30 bar y un máximo de potencia de 1500 w, el cual se continúa por otros 15 min para finalizar a las mismas condiciones. Luego de dejar reposar a temperatura ambiente, la muestra con previa digestión se aforó a 100 mL y fue leída por ICP-OES a una longitud de onda de 238.204, 396.847, 766.491, 279.553, 257.610, 213.857, 327.395 y 396.152 nm para la determinación de hierro, calcio, potasio, magnesio, manganeso, cinc, cobre y aluminio, respectivamente.

Para la cuantificación de compuestos como los ácidos orgánicos, carbohidratos, cafeína y minerales, se tomaron los picos eluyentes y se determinó su identidad comparando los tiempos de retención con los compuestos estándar. Las curvas de calibración se realizaron con los estándares a diferentes grados de concentración y las áreas de los picos se utilizaron para la elaboración de la curva de calibración, la cual mostró la ecuación lineal del analito y su coeficiente de determinación (**Tabla 6**).

**Tabla 6.** Ecuaciones lineales y coeficiente de determinación para los ácidos orgánicos, carbohidratos, cafeína y minerales.

<b>Análisis</b>	<b>Analito</b>	<b>Ecuación Lineal</b>	<b>r<sup>2</sup></b>
<b>Carbohidratos</b>	<i>Fructosa</i>	$y = 345,23x - 3363,7$	0,9982
	<i>Glucosa</i>	$y = 295,36x - 5737$	0,9963
	<i>Sacarosa</i>	$y = 345,45x + 1468,6$	0,9999
<b>Ácidos Orgánicos</b>	<i>ácido químico</i>	$y = 1,6184x + 2,0117$	0,9992
	<i>ácido málico</i>	$y = 2,5506x - 0,3818$	0,9999
	<i>ácido acético</i>	$y = 1,2483x - 0,9088$	0,9999
	<i>ácido cítrico</i>	$y = 3,1677x + 0,1285$	0,9998
	<i>ácido succínico</i>	$y = 1,3829x - 0,9819$	0,9999
<b>Alcaloides</b>	<i>Cafeína</i>	$y = 28,843x + 1,428$	0,9999
<b>Minerales</b>	<i>Hierro (Fe)</i>	$Y = 7620,457x + 4,3255$	0,99957
	<i>Potasio (K)</i>	$y = 4223,44x + 6,108$	0,9999
	<i>Calcio (Ca)</i>	$y = 1148766,02x + 59214,58$	0,99983

### 2.5.6. Determinación de compuestos volátiles

Para la identificación del perfil de compuestos volátiles en café procesado por los cuatro métodos fue necesario hacer una extracción de los analitos utilizando microextracción en fase sólida (SPME), esta técnica ha demostrado ser un excelente método de separación, ya que en el mismo paso extraen y concentran los analitos de la matriz de la muestra (Gonzalez-Sanchez et al., 2011).

La extracción de los compuestos volátiles se realizó de acuerdo al procedimiento descrito por (Evangelista et al., 2014) con modificaciones.

Para el proceso de extracción, se utilizó una fibra de divinilbenceno / Carboxen / polidimetilsiloxano (DVB / CAR / PDMS) (50/30 - Supelco Bellefonte, PA, USA).

Condiciones cromatográficas: En los análisis de compuestos volátiles se utilizó un cromatógrafo gaseoso (Shimadzu GC- 2010). El modo de inyección usado fue splitless a una temperatura de 230°C. Durante el análisis, se utilizó helio como gas transportador a un flujo

constante de 0,6 mL/min. La columna cromatográfica utilizada fue una CarboWax/20M de 30 m de longitud; 0,25 mm de diámetro interno y 0,25  $\mu$ m de espesor de película. La rampa de calentamiento en el horno cromatográfico inició a 40 °C durante 1 min; seguidamente, se incrementó la temperatura a una razón de 3 °C/min hasta 200 °C, temperatura a la cual se mantuvo durante 3 min. Posteriormente, se continuó el proceso de calentamiento a velocidad de 10 °C/min hasta 230 °C y se mantuvo durante 5 min. La temperatura de la trampa de iones se mantuvo a 200 °C y la línea de transferencia a 230 °C. El rango de masas seleccionado, como relación masa/carga, fue de 35 a 350. La identificación de los compuestos se realizó con un espectro de masas de referencia de la base de datos NIST Mass Spectral Library 2014 y el análisis con el software GC-MS solution con un grado de similitud superior al 80 %. Versión 4.45. El contenido de compuestos volátiles se determinó mediante la integración de áreas de cada pico en el cromatograma y el cálculo de abundancias relativas de cada compuesto y se identificó comparando su espectro de masas con la base de datos de referencia NIST.

La inyección se realizó en modo manual empleando un holder de SPME de Supelco (Bellefonte, PA, USA). Se utilizaron las siguientes condiciones de partida: En un matraz herméticamente sellado de 15 mL se colocaron 2 g de café verde previamente molidos, se realizó un calentamiento a 60°C durante 30 min para saturar el espacio de cabeza con los compuestos volátiles y realizar la absorción de los compuestos en la fibra SPME. Luego, se realizó la desorción de los compuestos colocando la fibra en el puerto de inyección del cromatógrafo gaseoso acoplado a masas (GC/MS) a 230 °C durante 5 min (Evangelista et al., 2014).

#### **2.5.7. Calidad sensorial**

El análisis sensorial o perfil de taza (PT) para cada una de las muestras de café obtenido por los diferentes métodos de procesamiento se realizó en el Laboratorio de Café adscrito a CRNR La Salada – SENA. En este proceso se procedió a la tosti3n del café.

La tosti3n se realizó a una temperatura 180°C por espacio de 50 min, con posterior molienda en un molino eléctrico. Un panel de dos catadores con certificaci3n Q-Grader, evaluaron las muestras del estudio aplicando una evaluaci3n sensorial de acuerdo con los est3ndares SCAA “Guía para el uso del formulario SCAA cataci3n de café ar3bica (SCA, 2015). Los siguientes fueron los atributos sensoriales definidos en la cataci3n: fragancia,

aroma, acidez, cuerpo, sabor, dulzura, balance y uniformidad, con sus respectivas puntuaciones (**Tabla 7**) y sus respectivos descriptores organolépticos (**Tabla 8**).

**Tabla 7.** Puntuaciones promedio de catación, resultado de los cuatro métodos de procesamiento.

<i>Métodos de procesamiento</i>	<i>muestreo</i>	<i>Promedio fragancia</i>	<i>Promedio acidez</i>	<i>Promedio cuerpo</i>	<i>Promedio sabor</i>	<i>Promedio dulzura</i>	<i>Promedio balance</i>	<i>Promedio uniformidad</i>	<i>Promedio calificación</i>
<b>Seco</b>	1	7,9	7,9	7,6	7,4	10,0	7,4	10,0	<b>83,4</b>
<b>semi- seco honey amarillo</b>	1	7,8	7,5	7,5	7,5	10,0	7,5	10,0	<b>83,0</b>
<b>Húmedo</b>	1	7,8	7,8	7,5	7,5	10,0	7,5	10,0	<b>81,5</b>
<b>semi- seco honey rojo</b>	1	7,5	7,5	7,5	7,5	10,0	7,3	10,0	<b>82,3</b>
<b>Húmedo</b>	2	7,9	7,8	7,5	7,5	10,0	7,5	10,0	<b>83,5</b>
<b>semi- seco honey amarillo</b>	2	7,9	7,6	7,5	7,6	10,0	7,4	10,0	<b>83,3</b>
<b>semi- seco honey rojo</b>	2	7,5	7,5	7,5	8,0	10,0	7,3	10,0	<b>82,8</b>
<b>Húmedo</b>	3	7,5	7,5	7,3	7,4	10,0	7,3	10,0	<b>81,9</b>
<b>Seco</b>	3	7,8	7,5	7,4	7,5	10,0	7,5	10,0	<b>83,1</b>
<b>semi- seco honey rojo</b>	3	7,7	7,6	7,4	7,4	10,0	7,5	10,0	<b>82,6</b>
<b>semi- seco honey amarillo</b>	3	7,6	7,9	7,4	7,5	10,0	7,5	10,0	<b>83,0</b>
<b>Seco</b>	4	7,9	7,6	7,5	7,5	10,0	7,5	10,0	<b>83,5</b>
<b>semi- seco honey rojo</b>	4	7,6	7,5	7,3	7,4	10,0	7,3	10,0	<b>82,3</b>

<b>semi- seco honey amarillo</b>	4	7,8	7,6	7,4	7,3	10,0	7,3	10,0	<b>82,5</b>
<b>Húmedo</b>	4	7,6	7,3	7,5	7,1	10,0	7,3	10,0	<b>81,9</b>
<b>semi- seco honey amarillo</b>	5	7,5	7,3	7,1	7,3	10,0	7,3	10,0	<b>81,1</b>
<b>semi- seco honey rojo</b>	5	7,8	7,4	7,4	7,5	10,0	7,4	10,0	<b>82,4</b>
<b>Seco</b>	5	7,7	7,7	7,6	7,6	10,0	7,6	10,0	<b>83,7</b>
<b>Húmedo</b>	5	7,8	7,8	7,5	7,5	10,0	7,5	10,0	<b>83,4</b>
<b>semi- seco honey amarillo</b>	6	7,0	7,5	7,2	7,2	10,0	7,2	10	<b>80,7</b>
<b>semi- seco honey rojo</b>	6	8,0	8,0	7,5	8,0	10,0	7,5	10,0	<b>84,2</b>
<b>Seco</b>	6	8,0	7,7	7,7	8,0	10,0	7,6	10,0	<b>84,9</b>
<b>Húmedo</b>	6	7,5	7,5	7,5	7,5	10,0	7,2	10,0	<b>82,0</b>

De acuerdo con el promedio de calificación obtenido, los granos de café cuentan con una calificación final entre 80-84.9 puntos, lo cual según la Asociación de Cafés Especiales de América (SCAA por las siglas en inglés), en la actualidad SCA, es denominado un café especial.

**Tabla 8.** Descriptores organolépticos de catación, resultado de los métodos de procesamiento húmedo, seco, semi-seco honey rojo y semi-seco honey amarillo

Métodos de procesamiento	muestreo	Descriptor organoléptico
<b>Seco</b>	1	chocolate, uva, tamarindo, acidez alta, frutal, miel, seco. vinoso, mora, acidez cítrica
<b>semi- seco honey amarillo</b>	1	panela, cítrico, aromático, vinoso, cuerpo medio, residual limpio. panela, chocolate, frutal
<b>Húmedo</b>	1	dulce, panela, cítrico, aromático, cuerpo cremoso, acidez málica, residual ligero, dulce, poco herbal
<b>semi- seco honey rojo</b>	1	panela, fruto rojo, dulce meloso, cuerpo medio cremoso, Panela, té verde, acidez cítrica
<b>Húmedo</b>	2	dulce, banano, seco, cuerpo medio, vinoso, jugoso, frutal, cítrico
<b>semi- seco honey amarillo</b>	2	panela, fruto amarillo, manzana, dulce meloso, residual jugoso, acidez brillante, dulce, frutos rojos y frutos amarillos
<b>semi- seco honey rojo</b>	2	panela, fruto amarillo, acidez brillante, jugoso, cuerpo medio, fruto rojo, Vinoso, miel, acidez alta cítrico, mora, floral
<b>Húmedo</b>	3	Panela, acidez cítrica, aromático, herbal leve, cuerpo medio, residual limpio dulce, chocolate, poco cereal, jugoso, acidez brillante, chocolate, acidez alta
<b>Seco</b>	3	Vinoso, mora, cacao, fruto rojo, dulce miel, acidez brillante, cuerpo medio, residual seco, sabor frutal, uva, cremoso, frutal, fruto amarillo, residual acidez alta.
<b>semi- seco honey rojo</b>	3	Dulce alto, uva, frutos rojos, panelita, sabor a miel, acidez cítrica y málica, cuerpo medio cremoso, poco aromático, residual seco, acidez alta, Uva, dulce.
<b>semi- seco honey amarillo</b>	3	Acidez cítrica, fruto amarillo seco, dulce, residual limpio, acidez málica, cuerpo cremoso, Panela, chocolate. Poco pulposo, delicado, suave, cuerpo medio, acidez cítrica, residual limpio, aromático.
<b>Seco</b>	4	Vinoso, frutal, uva, fruto amarillo, dulce miel, residual jugoso seco, acidez alta, cacao, mora, cuerpo medio, meloso, frutos rojos.
<b>semi- seco honey rojo</b>	4	Panela, acidez cítrica, herbal leve, dulce, residual seco, cuerpo medio, chocolate, frutos rojos, miel, , té verde, cereza, uva, bombombum
<b>semi- seco honey amarillo</b>	4	Dulce, fruto amarillo, panela, caramelo, cuerpo medio, acidez cítrica brillante, chocolate, cereal
<b>Húmedo</b>	4	Caramelo, dulce frutal, panela, cuerpo medio, residual jugoso. almendrado, aromático, acidez cítrica, cuerpo medio, residual jugoso, nota madera, maíz, chocolate

<b>semi- seco honey amarillo</b>	5	Frutos rojos, dulce, aromático, cuerpo medio residual jugoso, cítrico, panela, chocolate, fruto amarillo, herbal leve, residual limpio, maíz, tostado herbal.
<b>semi- seco honey rojo</b>	5	panela, cítrico, fruto rojo, caramelo, residual limpio, cuerpo medio, dulce, uva, chocolate, naranja, cuerpo delicado, aromático, residual dulce.
<b>Seco</b>	5	frutas maduras, fermentadas, vinoso, piña, tamarindo, uva, cuerpo medio, jugoso, mora, acidez cítrica
<b>Húmedo</b>	5	panela, floral, cítrico, cuerpo medio, dulce frutal, acidez málica, aromático, residual limpio, chocolate, poco herbal.
<b>semi- seco honey amarillo</b>	6	Dulce, frutos amarillos, naranja, acidez brillante, herbal leve, panela, residual limpio, chocolate, cuerpo medio, cítrico, alverja, poco cereal.
<b>semi- seco honey rojo</b>	6	Frutos rojos, sabor vinoso, dulce, cítrico, cuerpo medio, residual limpio perdurable, chocolate, meloso.
<b>Seco</b>	6	Dulce, cacao, jugoso, residual perdurable meloso, cuerpo medio, acidez frutal, frutos secos, vinoso, banano, pasas, chocolate.
<b>Húmedo</b>	6	Cítrico, residual astringente, cuerpo medio, cacao, panela, chocolate, dulce intenso

## 2.6. Análisis estadístico

Los datos de compuestos volátiles obtenidos de cada cromatograma fueron agrupados en grupos funcionales. Los datos de ácidos orgánicos, carbohidratos, cafeína y minerales se promediaron por muestreo para cada fermentación. Para el caso de la información obtenida en el perfil de taza, se procedió a dar a cada atributo un valor cuantitativo de “uno” si estaba presente y “cero” en su ausencia, para luego ser consignados en una matriz con los resultados de los dos evaluadores en un mismo muestreo y proceso de fermentación. Se generó una base de datos que agrupó los compuestos volátiles y su respectivo perfil de taza por cada uno de los procesos fermentativos evaluados y otra en la cual se agrupó los carbohidratos, ácidos orgánicos, cafeína, minerales y el perfil de taza. Esta información fue sometida a un análisis de correspondencias simple para evaluar la dependencia entre los procesos fermentativos y los volátiles registrado y a un análisis de componentes principales (ACP) para identificar la relación existente entre los compuestos volátiles (área bajo la curva) y la matriz presencia ausencia. Además, se realizó la correlación de ácidos orgánicos, carbohidratos, minerales y cafeína con el perfil de taza mediante el análisis de componentes principales (ACP). Ambos

casos se realizaron por la librería *FactorMineR* (Lê et al., 2008). Las variables que presentaron colinealidad y baja contribución en los componentes fueron eliminadas del análisis (Hair et al., 2010). Se utilizó el scree plot y la regla de Kaise para la selección de los CP (Lloret-Segura et al., 2014).

Con el objeto de relacionar la matriz de compuestos nutricionales (carbohidratos, ácidos orgánicos y minerales) con el perfil de taza obtenidos en las mismas fermentaciones, se empleó el análisis de Co-Inercia (Dolédec & Chessel, 1994). Este análisis permite identificar tendencias en conjuntos de datos obtenidos a partir de un mismo individuo, a través de la maximización de las co-varianzas entre los grupos de matrices (Muñoz Armayones, 2016). Este análisis se llevó a cabo mediante la librería ADE4 (Bougeard & Dray, 2018). Todos los análisis fueron llevados a cabo en el software estadístico R-Project (Versión 2. GNU General Public License ) (R Core Team, 2014).

### 3. Resultados y discusión

#### 3.1. Caracterización fisicoquímica de los frutos de café

Con el fin de permitir la reproducibilidad y estandarización en las metodologías utilizadas, fue necesario realizar una caracterización de la calidad física y el estado de maduración del grano de café.

El muestreo de los granos, realizado en el Centro de los Recursos Renovables La Salada (SENA la salada), permitió determinar las características físicas más relevantes para tener en cuenta en el momento de realizar el estudio en campo.

En la **Tabla 9** se evidencian los pesos promedio del fruto de café de la variedad castillo® recolectadas de acuerdo con la característica de color.

**Tabla 9.** *Peso promedio del fruto de café de la variedad castillo ® recolectadas de acuerdo con la característica de color.*

<b>Color</b>	<b>Masa total fruto de café (g)</b>	<b>Número de frutos de café recolectadas</b>	<b>Masa promedio/fruto(g)</b>
<b>Verde</b>	178,3	156	1,143
<b>Verde – amarillo</b>	122	102	1,196
<b>Rojo – verde</b>	243,2	150	1,621
<b>Rojo</b>	326,2	178	1,833
<b>Morado</b>	314,2	155	2,027
<b>Moradas – deshidratadas</b>	180,5	174	1,037

El promedio de la masa de fruto que se dividieron por característica de color indica que el mejor rendimiento de producción lo tienen los frutos morados con una masa promedio de fruto de 2.027g, seguida de los frutos rojos con una masa promedio por fruto de 1.883 g.

Los dos grupos de frutos con mayor rendimiento se caracterizaron fisicoquímicamente. Inicialmente, se realizó la determinación de sólidos solubles (°Brix) para los frutos rojos y

morados mostrando valores de 13 y 19 °Brix (**Tabla 10**), respectivamente. Mientras que los valores de pH en estos frutos no variaron de (5,9 y 5,8), respectivamente (**Tabla 11**).

**Tabla 10.** *Determinación de grados Brix para cerezas recolectadas por características de color rojo y morado.*

	<b>Cerezas rojas (°Brix)</b>	<b>Cerezas Moradas (°Brix)</b>
<b>Número de replica</b>	<b>Refractómetro digital</b>	<b>Refractómetro digital</b>
1	14,9	14,7
2	12,9	15,1
3	17,3	16,3
4	12,9	18,4
5	12,9	19,8
6	15,2	18,3
7	13,1	21,4
8	12,5	20,2
9	7,8	19,9
10	11,3	22,7
11	12,8	19,9
12	14,2	19,4
13	13,5	16,4
14	13,1	21,4
15	14,4	19,3
16	12,5	22,4
17	10,6	20,6

18	15,4	18,2
19	15,1	21,4
20	14,4	22,8
<b>Promedio</b>	<b>13°Brix</b>	<b>19°Brix</b>

**Tabla 11.** Determinación de pH para cerezas recolectadas por características de color rojo y morado.

Número de replica	Cerezas rojas (pH)	Cerezas Moradas (pH)
1	5,8	5,9
2	6,1	5,7
3	5,9	5,7
<b>Promedio</b>	5,9	5,8

Estos resultados indican que los frutos de café durante la maduración tienen una ganancia de peso importante que influye en el rendimiento. Se apreció una mayor diferencia de masa (0,425 g) entre los estados de color rojo-verde y verde-amarillo. Se observan incrementos cercanos a 0,2 g hasta alcanzar el mayor peso para los granos de color morado; es decir, menos kilogramos de café en fruto que al transformarse en pergamino seco son necesarios para obtener 70 kg de café almendra.

También se observó, que a medida que avanza la maduración del fruto de café aumenta el contenido de sólidos solubles (°Brix), los cuales están representados en compuestos como azúcares, ácidos, sales y demás compuestos solubles en agua que se encuentra en la pulpa. Para dar una relación de esta variable con el estado de maduración más adecuado, es necesario comparar con otras variables químicas como lo son la acidez, clorofilas y las antocianinas (Marín L. et al., 2003).

De acuerdo con las observaciones de peso fresco del café y su contenido de sólidos solubles totales (°Brix), es posible determinar que el mejor estado de recolección para los frutos de café variedad Castillo® en la zona de muestreo fueron los frutos con característica de color morado, ya que los datos obtenidos de peso promedio en fresco, sólidos solubles totales (°Brix) y pH, se acercan a los estudios realizados por (Marín L. et al., 2003). En la literatura que se consultó tuvo como objetivo caracterizar los estados de maduración del fruto (*Coffea arabica*) donde se ha establecido que el momento óptimo de recolección del café es: alrededor de 217 días después de la floración, una coloración roja brillante a roja opaca, sólidos solubles totales de 17,53 +/-2,34 y pH de 4,95 +/- 0,07 (Arcila, 2007).

### **3.2. Análisis químico y sensorial del café fermentado y seco**

El análisis estadístico se basó en los análisis de volátiles en café verde, agrupados en 18 grupos funcionales, compuestos nutricionales (ácidos orgánicos, carbohidratos, cafeína y minerales (Fe, K, Ca)), ácidos clorogénicos y el perfil de taza en café tostado, correspondiente a 30 atributos. Los datos fueron comparados para cada uno de los métodos de procesamiento empleados en este estudio. Además, fueron analizados en tres grupos: a) compuestos volátiles y perfil de taza y b) compuestos nutricionales y perfil de taza y c) ácidos clorogénicos en café verde y perfil de taza.

#### **3.2.1. Grupo A. Compuestos volátiles y perfil de taza (PT)**

El análisis de volátiles arrojó un total de 761 compuestos diferentes para las 24 muestras inyectados con un promedio de 40 compuestos identificados por muestra, de los cuales fueron identificados y posteriormente agrupados en 18 grupos funcionales (**Tabla 12**).

El análisis de correspondencia entre los compuestos volátiles y las fermentaciones evaluadas se presenta en la **Tabla 12** y en la **Figura 7**. Se registró una tendencia en la prueba de independencia  $\chi^2$  (0,065). Los compuestos volátiles que se identificaron con mayor frecuencia en el perfil de cada fermentación fueron: a) en café honey amarillo: alcohol (27 %) e hidrocarburos (37 %); b) café húmedo alcohol (20 %), hidrocarburos (42 %) y éster (9 %); c) café seco: alcohol (28 %), hidrocarburos (34 %) y éster (13 %); y d) café honey rojo: alcohol (20 %), hidrocarburos (34 %) y éster (15 %).

Los resultados obtenidos de la participación porcentual de cada compuesto volátil entre los métodos de procesamiento indicó que compuestos como éteres solo estuvieron presentes

en el proceso semi-seco honey amarillo; cicloalcanos mostraron más participación en el proceso semi-seco honey amarillo y húmedo; fenoles se presentaron en el proceso húmedo y seco; además, lactonas principalmente en procesos secos; pirazinas, piridinas y pirroles en procesos secos y semi-secos honey rojo; y por último, solo se registraron sulfitos en la procesos secos.

De acuerdo con Bertrand y colaboradores (Bertrand et al., 2012), los hidrocarburos que se presentan en café verde, se encuentra el pentano, el tolueno, etilbenceno, estireno y metano; estando el tolueno relacionado con el cuerpo y el amargor del café, además, la generación de estos compuestos no se ven afectados por las condiciones de procesamiento. Por su parte, los alcoholes, como butan-2,3-diol y butan-1,3-diol se correlacionaron estrechamente con una reducción en la calidad aromática, la acidez y un aumento del sabor terroso y verde del café, adicionalmente se ha correlacionado su producción con temperaturas cálidas durante el procesamiento. Ésteres como el etil acetato e isoamilacetato relacionados con alta intensidad frutal en el café, se ven favorecidos por los procesos de fermentación húmedo y semi-seco (Toledo et al., 2016).

Adicionalmente, se observa la aparición de otros compuestos como los furanos que se presenta comúnmente en los procesos de tostión y se caracterizan por generar notas a pan recién horneado, a malta y caramelo (Hameed et al., 2018), sin embargo, su presencia no es exclusiva de los procesos de tostión, también se ha encontrado en diferentes variedades de café verde (0-0,03 equivalentes de tolueno) (Rhoades, 1960) y en café verde procesado en seco (Tsegay et al., 2019), lo que concuerda con los datos obtenidos en este estudio.

**Tabla 12.** Compuestos volátiles en el perfil de los métodos de procesamiento semi-seco honey amarillo, semi-seco honey rojo, seco y húmedo (los porcentajes corresponden a las abundancias relativas).

	Honey Amarillo		Húmedo		Seco		Honey Rojo	
	Participación del volátil dentro de cada fermentación. *	Participación de volátiles entre fermentaciones	Participación del volátil dentro de cada fermentación.	Participación de volátiles entre fermentaciones	Participación del volátil dentro de cada fermentación.	Participación de volátiles entre fermentaciones	Participación del volátil dentro de cada fermentación.	Participación de volátiles entre fermentaciones
<b>Ácido alifático</b>	6%	<b>33%</b>	1%	7%	4%	30%	4%	30%
<b>Alcohol</b>	27%	21%	20%	23%	28%	<b>32%</b>	20%	24%
<b>Aldehído</b>	6%	29%	4%	29%	1%	11%	4%	<b>32%</b>
<b>Amida</b>	4%	23%	4%	<b>35%</b>	2%	15%	3%	27%
<b>Amina</b>	5%	16%	6%	<b>30%</b>	5%	25%	6%	<b>30%</b>
<b>Anhídrido</b>	3%	17%	3%	29%	2%	17%	4%	<b>38%</b>
<b>Cetona</b>	1%	8%	5%	<b>42%</b>	2%	15%	4%	35%
<b>Cicloalcano</b>	1%	<b>33%</b>	1%	<b>33%</b>	0%	17%	0%	17%
<b>Éster</b>	6%	10%	9%	22%	13%	31%	15%	<b>36%</b>
<b>Éter</b>	1%	<b>100%</b>	0%	0%	0%	0%	0%	0%
<b>Fenol</b>	0%	0%	0%	<b>50%</b>	0%	<b>50%</b>	0%	0%
<b>Furano</b>	1%	10%	2%	20%	3%	30%	4%	<b>40%</b>
<b>Hidrocarburo</b>	37%	19%	42%	<b>30%</b>	34%	25%	34%	26%
<b>Lactona</b>	0%	0%	0%	13%	2%	<b>63%</b>	1%	25%
<b>Pirazina</b>	0%	0%	0%	0%	1%	<b>100%</b>	0%	0%
<b>Piridina</b>	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	<b>100%</b>
<b>Pirrol</b>	1%	33%	0%	0%	0%	<b>33%</b>	0%	<b>33%</b>
<b>Sulfito</b>	0%	0%	0%	0%	0%	<b>100%</b>	0%	0%



	Etanol	Vinoso <sup>1</sup>
<b>Lactona</b>	Butirolactona	Dulce, aromático <sup>1</sup>
<b>Pirazina</b>	4,8-Diacetil pirazina	Sabor cálido, afrutado, dulce, caramelizado, ligeramente astringente <sup>1</sup>
<b>Aldehídos</b>	2-Metil 2-butenal	Cacao tostado <sup>1</sup>
	Acetaldehído	Picante, afrutado, malta <sup>1,2</sup>
	2-Etil butanal	Afrutado, el olor similar al del banano, verde <sup>1</sup>
	Hexanal	Hierba recién cortada y fruta inmadura acre <sup>1</sup>
	Pentanal	Frutos secos, nueces <sup>1</sup>
	2-Metil propanal, -	Afrutado, acre, maltosa <sup>1</sup>
<b>Amina</b>	Etilenimina	Débil, cacao <sup>1</sup>
<b>Anhídrido</b>	Anhídrido 2-metil- propanóico	Agradable afrutado, sabor mantecoso. <sup>1</sup>
<b>Éster</b>	Metil éster del ácido butanóico	Afrutado, manzana, fresa, dulce <sup>1</sup>
<b>Furanos</b>	3,4-Dimetil dihidrofuran-2,5-diona	Olor a pan recién horneado <sup>1</sup>
	3-Metil dihidrofuran-2,5-diona	Caramelo, azucarado <sup>1</sup>
<b>Piridina</b>	3-Etil piridina	Tabaco <sup>3</sup>
<sup>1</sup> (Flament & Bessiére-Thomas, 2002) <sup>2</sup> (Bressanello et al., 2018). <sup>3</sup> (Bressanello et al., 2017)		

En el análisis de componentes principales se detecta con mayor frecuencia hidrocarburos (36,53 %), alcoholes (23,25 %) y ésteres (11,30 %). Para el caso de la evaluación sensorial, se obtuvieron 30 descriptores del perfil de taza, entre los cuales se obtuvieron con mayor frecuencia los sabores a panela (53,62 %), vinoso (27,53 %), chocolate (26,08 %) y frutos rojos (23,18 %). El resultado del análisis de componentes principales (CP) indicó que 4 componentes explican el 78,92% de la variabilidad en los datos, es decir que las variables que se agrupan en estos componentes son los más importantes para explicar la variabilidad en el conjunto de datos, mientras que las variables que no están correlacionadas con ninguno de los componentes principales, o que están asociadas con los demás componentes, presentaron una baja contribución (ver **Tabla 14**).

**Tabla 14.** Componentes principales en compuestos volátiles y perfil de taza en café para los cuatro procesos de fermentación.

	CP 1	CP 2	CP 3	CP 4
<b>Valor propio</b>	6,596	4,316	1,453	1,062
<b>Varianza (%)</b>	38,799	25,389	8,547	6,247
<b>Volátiles<sup>1</sup></b>				
<b>Ácido alifático</b>	0,2490	0,5146*	0,1337	0,7422***
<b>Alcohol</b>	0,8576***	-0,2291	0,1406	0,0699
<b>Éster</b>	0,7220***	-0,5526*	0,1387	0,0143
<b>Fenol</b>	0,3321	0,6676***	0,4729*	-0,0184
<b>Furano</b>	0,6840***	-0,5940*	0,1007	0,1230
<b>Pirazina</b>	0,4125	0,7393***	0,3923	0,0098
<b>Pirrol</b>	0,7039***	-0,6298*	0,1798	-0,0186
<b>Perfil taza<sup>1</sup></b>				
<b>Panela</b>	-0,7183****	-0,2121	0,4765*	0,0016
<b>Chocolate</b>	-0,5314***	-0,2528	0,5188	-0,2753
<b>Frutal</b>	0,8096***	0,2062	0,1169	-0,2722
<b>Aromático</b>	-0,4512*	-0,2095	0,6475***	0,1967
<b>Vinoso</b>	0,8749***	0,2039	-0,0300	-0,2667
<b>Uva</b>	0,5626***	0,4361	-0,0333	-0,0362
<b>Miel</b>	0,3597	0,6742***	-0,0939	0,2190
<b>Cacao</b>	0,4169*	0,7272***	0,1319	-0,3349
<b>Tamarindo</b>	0,6586***	-0,4269*	-0,0390	0,2612
<b>Piña</b>	0,7456***	-0,5986*	0,12928	-0,0234

CP: Componente principal. <sup>1</sup> coeficiente de correlación. \*\*\* Significancia del coeficiente de correlación  $p \geq 0.001$ . \* Significancia del coeficiente de correlación  $p \geq 0.05$  -  $p \leq 0.001$

El CP1 retuvo el 38,80 % de la variabilidad y fue caracterizado como el efecto del secado cuando hay presencia de mucilago. Este componente separó el método de procesamiento seco (cuadrante positivo), de los métodos húmedo, semi-seco honey amarillo y semi-seco honey rojo (cuadrante negativo). Los compuestos volátiles con mayor correlación positiva al CP1 fueron alcoholes (0,8576), éster (0,7220), pirrol (0,7039) y furano (0,6840), y



golpeadas, sucias o con hongos (Lee et al., 2015; Toledo et al., 2016). No obstante, el porcentaje de estos compuestos es despreciable ya que su contribución a la cualidad de sabor no es esencial. Para disminuir la presencia de fenoles, es necesario generar un mejor proceso de selección del grano. Otra característica observable para destacar es la presencia de los compuestos tipo furano presentes en el café verde, que contribuyen al sabor final del café tostado (tostión baja o media) dando una característica de taza a caramelo. Pero cuando se lleva a cabo el proceso de tostión alta de estos granos, los compuestos tipo furano dejan de dar notas agradables hasta alcanzar características astringentes.

La implementación de la técnica SPME ha sido ampliamente usada para la identificación de compuestos volátiles en café, demostrando ser una técnica confiable, con bajo consumo de muestra y con un amplio margen discriminatorio para la identificación de volátiles en café (Caporaso et al., 2018). Estudios desarrollados por Eroz poyraz y otros (Eröz Poyraz et al., 2016) para *C. arabica* en grano verde registraron la identificación de al menos 200 compuestos volátiles. Bressanello y su equipo (Bressanello et al., 2017) reportaron la presencia de 117 compuestos y Valencia y colaboradores (Valencia et al., 2015) al evaluar el perfil de compuestos volátiles en café para la región del Quindío (Colombia) con la técnica SPE solo identificó 55 compuestos volátiles. Los resultados descritos anteriormente son comparables con los compuestos volátiles identificados en el presente trabajo (40), los cuales fueron similares a los reportados por (Valencia et al., 2015).

Las investigaciones desarrolladas hacia la caracterización y manipulación del perfil de taza en café, con énfasis en la modulación de sabor y aroma se han enfocado en identificar los compuestos precursores que dan origen a estos atributos y los factores que lo modifican (Lee et al., 2015; Sunarharum et al., 2014) en una revisión que abordaron la delicada relación entre los procesos fermentativos y/o de postcosecha y el aroma del café, citaron que las diferencias entre los procesos húmedo, seco y semi-seco (honey amarillo y honey rojo), pueden estar relacionados con la concentración de azúcares como fructosa, glucosa, arabinosa y galactosa, así como también con el catabolismo y transformación de aminoácidos.

En el presente trabajo, el análisis de componentes principales separó el método de procesamiento seco, del semi-seco honey rojo y honey amarillo y húmedo. Esta separación en el análisis estuvo mediada por la conservación de la pulpa en el primer método de procesamiento, lo cual pudo favorecer la presencia de precursores volátiles como pirazina,

piroles, furanos y alcohol. (Lee et al., 2015) señalan que las reacciones de *Maillard* asociada a la presencia de azúcares reductores y aminoácidos libres da lugar a presencia de volátiles como pirazinas; y para el caso de los furanos y alcoholes la caramelización y fermentación de azúcares, respectivamente. Resultados consecuentes con los perfiles de taza asociados a sabores vinosos, aromáticos y melosos (caramelizados). La presencia de los compuestos antes mencionados también sugiere la similitud registrada entre el método de procesamiento seco y semi-seco honey rojo, tomando en consideración que esta última conserva la pulpa en la mayor parte del proceso.

El perfil de volátiles en el proceso seco registró la presencia de compuestos sulfurados, los cuales han sido asociados a café sobre tostado, aún en bajas proporciones (~0,01%). Estos resultados sugieren que el proceso de tostión para el proceso seco puede ser predispuesta a generar este tipo de volátiles por la mayor presencia de aminoácidos libres (Cheong et al., 2013), y con ello generar una sensación a taza ácida (Flament & Bessiére-Thomas, 2002).

### 3.2.2. Grupo B. Ácidos orgánicos, carbohidratos, cafeína, minerales y perfil de taza

El resultado del análisis de contrastes principales (CP) indicó que 3 componentes explican el 100% de la variabilidad en los datos (Tabla 15).

**Tabla 15.** Componentes principales nutricionales y perfil de taza en café especial variedad Castillo®, como resultado de cuatro procesos de fermentación diferentes.

	CP 1	CP 2	CP 3
<b>Valor propio</b>	12,671	4,223	3,106
<b>Varianza (%)</b>	63,356	21,113	15,531
<b>Acumulado de varianza (%)</b>	63,356	84,469	100,000
<b>Compuestos<sup>1</sup></b>			
<b>aroma</b>	0,9101	-0,1388	0,3904
<b>Panela</b>	-0,9801	-0,1953	-0,0358
<b>Frutal</b>	0,9149	0,3482	-0,2043
<b>Vinoso</b>	0,9558	0,2630	0,1312
<b>Uva</b>	0,8678	0,2218	0,4446
<b>Miel</b>	0,7262	0,2186	0,6518
<b>Mora</b>	0,9574	0,2101	0,1983
<b>Cacao</b>	0,9309	0,3545	-0,0881
<b>Dulce</b>	-0,6707	0,5536	0,4936
<b>Calcio (Ca)</b>	0,9574	0,1454	0,0393
<b>Hierro (Fe)</b>	-0,8715	0,2639	0,4134

<b>Potasio (K)</b>	-0,9750	0,2049	0,0863
<b>Cafeína</b>	0,0894	-0,4292	0,8988
<b>Ácido acético</b>	-0,5365	0,6222	0,5701
<b>Ácido málico</b>	0,6204	-0,7478	-0,2362
<b>Ácido quinico</b>	0,0934	-0,8639	0,4950
<b>Ácido cítrico</b>	0,9625	0,2299	0,1438
<b>fructosa</b>	-0,9419	-0,3352	0,0218
<b>glucosa</b>	-0,3534	-0,7391	0,5735
<b>sacarosa</b>	-0,5503	0,8249	0,1293

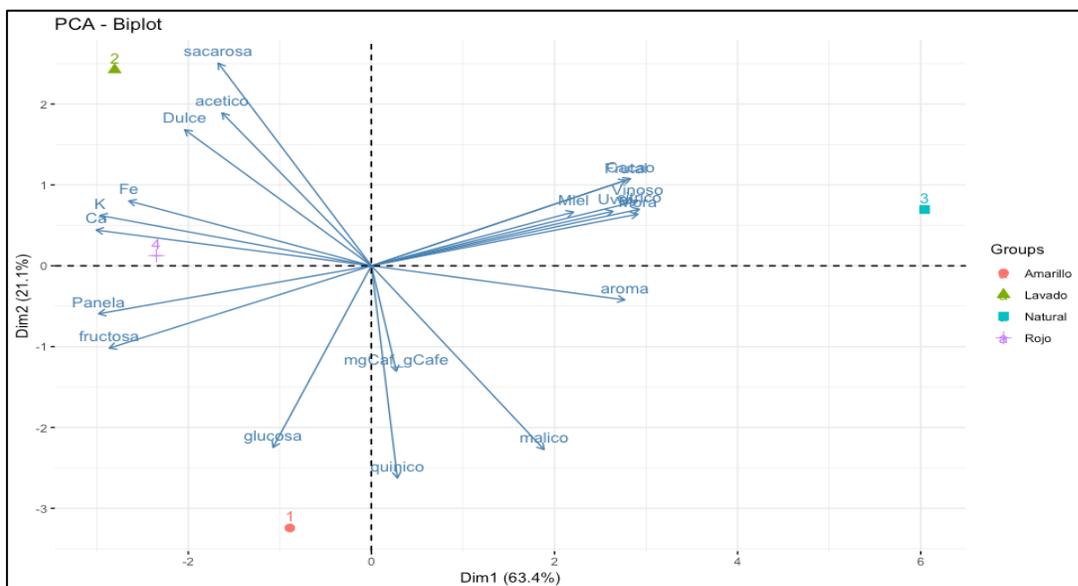
CP: Componente principal

<sup>1</sup> coeficiente de correlación

El CP1 retuvo el 63,36 % de la variabilidad. Este componente separó el método de procesamiento seco (cuadrante positivo), de los métodos de procesamiento húmedo, semi-seco honey amarillo y semi-seco honey rojo (cuadrante negativo). Las cualidades de cata con mayor correlación positiva al CP1 fueron aroma (0,9101), frutal (0,9149), vinoso (0,9558), mora (0,9574), cacao (0,9309), y los componentes nutricionales calcio (0,9574) y ácido cítrico (0,9625). Los compuestos asociados negativamente al CP1, estuvieron relacionados con panela (-0,9801), potasio (-0,9750) y fructosa (-0,9419). El CP2 retuvo el 21,113 % de la variabilidad diferenciando el método de procesamiento semi-seco honey amarillo (cuadrante negativo) del método de procesamiento seco, semi-seco honey rojo y húmedo. El compuesto nutricional con mayor correlación positiva al CP2 fue la sacarosa (0,8249). Los compuestos asociados negativamente al CP2, estuvieron relacionados con el ácido quínico (-0,8639). Para el CP3 se destaca la separación del método de procesamiento semi-seco honey rojo de los demás procesos, en el cual el compuesto asociado positivamente más valorado fue la cafeína (0,8988).

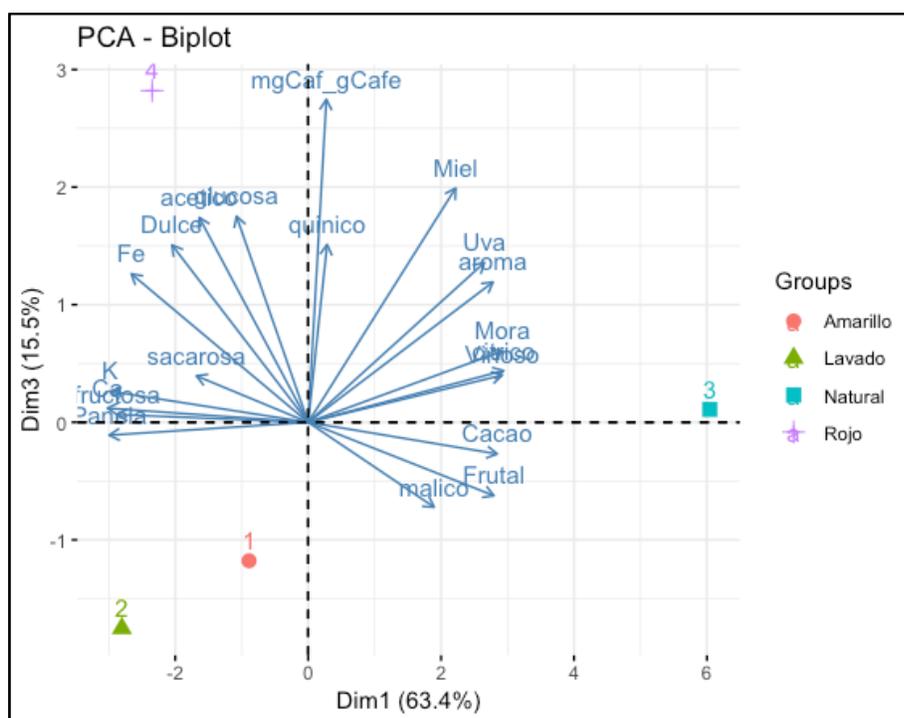
El análisis de correspondencia entre los carbohidratos, ácidos orgánicos, cafeína, minerales, perfil de taza y las fermentaciones evaluadas se presenta en las **Figuras 9 y 10**

**Figura 9.** Componentes principales de las dimensiones 1 y 2, para el análisis de ácidos orgánicos, carbohidratos, cafeína, minerales y perfil de taza para cuatro métodos de procesamiento.



Fuente: Elaboración propia

**Figura 10.** Componentes principales de las dimensiones 3 y 1, para el análisis de ácidos orgánicos, carbohidratos, cafeína, minerales y perfil de taza para cuatro métodos de procesamiento.



Fuente: Elaboración propia

En el estudio de los compuestos nutricionales, el análisis de componentes principales (CP1), separó el método de procesamiento seco del método de procesamiento semi-seco honey amarillo, semi-seco honey rojo y húmedo, en gran medida esta separación se da por la fermentación de la fructosa, la cual tiene una correlación negativa con las notas vinoso y uva. De acuerdo con (Puerta Q., 2010), los carbohidratos son los principales sustratos que se fermentan generando notas de alcohol, aldehídos y ésteres los cuales son algunos de los componentes del aroma vinoso. Además, en la **Figura 9** es posible observar que la sacarosa tiene una correlación negativa con el aroma, y de acuerdo con (Farah et al., 2006), esto se debe a que la sacarosa es precursora de compuestos volátiles tales como furanos, aldehídos y ácidos carboxílicos, los cuales durante la fermentación natural se pudieron formar debido a que durante la fermentación de los frutos se pueden alcanzar mayores temperaturas internas (mayor exposición al sol), en comparación con las demás fermentaciones, que favorecen la degradación y el metabolismo de la sacarosa (Famiani et al., 2015) a compuestos volátiles que afectan el sabor y el aroma de la bebida. Además, estudios previos han encontrado que la disminución de la glucosa y fructosa durante el procesamiento en seco es debido, en parte, a los procesos metabólicos que se presentan durante el secado (Kleinwächter & Selmar, 2010).

Otra de las correlaciones que se pueden evidenciar en la **Figura 9**, es la que se da con los ácidos orgánicos y el potasio (K). Hay varios estudios que han encontrado que una mayor cantidad de potasio (K) conduce a la reducción de la acidez titulable del fruto, es decir que el contenido de los ácidos orgánicos disminuye notablemente (Famiani et al., 2015). Según (Vallarino & Osorio, 2019) esto se debe porque a nivel celular, diferentes mecanismos permiten que el potasio afecte el metabolismo y los ácidos orgánicos almacenados.

La cantidad de potasio, hierro y calcio que se encuentran presentes en el grano de café, está directamente correlacionada con las condiciones del suelo. Este es afectado por condiciones externas como la fertilidad, el cual influye marcadamente en el metabolismo y el desarrollo de los cafetos y los frutos (Arcila, 2007). El grano de café verde tiene un contenido total de elementos de aproximadamente el 5% (m/m), incluidos los metales esenciales, no esenciales y tóxicos. Los elementos que generalmente se determinan en los granos de café se pueden dividir en los grupos principales, el primero, llamado elementos principales o macronutrientes entre los cuales encontramos calcio (Ca) y potasio (K) donde el potasio tiene una contribución dominante y elementos menores (o micronutrientes), con una mayor participación en este estudio del hierro (Fe) (Jeszka-Skowron et al., 2016).

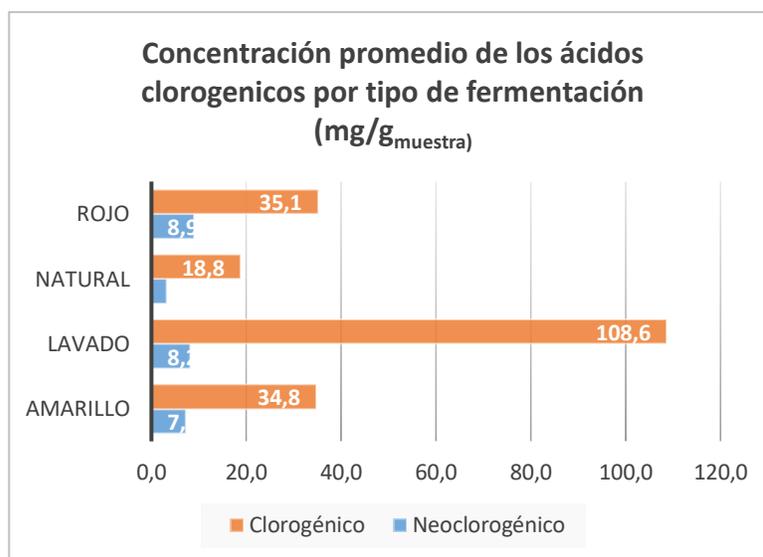
En la **Tabla 15** es posible observar que el componente principal (CP3) tiene mayor contribución para la cafeína (0,8988) y menor contribución positiva para el calcio (0,0393) y fructosa (0,0218); según (Saeed et al., 2019) la cafeína induce la liberación del calcio de las estructuras intracelulares reduciendo la eficiencia en la absorción del calcio. Por otra parte, el promedio de cafeína encontrado en el café verde varió entre 1,18 a 1,25%, valores que en la variedad arábica se encuentran entre 0,6 y 1,2% (Wei & Tanokura, 2015). Otros autores (Ramalakshmi et al., 2007) indican que el contenido de cafeína no se ve afectado por las prácticas ambientales, agrícolas y poscosecha, lo cual fue observado en este estudio donde los valores de cafeína no presentaron diferencias significativas entre los procesos de fermentación.

A diferencia del proceso seco, en el proceso semi-seco honey amarillo el grano de café despulpado se somete a la exposición directa al sol, lo que hace que el proceso de secado del grano sea más rápido: La disminución del contenido de agua conlleva a un menor metabolismo de los azúcares y por lo tanto no se alcanzan a generar compuestos asociados al aroma como en el proceso seco.

### **3.2.3. Grupo C. Ácidos clorogénicos**

Para el análisis de ácidos clorogénicos se realizó la cuantificación del ácido neoclorogénico y ácido clorogénico por medio de curva de calibración las cuales mostraron una ecuación lineal de la siguiente forma;  $y = 2,6336x - 3,6969$ , con  $R^2 = 0,9997$ ;  $y = 2,7414x - 12,578$ , con  $R^2 = 0,9993$ , respectivamente, seguido de un análisis con estadística descriptiva para los primeros 3 muestreos en los 4 procesos de fermentación. Los resultados a analizar fueron la media, mediana, máximo, mínimo y varianzas. de los cuales se puede identificar las diferencias promedio entre los tipos de procesamiento con relación a la concentración de los ácidos.

**Figura 11.** Concentración promedio del ácido neoclorogénico y el ácido clorogénico por tipo de fermentación.



Fuente: Elaboración propia

Se evidencia en la **Figura 11** la participación de los ácidos clorogénicos en comparación con los métodos de procesamiento, los valores promedio de la suma de los dos ácidos (neoclorogénico y clorogénico) son 4,4%, 2,2%, 11,68% y 4,21% para los procesos semi-secos honey rojo, seco, húmedo y semi-seco honey amarillo respectivamente. Esta información es coherente con concentraciones ya reportadas por (Souza et al., 2019), quien indica que la composición de los ácidos clorogénicos varía entre 3,39 – 8,02 g /100 g –1 grano de café verde y (Duarte et al., 2010), quien reporta que el contenido de ácidos clorogénicos para el método de procesamiento semi-seco (honey) se encuentra en  $4,70 \pm 0,37$  g / 100 g.

La alta variación del contenido de ácidos clorogénicos entre los procesos se puede atribuir a condiciones climáticas y procesos poscosecha (Souza et al., 2019) Los procesos de con menor tiempo de remojo (seco – semi-seco honey rojo- semi-seco honey amarillo), presentan menor concentración de ácidos clorogénicos. En promedio, los cafés procesados por el método húmedo presentaron un contenido de ácidos clorogénicos más significativo que aquellos procesados por el método semi-seco (Duarte et al., 2010).

Algunos autores indican que el impacto del tipo de fermentación influencia los principales metabolismos primarios y secundarios de la composición del café, además de una

ligera degradación de los ácidos clorogénicos en semillas secas expuestas al calor del sol (Duarte et al., 2010; Hameed et al., 2018).

La presencia de ácidos clorogénicos en relación con el perfil de taza (PT) desarrolla notas herbales y de astringencia, pero las puntuaciones no fueron tan intensas como se esperaba, ya que la percepción de estos atributos estuvieron ocultos por los compuestos volátiles formados en las reacciones precursoras de la sacarosa o los azúcares totales presentes en el método de procesamiento seco (Scholz et al., 2018).

#### 4. Conclusiones

El análisis de ACP indica que el tipo de procesamiento es un factor diferenciador en la composición química y sensorial del grano de café verde. En consecuencia, mediante este estudio se proporciona información que muestra que los granos de café verde provenientes del método de procesamiento en seco presentan una diferencia química y sensorial más significativa, la cual está asociada a compuestos volátiles pertenecientes a tres grupos funcionales predominantes, hidrocarburos, ésteres y alcoholes, que se encuentran correlacionados con las notas mantecosas, frutales y vinosas, respectivamente. Además, se encontró la presencia de furanos en café verde, característicos del café tostado, los cuales están asociados a notas acarameladas y a pan recién horneado. Es de destacar que en el proceso en seco se encontraron, en mayor concentración, los ácidos orgánicos y menos carbohidratos totales, esto debido a que durante todo el procesamiento el café permanece aireado lo que mantiene el metabolismo respiratorio del grano hasta que el contenido de agua se disminuya, adicionalmente la actividad microbiana también contribuye a la formación de ácidos orgánicos dependiendo de la ruta que se exprese en bacterias y levaduras; evidenciándose, también, en los descriptores sensoriales utilizados por los catadores. Asimismo, los granos de café verde que provienen del método de procesamiento semi-seco honey amarillo tienen una diferenciación más asociada al contenido de volátiles aromáticos agrupados como hidrocarburos alifáticos, los cuales están relacionados con expresión de notas sensoriales como maíz tostado y herbales; además, en las muestras con este tipo de procesamiento, se observó que hay mayor presencia de carbohidratos y menor concentración de ácidos orgánicos, debido a que hay una respiración metabólica menor y una actividad microbiana reducida; esto se confirmó en el perfil de taza obtenido; es decir, muestras menos ácidas.

## **5. Recomendaciones**

De acuerdo con los resultados obtenidos, se sugiere ampliar la variedad de muestras en relación con la genética, origen geográfico y oferta ambiental; y disminuir las variables a medir priorizando las de mayor relevancia encontrada. La generalización de estos resultados puede conducir al desarrollo de herramientas con potencial uso por los caficultores para estandarización o desarrollo de procesos.

## 6. Bibliografía

- Agwanda, C. O., Baradat, P., Eskes, A. B., Cilas, C., & Charrier, A. (2003). Selection for bean and liquor qualities within related hybrids of Arabica coffee in multilocal field trials. *Euphytica*, 131(May), 1–14.
- Akiyama, M., Murakami, K., Hirano, Y., Ikeda, M., Iwatsuki, K., Wada, A., Tokuno, K., Onishi, M., & Iwabuchi, H. (2008). Characterization of headspace aroma compounds of freshly brewed arabica coffees and studies on a characteristic aroma compound of Ethiopian coffee. *Journal of Food Science*, 73(5), 335–346.
- Arcila, J. (2007). Crecimiento y desarrollo de la planta de café. En H. O. Ospina F. & S. M. Marín L. (Eds.), *Sistemas de producción de café en Colombia* (pp. 22–60). Cenicafé.
- Arcos Á., C. A. (2017). *Efecto de la fermentación aerobia del grano de café orgánico, en el desarrollo de características sensoriales de la bebida en el Municipio de Pitalito*. Universidad Nacional Abierta y a Distancia.
- Arruda, N. P., Hovell, A. M. C., Rezende, C. M., Freitas, S. P., Couri, S., & Bizzo, H. R. (2012). Correlação entre precursores e voláteis em café arábica brasileiro processado pelas vias seca, semiúmida e úmida e discriminação através da análise por componentes principais. *Química Nova*, 35(10), 2044–2051.
- Avallone, S., Guyot, B., Brillouet, J. M., Olguin, E., & Guiraud, J. P. (2001). Microbiological and biochemical study of coffee fermentation. *Current Microbiology*, 42(4), 252–256.
- Bertrand, B., Boulanger, R., Dussert, S., Ribeyre, F., Berthiot, L., Descroix, F., & Joët, T. (2012). Climatic factors directly impact the volatile organic compound fingerprint in green Arabica coffee bean as well as coffee beverage quality. *Food Chemistry*, 135(4), 2575–2583.
- Bote, A. D., & Jan, V. (2017). Tree management and environmental conditions affect coffee (*Coffea arabica* L.) bean quality. *NJAS - Wageningen Journal of Life Sciences*, 83, 39–46.

- Bougeard, S., & Dray, S. (2018). Supervised multiblock analysis in R with the ade4 package. *Journal of Statistical Software*, 86(1), 1–17.
- Boyacá V., L. A. (2018). *Estudio exploratorio de la obtención de café verde mediante beneficio Honey y la determinación de su calidad en taza (Tesis de maestría)*. Universidad Nacional de Colombia. Bogotá, Colombia.
- Bressanello, D., Liberto, E., Cordero, C., Rubiolo, P., Pellegrino, G., Ruosi, M. R., & Bicchi, C. (2017). Coffee aroma: Chemometric comparison of the chemical information provided by three different samplings combined with GC – MS to describe the sensory properties in cup. *Food Chemistry*, 214, 218–226.
- Bressanello, D., Liberto, E., Cordero, C., Sgorbini, B., Rubiolo, P., Pellegrino, G., Ruosi, M. R., Bicchi, C., Lavazza, S. A., & Settimo, S. (2018). Chemometric Modeling of Coffee Sensory Notes through Their Chemical Signatures: Potential and Limits in Defining an Analytical Tool for Quality Control [Research-article]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 66, 7096–7109.
- Caporaso, N., Whitworth, M. B., Cui, C., & Fisk, I. D. (2018). Variability of single bean coffee volatile compounds of Arabica and robusta roasted coffees analysed by SPME-GC-MS. *Food Research International*, 108, 628–640.
- Cenicafé, & FNC. (2004). Beneficio del café II. En *Cartilla cafetera* (p. 18). Cenicafé.
- Cheong, M. W., Tong, K. H., Ong, J. J. M., Liu, S. Q., Curran, P., & Yu, B. (2013). Volatile composition and antioxidant capacity of Arabica coffee. *Food Research International*, 51(1), 388–396.
- Cortina, H., Acuña, J., Moncada, M., Herrera, J., & Molina, D. (2013). *Manual del cafetero colombiano: Investigación y tecnología para la sostenibilidad de la caficultura* (FNC (ed.)). Cenicafé.
- Cruz, Pascual, L. F., & Battaglia, M. (2010). Guía técnica de construcción y funcionamiento

de secadoras solares tipo domo. *Journal of Agriculture and Environment for International Development*, 104(3–4), 125–138.

Cruz, R., Morais, S., & Casal, S. (2015). Mineral Composition Variability of Coffees: A Result of Processing and Production. En V. R. Preedy (Ed.), *Processing and Impact on Active Components in Food* (pp. 549–558). Elsevier Inc.

Cuéllar-Soares, P. C., & Castaño-Castrillón, J. J. (2001). Influencia de la materia prima, del grado de tosti3n y de molienda en la densidad del caf3 tostado y molido y en algunas propiedades del extracto obtenido. *Cenicaf3*, 52(2), 127–140.

De Bruyn, F., Zhang, S. J., Pothakos, V., Torres, J., Lambot, C., Moroni, A. V., Callanan, M., Sybesma, W., Weckx, S., & De Vuyst, L. (2017). Exploring the impacts of postharvest processing on the microbiota and metabolite profiles during green coffee bean production. *Applied and Environmental Microbiology*, 83(1).

De Oliveira Petkowicz, C. L. (2015). Polysaccharides in Coffee and Their Relationship to Health: An Overview. En V. R. Preedy (Ed.), *Coffee in Health and Disease Prevention* (pp. 163–172). Elsevier Inc.

Díaz, M. (2014). Recomendaciones para la experimentaci3n de m3todos de beneficio para producir caf3s de alta calidad .

DIN. (2015). *Analysis of coffee and coffee products - determination of chlorogenic acids content in roasted coffee and soluble coffee - HPLC method*. (DIN 10767:2015-08).

Dol3dec, D., & Chessel, D. (1994). Co-inertia analysis: an alternative method for studying species–environment relationships. *Freshwater Biology*, 31(3), 277–294.

Duarte, G. S., Pereira, A. A., & Farah, A. (2010). Chlorogenic acids and other relevant compounds in Brazilian coffees processed by semi-dry and wet post-harvesting methods. *Food Chemistry*, 118(3), 851–855.

- Eröz Poyraz, İ., Öztürk, N., Kıyan, H. T., & Demirci, B. (2016). Volatile compounds of *Coffea arabica* L. green and roasted beans. *Anadolu University Journal of Science and Technology –C Life Sciences and Biotechnology*, 5(1), 31–35.
- Evangelista, S. R., da Cruz Pedrozo Miguel, M. G., de Souza Cordeiro, C., Silva, C. F., Marques Pinheiro, A. C., & Schwan, R. F. (2014). Inoculation of starter cultures in a semi-dry coffee (*Coffea arabica*) fermentation process. *Food Microbiology*, 44, 87–95.
- Famiani, F., Battistelli, A., Moscatello, S., Cruz-Castillo, J. G., & Walker, R. P. (2015). The organic acids that are accumulated in the flesh of fruits: occurrence, metabolism and factors affecting their contents – a review. *Revista Chapingo, Serie Horticultura*, 21(2), 97–128.
- Farah, A., Monteiro, M. C., Calado, V., Franca, A. S., & Trugo, L. C. (2006). Correlation between cup quality and chemical attributes of Brazilian coffee. *Food Chemistry*, 98(2), 373–380.
- Figueiredo, L. P., Borém, F. M., Ribeiro, F. C., Giomo, G. S., & Henrique, J. (2018). Sensory analysis and chemical composition of ‘Bourbon’ coffees cultivated in different environments. *Coffee Science*, 13(1), 122–131.
- Flament, I., & Bessiére-Thomas, Y. (2002). *Coffee Flavor Chemistry*. John Wiley & Sons, Ltd.
- Flórez, R., Ibarra, L., G mez, L., Carmona, C., Castaño, A., & Ortiz, A. (2013). *Manual del cafetero colombiano: Estructura y funcionamiento de la planta de café*. (FNC (ed.)). Cenicafé.
- FNC, Federación Nacional de Cafeteros de Colombia. (2008). *Cafés especiales*. Glosario. <https://federaciondecafeteros.org/wp/glosario/cafes-especiales/>.
- FNC, Federación Nacional de Cafeteros de Colombia. (2016). *Un Café Sobresaliente*. Café de Colombia.

[www.cafedecolombia.com/particulares/es/el\\_cafe\\_de\\_colombia/un\\_cafe\\_sobresaliente/](http://www.cafedecolombia.com/particulares/es/el_cafe_de_colombia/un_cafe_sobresaliente/).

FNC, Federación Nacional de Cafeteros de Colombia. (2017). *FNC en cifras*. Federación Nacional de Cafeteros. [www.federaciondecafeteros.org](http://www.federaciondecafeteros.org).

FNC, Federación Nacional de Cafeteros de Colombia. (2020). *Producción de café de Colombia cerró el 2019 en 14,8 millones de sacos*. Federación Nacional De Cafeteros De Colombia. <https://federaciondecafeteros.org/wp/listado-noticias/produccion-de-cafe-de-colombia-cerro-el-2019-en-148-millones-de-sacos/>.

Fujioka, K., & Shibamoto, T. (2008). Chlorogenic acid and caffeine contents in various commercial brewed coffees. *Food Chemistry*, 106(1), 217–221.

Gonzalez-Sanchez, H., Gonzalez-Palomares, S., & Rosales-Reyes, T. (2011). Café (*coffea arabica* L.): compuestos volátiles relacionados con el aroma y sabor. *Unacar Tecnociencia*, 5(151), 35–45.

Guambi D., L. A., Andrade M., J., Farfán T., D. S., & Velásquez C., S. del R. (2018). Calidad organoléptica , métodos de beneficio y cultivares de café robusta ( *Coffea canephora* Pierre ex Froehner ) en la amazonía del Ecuador. *Revista iberoamericana de Tecnología Postcosecha*, 19(2), 239–253.

Haile, M., & Kang, W. H. (2019). The Role of Microbes in Coffee Fermentation and Their Impact on Coffee Quality. *Journal of Food Quality*, 2019, 6.

Hair, J. F., Black, W. C., Babin, B. J., & Anderson, R. E. (2010). *Multivariate Data Analysis: A Global Perspective* (7a ed.). Pearson education.

Hamdouche, Y., Meile, J. C., Nganou, D. N., Durand, N., Teyssier, C., & Montet, D. (2016). Discrimination of post-harvest coffee processing methods by microbial ecology analyses. *Food Control*, 65, 112–120.

- Hameed, A., Hussain, S. A., Ijaz, M. U., Ullah, S., Pasha, I., & Suleria, H. A. R. (2018). Farm to Consumer: Factors Affecting the Organoleptic Characteristics of Coffee. II: Postharvest Processing Factors. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 17(5), 1184–1237.
- INCOTEC. (2010). *Café y productos del café. determinación del contenido de cafeína usando cromatografía líquida de alto desempeño (HPLC). método de referencia (NTC-ISO 20481:2010)*.
- Jeszka-Skowron, M., Stanisz, E., & De Peña, M. P. (2016). Relationship between antioxidant capacity, chlorogenic acids and elemental composition of green coffee. *LWT - Food Science and Technology*, 73(November 2016), 243–250.
- Kaiser, H. F. (1961). A note on guttman's lower bound for the number of common factors. *the British Journal of Statistical Psychology*, 14(1), 2–3.
- Kleinwächter, M., Bytof, G., & Selmar, D. (2015). Coffee beans and processing. En V. R. Preedy (Ed.), *Coffee in Health and Disease Prevention* (pp. 73–81). Elsevier Inc.
- Kleinwächter, M., & Selmar, D. (2010). Influence of drying on the content of sugars in wet processed green Arabica coffees. *Food Chemistry*, 119(2), 500–504.
- Kulapichitr, F., Borompichaichartkul, C., Suppavorasatit, I., & Cadwallader, K. R. (2019). Impact of drying process on chemical composition and key aroma components of Arabica coffee. *Food Chemistry*, 291(April), 49–58.
- Lê, S., Josse, J., & Husson, F. (2008). FactoMineR: An R Package for Multivariate Analysis. *Journal of Statistical Software*, 25(1), 1–18.
- Lee, L. W., Cheong, M. W., Curran, P., Yu, B., & Liu, S. Q. (2015). Coffee fermentation and flavor - An intricate and delicate relationship. *Food Chemistry*, 185, 182–191.
- Liu, C., Yang, N., Yang, Q., Ayed, C., Linforth, R., & Fisk, I. D. (2019). Enhancing Robusta

coffee aroma by modifying flavour precursors in the green coffee bean. *Food Chemistry*, 281(November 2018), 8–17.

Lloret-Segura, S., Ferreres-Traver, A., Hernández-Baeza, A., & Tomás-Marco, I. (2014). El análisis factorial exploratorio de los ítems: Una guía práctica, revisada y actualizada. *Anales de Psicología*, 30(3), 1151–1169.

Marín L., S. M., Arcila P., J., Montoya R., E. C., & Oliveros T., C. E. (2003). Cambios Físicos Y Químicos Durante La Maduración del Fruto de Café (*Coffea arabica* L. var. Colombia). *Cenifcafé*, 54(3), 208–225.

Mottaleb, M. A., Meziani, M. J., & Islam, M. R. (2014). Solid-Phase Microextraction and its Application to Natural Products. En K. Hostettmann (Ed.), *Encyclopedia of Analytical Chemistry* (pp. 105–127). John Wiley & Sons, Ltd.

Mullin, W. J., & Emmons, D. B. (1997). Determination of organic acids and sugars in cheese, milk and whey by high performance liquid chromatography. *Food Research International*, 30(2), 147–151.

Muñoz Armayones, S. (2016). *Técnicas multivariantes para el análisis de datos ómicos*. (Trabajo de fin de grado inedito). Universidad de Sevilla. Sevilla, España.

Narita, Y., & Inouye, K. (2015). Chlorogenic acids from coffee. En V. R. Preedy (Ed.), *Coffee in Health and Disease Prevention* (pp. 189–199). Elsevier Inc.

Oberthür, T., Läderach, P., Posada, H., Fisher, M. J., Samper, L. F., Illera, J., Collet, L., Moreno, E., Alarcón, R., Villegas, A., Usma, H., Perez, C., & Jarvis, A. (2011). Regional relationships between inherent coffee quality and growing environment for denomination of origin labels in Nariño and Cauca, Colombia. *Food Policy*, 36(6), 783–794.

Pereira, L. L., Guarçoni, R. C., Pinheiro, P. F., Osório, V. M., Pinheiro, C. A., Moreira, T. R., & ten Caten, C. S. (2020). New propositions about coffee wet processing: Chemical

and sensory perspectives. *Food Chemistry*, 310(April 2019), 125943.

Puerta, G. I. (1998). Calidad en taza de las variedades de *Coffea arabica* L. cultivadas en Colombia. *Cenicafé*, 49(4), 265–278.

Puerta Q., G. I. (2008). Calidad en taza de mezclas preparadas con granos de *Coffea arabica* L. y *C. canephora*. *Cenicafé*, 59(3), 183–203.

Puerta Q., G. I. (2010). Fundamentos del proceso de fermentación en el beneficio del café. *Avances técnicos Cenicafé*, 402, 12.

Puerta Q., G. I. (2011). Composición química de una taza de café. *Avances en Química*, 414, 1–12.

Puerta Q., G. I., & Echeverry Molina, J. G. (2015). Fermentación controlada del café: Tecnología para agregar valor a la calidad. *Avances técnicos Cenicafé*, 454, 12.

Puerta Q., G. I. (2012). Factores, procesos y controles en la fermentación del café. *Avances técnicos Cenicafé*, 422, 12.

R Core Team. (2014). *R: A language and environment for statistical computing*. <http://www.r-project.org/>.

Ramalakshmi, K., Kubra, I. R., & Rao, L. J. M. (2007). Physicochemical characteristics of green coffee: Comparison of graded and defective beans. *Journal of Food Science*, 72(5), S333-s337.

Rhoades, J. W. (1960). Analysis of the Volatile Constituents of Coffee. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 8(2), 136–141.

Ribeiro, D. E., Borém, F. M., Nunes, C. A.ônio, Alves, A. P. de C., Santos, C. M. dos S., Taveira, J. H. da S., & Dias, L. L. de C. (2018). Profile of Organic Acids and Bioactive Compounds in. *Coffee Science*, 13(2), 187–197.

- Rodrigues, C. I., Marta, L., Maia, R., Miranda, M., Ribeirinho, M., & Máguas, C. (2007). Application of solid-phase extraction to brewed coffee caffeine and organic acid determination by UV/HPLC. *Journal of Food Composition and Analysis*, 20(5), 440–448.
- Saeed, M., Naveed, M., BiBi, J., Ali Kamboh, A., Phil, L., & Chao, S. (2019). Potential nutraceutical and food additive properties and risks of coffee: a comprehensive overview. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 59(20), 3293–3319.
- Samoggia, A., & Riedel, B. (2019). Consumers' perceptions of coffee health benefits and motives for coffee consumption and purchasing. *Nutrients*, 11(3), 21.
- SCA. (2015). SCAA Protocols Cupping Specialty Coffee. En *Specialty Coffee Association of America*. <http://www.scaa.org/?page=resources&d=coffee-protocols>.
- Scholz, M. B. dos S., Kitzberger, C. S. G., Prudencio, S. H., & Silva, R. S. dos S. F. da. (2018). The typicity of coffees from different terroirs determined by groups of physico-chemical and sensory variables and multiple factor analysis. *Food Research International*, 114(May), 72–80.
- Şemen, S., Mercan, S., Yayla, M., & Açıkkol, M. (2017). Elemental composition of green coffee and its contribution to dietary intake. *Food Chemistry*, 215, 92–100.
- Souza, M. De, Barbosa, G., & Brígida, M. (2019). Correlation between the composition of green Arabica coffee beans and the sensory quality of coffee brews. *Food Chemistry*, 292, 275–280.
- Stefanello, N., Spanevello, R. M., Passamonti, S., Porciúncula, L., Bonan, C. D., Olabiyi, A. A., Teixeira da Rocha, J. B., Assmann, C. E., Morsch, V. M., & Schetinger, M. R. C. (2019). Coffee, caffeine, chlorogenic acid, and the purinergic system. *Food and Chemical Toxicology*, 123, 298–313.

- Sunarharum, W. B., Williams, D. J., & Smyth, H. E. (2014). Complexity of coffee flavor: A compositional and sensory perspective. *Food Research International*, *62*, 315–325.
- Toledo, P. R. A. B., Pezza, L., Pezza, H. R., & Toci, A. T. (2016). Relationship Between the Different Aspects Related to Coffee Quality and Their Volatile Compounds. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, *15*(4), 705–719.
- Tolessa, K., Rademaker, M., De Baets, B., & Boeckx, P. (2016). Prediction of specialty coffee cup quality based on near infrared spectra of green coffee beans. *Talanta*, *150*, 367–374.
- Tsegay, G., Redi-Abshiro, M., Singh, B., Ele, E., Mohammed, A. M., & Mamo, H. (2019). Volatile profile of green coffee beans from *Coffea Arabica* L. plants grown at different altitudes in Ethiopia. *Bull. Chem. Soc. Ethiop.*, *33*(3), 401–413.
- Ufer, D., Lin, W., & Ortega, D. L. (2019). Personality traits and preferences for specialty coffee: Results from a coffee shop field experiment. *Food Research International*, *125*, 108504.
- USDA. (2020). Coffee: World Markets and Trade. En *Foreign Agricultural Service*. <http://apps.fas.usda.gov/psdonline/circulars/coffee.pdf>.
- Valencia, J., Pinzón, M., & Gutiérrez, R. (2015). Caracterización fisicoquímica y sensorial de tazas de café producidas en el departamento del Quindío. *Alimentos Hoy*, *23*(36), 150–156.
- Vallarino, J. G., & Osorio, S. (2019). Organic acids. En E. M. Yahia & A. Carrillo-López (Eds.), *Postharvest Physiology and Biochemistry of Fruits and Vegetables* (pp. 207–224). Elsevier Inc.
- Wei, F., & Tanokura, M. (2015). Organic compounds in green coffee beans. En V. R. Preedy (Ed.), *Coffee in Health and Disease Prevention* (pp. 149–162). Elsevier Inc.

## 7. Anexos

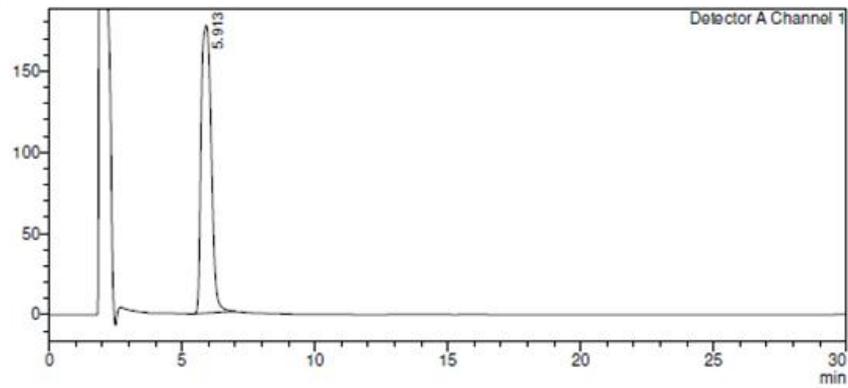
### Carbohidratos

#### <Sample Information>

Sample Name	: Marcela	Sample Type	: Unknown
Sample ID	: Mix - STD	Acquired by	: Unal
Data Filename	: Fructosa.lcd	Processed by	: Unal
Method Filename	: Azucares.lcm		
Batch Filename	: Batch1.lcb		
Vial #	: 1-7		
Injection Volume	: 10 uL		
Date Acquired	: 10/24/2018 7:43:32 PM		
Date Processed	: 10/30/2018 9:11:15 AM		

#### <Chromatogram>

mV



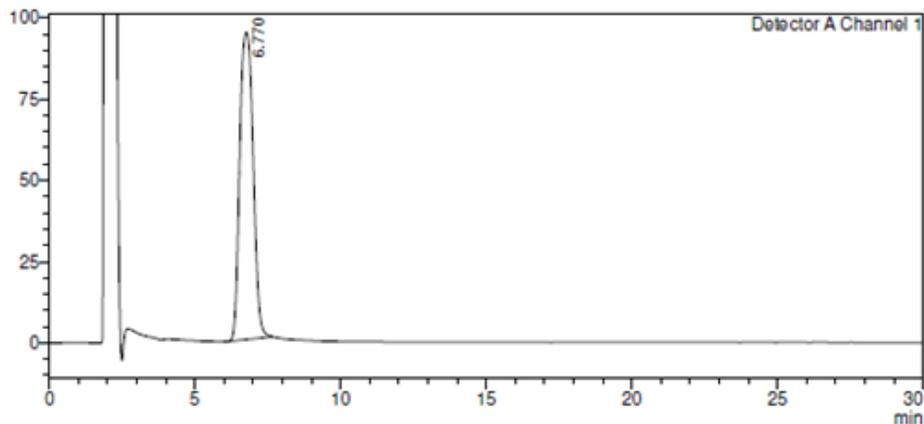
**<Sample Information>**

Sample Name : Marcela  
Sample ID : Mix - STD  
Data Filename : Glucosa.lcd  
Method Filename : Azucares.lcm  
Batch Filename : Batch1.lcb  
Vial # : 1-8  
Injection Volume : 10 uL  
Date Acquired : 10/24/2018 8:14:59 PM  
Date Processed : 10/24/2018 8:45:01 PM

Sample Type : Unknown  
Acquired by : Unal  
Processed by : Unal

**<Chromatogram>**

mV

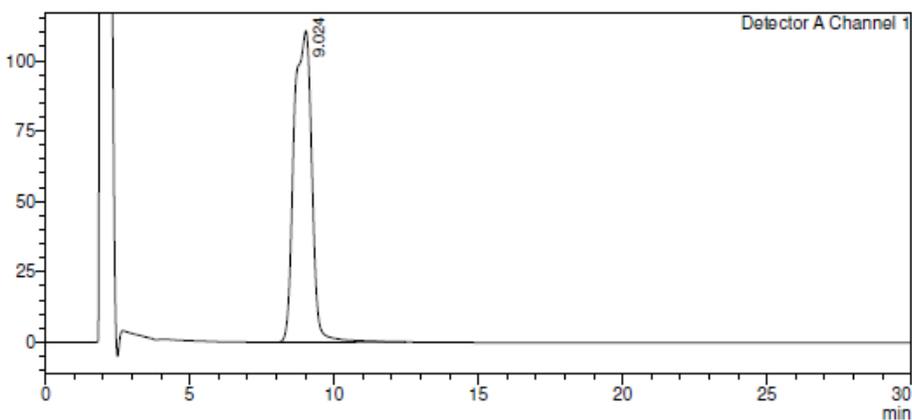
**<Sample Information>**

Sample Name : Marcela  
Sample ID : Mix - STD  
Data Filename : Sacarosa.lcd  
Method Filename : Azucares.lcm  
Batch Filename : Batch1.lcb  
Vial # : 1-9  
Injection Volume : 10 uL  
Date Acquired : 10/24/2018 8:46:28 PM  
Date Processed : 10/30/2018 9:17:22 AM

Sample Type : Unknown  
Acquired by : Unal  
Processed by : Unal

**<Chromatogram>**

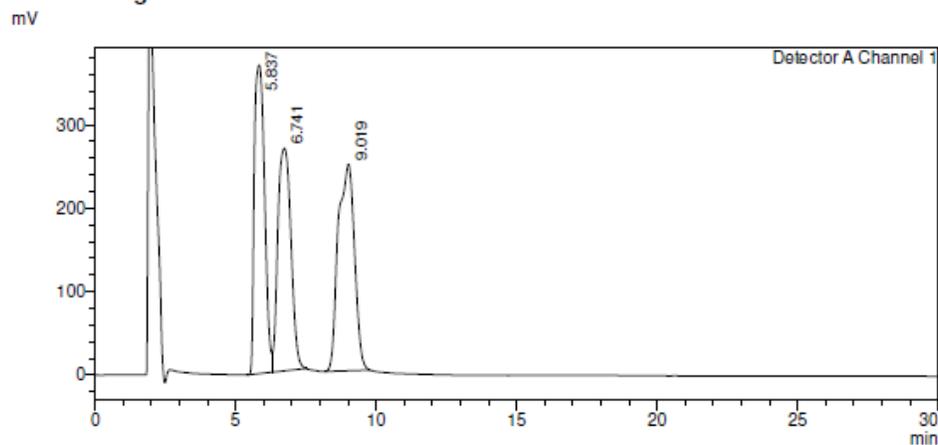
mV



## &lt;Sample Information&gt;

Sample Name	: Marcela	Sample Type	: Unknown
Sample ID	: Mix - STD	Acquired by	: Unal
Data Filename	: Mix - 001.lcd	Processed by	: Unal
Method Filename	: Azucares.lcm		
Batch Filename	: Batch1.lcb		
Vial #	: 1-2		
Injection Volume	: 10 uL		
Date Acquired	: 10/24/2018 5:06:13 PM		
Date Processed	: 10/30/2018 9:22:07 AM		

## &lt;Chromatogram&gt;



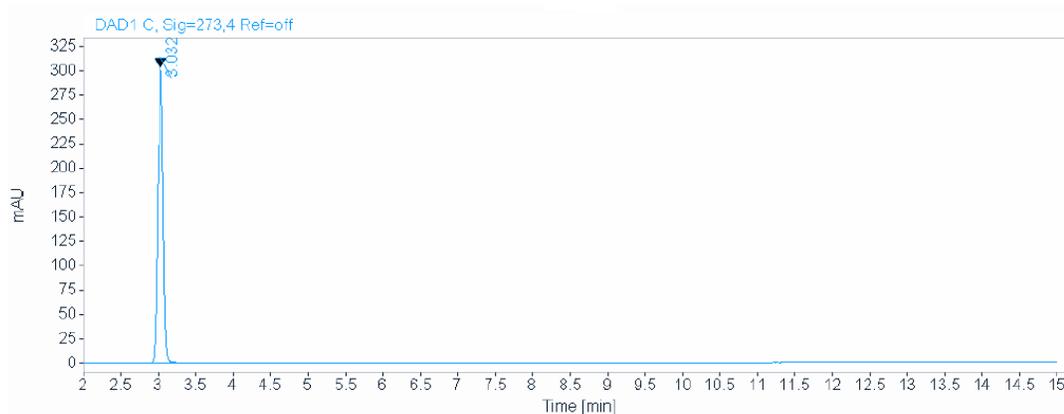
## Cafeína

Data file: C:\Chem32\1\Data\Cafeina Manuela 2018-05-30 15-12-39\095-0601.D  
 Sample name: Cafeina 50 ug mL

Sample type: Calibration

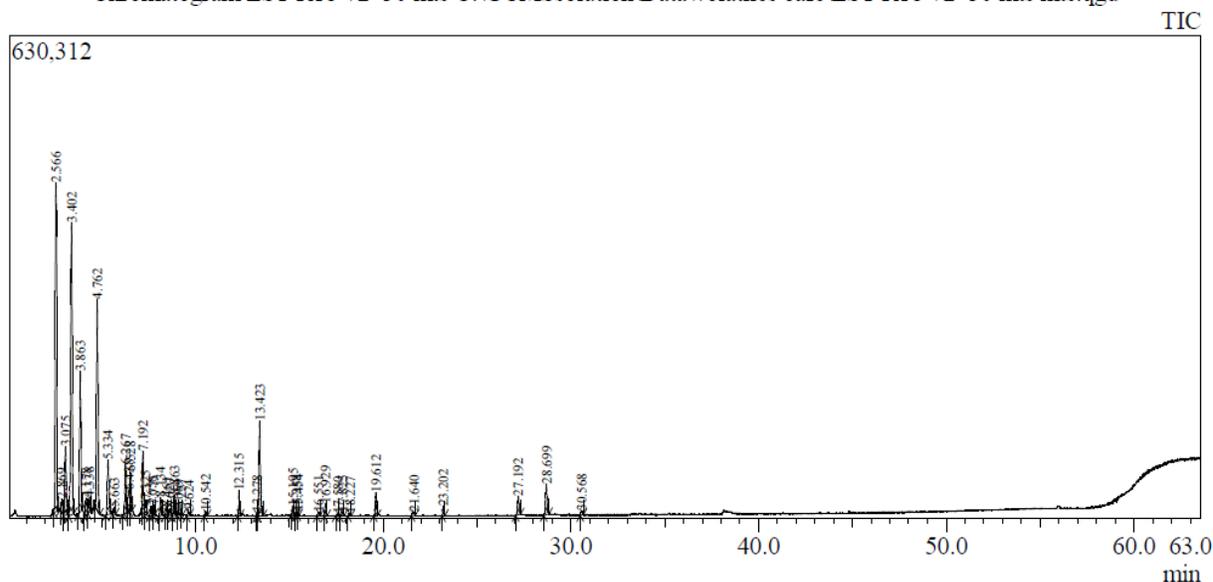
Instrument: HPLC DAD LA SALADA  
 Injection date: 5/30/2018 4:38:12 PM  
 Acq. method: Cafeina Estd.M  
 Analysis method: Cafeina Estd.M  
 Last changed: 5/30/2018 3:35:12 PM

Location: 95  
 Injection: 1 of 1  
 Injection volume: Inj. program  
 Acq. operator: SYSTEM



## Volátiles

Chromatogram LST-R18-72 30 mts C:\GCMSsolution\Data\volatiles cafe\LST-R18-72 30 mts mts.qgd



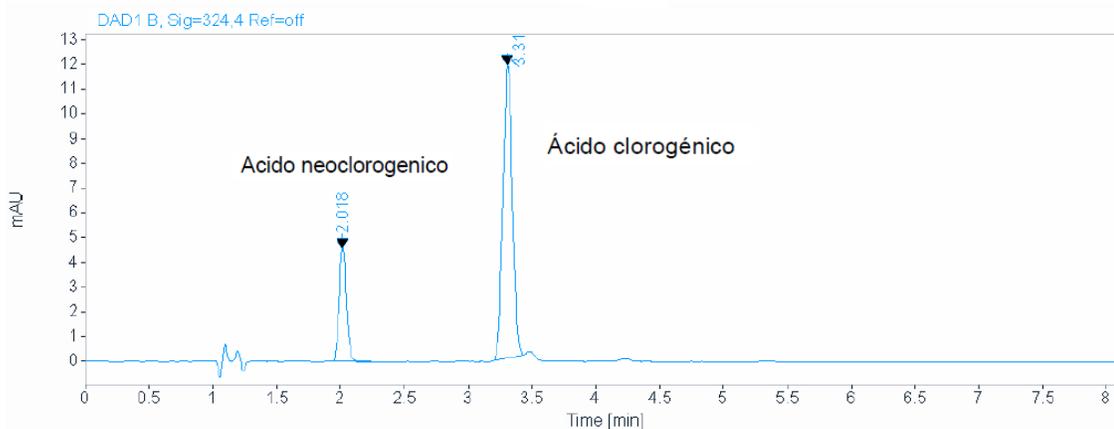
## Ácidos Clorogénicos

**Data file:** C:\Chem32\1\Data\Secuencia Curva 2018-05-22 08-35-03\002-0201.D  
**Sample name:** Mix 1

**Sample type:** Calibration

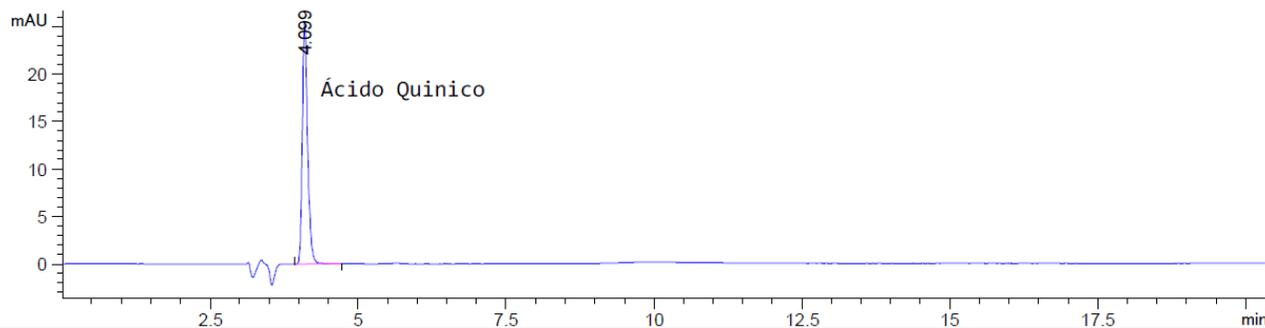
**Instrument:** HPLC DAD LA SALADA  
**Injection date:** 5/22/2018 9:32:20 AM  
**Acq. method:** Ac. Clorogénicos .M  
**Analysis method:** Ac. Clorogénicos .M  
**Last changed:** 5/22/2018 8:35:00 AM

**Location:** 2  
**Injection:** 1 of 1  
**Injection volume:** 1,000  
**Acq. operator:** SYSTEM

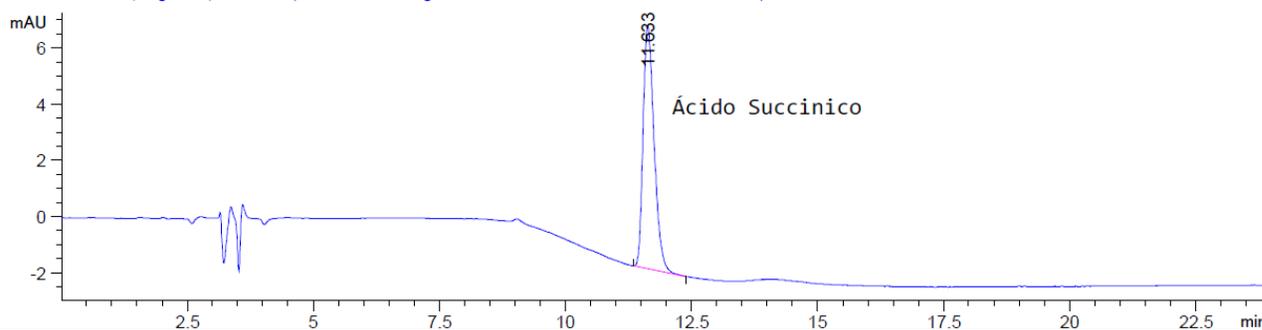


## Ácidos Orgánicos

DAD1 B, Sig=205,4 Ref=off (Secuencia ác organicos 2018-07-18 11-21-08\005-0101.D)



DAD1 B, Sig=205,4 Ref=off (Secuencia ác organicos 2018-07-18 10-54-53\004-0101.D)



DAD1 B, Sig=205,4 Ref=off (Secuencia ác organicos 2018-07-18 14-10-19\012-0301.D)

