



UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA

Estudio de variables poscosecha que impactan la calidad de cafés naturales variedad Arábica, procesados en Santa Marta, Colombia

Vicente de Jesús Franco Bayona

Universidad Nacional de Colombia
Facultad de Ingeniería, Departamento de Ingeniería Civil y Agrícola
Bogotá, Colombia
2023

Estudio de variables poscosecha que impactan la calidad de cafés naturales variedad Arábica, procesados en Santa Marta, Colombia

Vicente de Jesús Franco Bayona

Tesis o trabajo de investigación presentada(o) como requisito parcial para optar al título de:

Magister en Ingeniería - Ingeniería en Biosistema

Director:

PhD. Alfonso Parra Coronado

Línea de Investigación:

Poscosecha y Procesos Agroindustriales

Universidad Nacional de Colombia
Facultad de Ingeniería, Departamento de Ingeniería Civil y Agrícola
Bogotá, Colombia
2023

A todas las personas que directa o indirectamente han contribuido a mi formación y vinculación en el mundo del café.

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: Vicente de Jesús Franco Bayona

Fecha 09/07/2023

Agradecimientos

Quiero expresar mi agradecimiento a las personas e instituciones que han sido clave para perseguir mis estudios de posgrado y poder realizar una conexión entre estos y algunas de las necesidades del sector cafetero que he logrado identificar a partir de mi experiencia profesional.

Primeramente, quiero agradecer a mi director, profesor PhD. Alfonso Parra del departamento de Ingeniería Civil y Agrícola, por su guía, paciencia, valiosos aportes y permitir crear lo que aquí se encuentra escrito. Su acompañamiento y enseñanzas tanto en clases como durante el desarrollo de la tesis han sido clave para organizar, contextualizar y enfocar lo presentado en el documento.

Asimismo, deseo reconocer el apoyo financiero y administrativo proporcionado por GUI, CORUS y el IDRC, cuyo respaldo ha sido fundamental para llevar a cabo esta investigación de manera exitosa.

También quiero expresar a mis agradecimientos a Sylvia Dimiti Harris por su amistad, gestión y esfuerzos que motivaron la decisión de comenzar los estudios de maestría, así como la concepción de una idea inicial del enfoque de investigación y sitio de impacto.

Finalmente, a mi mentor, Msc. Hugo Andrés López Fisco, por su guía y acompañamiento en mi formación en el mundo del café. Así mismo, motivar la formación del criterio y su materialización en este documento; brindar guía e ideas en momentos de retos durante la implementación del diseño experimental.

Resumen

Estudio de variables poscosecha que impactan la calidad de cafés naturales variedad Arábica, procesados en Santa Marta, Colombia

La producción de café de especialidad a partir de prácticas poscosecha amigables con el medio ambiente es cada vez más relevante. Situación que requiere que los cerca de 25 millones de productores de café en todo el mundo adopten estrategias de producción acordes para mantener su competitividad en el mercado. El presente documento tiene como objeto determinar el impacto de variables claves asociadas a la poscosecha de café para construir una metodología de producción de cafés naturales de alta calidad, a partir de las condiciones agroclimáticas de Santa Marta, Magdalena, Colombia. Para esto, se evaluó el impacto del tiempo de fermentación, porcentaje de sombrío en el secado y tiempo de almacenamiento en la calidad de la bebida de café natural, evaluada a partir de la metodología de la Specialty Coffee Association (SCA). De acuerdo con los resultados del análisis estadístico el punto óptimo, mejores resultados de calidad, está en el punto central: 96 h de fermentación S32 (46% sombra) y 55 días de almacenamiento.

Palabras clave: Café de especialidad, Análisis sensorial, Fermentación de café, Secado de café, Almacenamiento de café, Modelo matemático

Abstract

Study of post-harvest variables that impact the quality of natural Arabica variety coffees processed in Santa Marta, Colombia.

The production of specialty coffee using environmentally friendly post-harvest practices is becoming increasingly relevant. This situation requires that approximately 25 million coffee producers worldwide adopt production strategies that allow them to maintain competitiveness in the market. The objective of this document is to determine the impact of key variables associated with coffee post-harvesting to develop a methodology for the production of high-quality natural coffees based on the agroclimatic conditions of Santa Marta, Magdalena, Colombia. To achieve this, the impact of fermentation time, percentage of shade during drying, and storage time on the quality of natural coffee beverages were evaluated using the Specialty Coffee Association (SCA) methodology. According to the results of the statistical analysis the optimum point, best quality results, is at the central point: 96 h of S32 fermentation (46% shade) and 55 days of storage.

Keywords: Specialty coffee, Sensory analysis, Coffee fermentation, Coffee drying, Coffee storage, Mathematical model

Contenido

	Pág.
Resumen.....	IX
Lista de figuras	XIII
Lista de tablas	XVI
Lista de Símbolos y abreviaturas.....	XVIII
Introducción.....	1
1. Problema de investigación	3
1.1 Planteamiento del problema	3
1.2 Justificación	9
1.3 Objetivos	11
1.3.1 Objetivo General	11
1.3.2 Objetivos Específicos.....	11
1.4 Hipótesis de investigación.....	12
2. Marco teórico.....	13
2.1 Cultivo	14
2.2 Fermentación	16
2.3 Secado	20
2.4 Almacenamiento	22
2.5 Análisis de calidad	25
3. Materiales y métodos	29
3.1 Zona de estudio.....	30
3.2 Diseño experimental	31
3.3 Material de estudio	34
3.4 Fermentación	34
3.5 Secado	35
3.6 Almacenamiento	36
3.7 Análisis de calidad	36
3.8 Análisis estadístico	37

4. Resultados	38
4.1 Diseño experimental	39
4.2 Fermentación	45
4.3 Secado	53
4.4 Almacenamiento	61
4.5 Interrelaciones	63
4.5.1 Fermentación – secado	65
4.5.2 Fermentación – almacenamiento	66
4.5.3 Secado – almacenamiento	68
4.5.4 Fermentación – secado – almacenamiento	69
5. Conclusiones y recomendaciones	73
5.1 Conclusiones	73
5.2 Recomendaciones	74
A. Anexo: Fichas de calidad de los tratamientos	77
B. Anexo: Análisis estadístico	87
C. Anexo: Gestión de datos sensores y calidad	99
D. Anexo: Metodología de procesamiento de cafés naturales propuesta	103
Bibliografía	105

Lista de figuras

	Pág.
Figura 1-1: Variación anual de la producción mundial de café en millones de sacos de 60 kg. Adaptado de Total Coffee Production (ICO, 2020b).	4
Figura 1-2: Distribución del precio de una taza de café. Adaptado de Allegra Strategies; International Trade Centre; FT Calculations (2019).....	5
Figura 1-3: Estructura de la cereza de café y su transformación en poscosecha, de acuerdo con el método de procesamiento.	7
Figura 2-1: Mapa de riesgos de la calidad del café. Adaptado de: Innovakit SAS BIC; Mapa de riesgos (https://www.innovakit.com).....	14
Figura 2-2: Contenido de azúcar de la cereza de café en relación con la madurez fisiológica identificada por el color. Fuente propia.....	16
Figura 2-3: Sistemas de fermentación de café.....	18
Figura 2-4: Café con proceso natural secado en cama africana modificada.	21
Figura 2-5: Estabilización del café natural.	24
Figura 3-1: Metodología de investigación. Fuente propia.	29
Figura 3-2: Central de secado solar de cafés Naturales durante época de cosecha. Fuente Propia	30
Figura 3-3: Principales puntos de acopio de café. Fuente propia.	31
Figura 3-4: Área de secado de café. (a) café expuesto al sol directamente. (b) café bajo diferentes polisombras acorde al diseño experimental. Fuente propia.....	35
Figura 4-1: Superficies de respuesta para las interacciones FermentaciónC (C)- Almacenamiento (C). (a) Superficie de respuesta. (b) Gráfico de contorno de la interacción. Fuente propia. ...	43
Figura 4-2: Superficies de respuesta para las interacciones Fermentación Secado - Almacenamiento. (a) Superficie de respuesta. (b) Gráfico de contorno de la interacción. Fuente propia.....	44
Figura 4-3: Superficies de respuesta para las interacciones Fermentación Secado – FermentaciónC (C). (a) Superficie de respuesta. (b) Gráfico de contorno de la interacción. Fuente propia.	45
Figura 4-4: Variables asociadas a la fermentación del café. (a) Relación pH – tiempo de fermentación (h). (b) Relación TDS – tiempo de fermentación (h). (c) Relación conductividad	

eléctrica – tiempo de fermentación (h). (d) Relación concentración de oxígeno – tiempo de fermentación (h). (e) Relación temperatura del café y del lixiviado – tiempo de fermentación (h). (f) concentración de dióxido de carbono – tiempo de fermentación (h). Fuente propia... 47

Figura 4-5: Resultados de calidad obtenidos respecto a los diferentes niveles de fermentación. Fuente propia. 49

Figura 4-6: Relación entre el puntaje de calidad promedio y el tiempo de fermentación. Fuente propia..... 50

Figura 4-7: Relación entre variables asociadas a la fermentación y el puntaje promedio de calidad. (a) Relación entre el puntaje de calidad promedio y el pH. (b) Relación entre el puntaje de calidad promedio y la temperatura media del café al finalizar el proceso de fermentación. (c) Relación entre el puntaje de calidad promedio y los TDS. (d) Relación entre los atributos del café y las horas de fermentación, cada color corresponde a un atributo diferente, verde: aroma, azul oscuro: sabor, amarillo: sabor residual, rojo: balance, azul claro: acidez, púrpura: cuerpo, naranja: puntaje de catador. Fuente propia..... 51

Figura 4-8: Condiciones climáticas generales del área de secado durante el día. (a) Temperatura y humedad relativa promedio. (b) Radiación solar promedio. (c) Precipitación total por mes. (d) Velocidad del viento promedio. Fuente propia..... 55

Figura 4-9: Relación días de secado vs tiempo de fermentación por tratamiento y porcentaje de sombra. Fuente propia. 57

Figura 4-10: Análisis de las polisombras en relación con el porcentaje de sombra generado y el tiempo de secado. (a) Relación entre el porcentaje de sombra generado respecto a su respectiva polisombra. (b) Relación entre los días de secado y sus respectivas polisombras. Fuente propia. 58

Figura 4-11: Curvas de secado de los diferentes tratamientos a partir de la humedad del grano, tiempo de secado y condiciones de sombrero. (a) Curva de secado para los tratamientos sin polisombra. (b) Curva de secado para los tratamientos con polisombra No.13. (c) Curva de secado para los tratamientos con polisombra No. 32. (d) Curva de secado para los tratamientos con polisombra No. 52. (e) Curva de secado para los tratamientos con polisombra No. 65. Fuente propia..... 59

Figura 4-12: Relación entre variables asociadas al secado y la calidad del café producido. (a) Puntaje de taza promedio en función de la polisombra utilizada. (b) Puntaje de taza promedio en función del tiempo de secado promedio de los cafés en esa condición. Fuente propia. 60

Figura 4-13: Relación del puntaje de calidad de los cafés en función del tiempo de almacenamiento. (a) Relación calidad, tiempo de almacenamiento. (b) Relación calidad, tiempo de almacenamiento y horas de fermentación. Fuente propia..... 62

Figura 4-14: Matriz de correlación entre las diferentes variables poscosecha, el puntaje de calidad de la bebida y las principales notas asociadas a sabor y aroma. Fuente propia. 64

- Figura 4-15:** Relación entre el tiempo de fermentación y la referencia de polisombra en función de la calidad de taza, donde RS: Referencia de sombrero y TF: Tiempo de fermentación. Fuente propia. 65
- Figura 4-16:** Relación entre el tiempo de fermentación y tiempo de almacenamiento en función de la calidad de taza, donde TF: Tiempo de fermentación (h) y TA: Tiempo de almacenamiento (días). Fuente propia..... 67
- Figura 4-17:** Relación entre las referencias de polisombas y tiempo de almacenamiento en función de la calidad de taza, donde RS: Referencia de sombrero y TA: Tiempo de almacenamiento (días). Fuente propia. 69
- Figura 4-18:** Relación entre el Tiempo de fermentación (h), referencia de polisombra y tiempo de almacenamiento en función de la calidad de taza, donde TF: Tiempo de fermentación (horas), RS: Referencia de sombrero y TA: Tiempo de almacenamiento (días). Fuente propia. 70

Lista de tablas

	Pág.
Tabla 3-1: Relación de los tratamientos realizados, variables independientes y codificadas con sus respectivos niveles codificados usados en el diseño factorial central compuesto rotacional. Fuente propia	32
Tabla 3-2: Resumen de las variables medidas por proceso poscosecha. Fuente propia.....	33
Tabla 4-1: Diseño completo con las variables de respuesta (calidad de café) experimentales y estimadas con el modelo matemático.	38
Tabla 4-2: Coeficientes de regresión del modelo polinomial de segundo orden. Fuente propia.	39
Tabla 4-3: Coeficientes de regresión reparametrizados del modelo polinomial de segundo orden. Fuente propia.	40
Tabla 4-4: Análisis de varianza del DCCR. Fuente propia	40
Tabla 4-5: Comparaciones múltiples respecto al punto central. Fuente propia.....	41
Tabla 4-6: Variables químicas del café asociadas a la fermentación del café cereza. Fuente propia.....	46
Tabla 4-7: Principales notas obtenidas de aroma y sabor respecto a los tiempos de fermentación. Fuente propia.	52
Tabla 4-8: Relación entre los puntajes de taza promedio y las notas identificadas. Fuente propia.	53
Tabla 4-9: Resumen de variables medidas en campo en el componente de secado. Fuente propia.	56
Tabla 4-10: Frecuencia de las notas obtenidas de aroma y sabor respecto a las polisombras utilizadas en el secado. Fuente propia.....	61
Tabla 4-11: Frecuencia de las notas obtenidas de aroma y sabor respecto a los tiempos de almacenamiento. Fuente propia.....	63
Tabla 4-12: Frecuencia de las notas obtenidas de aroma y sabor respecto a tiempos de fermentación (h) y las referencias de polisombra. Fuente propia.....	66
Tabla 4-13: Frecuencia de las notas obtenidas de aroma y sabor respecto a tiempos de fermentación (h) y tiempos de almacenamiento (días). Fuente propia.	68

Tabla 4-14: Frecuencia de las notas obtenidas de aroma y sabor respecto a tiempos de fermentación (h), polisombras y tiempos de almacenamiento (días). Fuente propia..... 71

Lista de Símbolos y abreviaturas

Símbolos con letras latinas

Símbolo	Término	Unidad SI	Definición
F	Valores de la prueba de fisher	1	1
p -valor	Probabilidad de ocurrencia		
x_i	Variables independientes asociadas a la fermentación (1), secado (2) y almacenamiento (3)	1	Ec 3.1
γ	Variable de respuesta asociada a la calidad del café	1	Ec 3.1

Símbolos con letras griegas

Símbolo	Término	Unidad SI	Definición
β_0	Intercepto del modelo matemático	1	Ec. 3.1
β_i	Coefficientes de regresión de las variables independientes	1	Ec. 3.1
β_{ij}	Coefficientes de las interacciones de las variables independientes	1	Ec. 3.1
β_{ijk}	Coefficientes de la interacción triple de las variables independientes	1	Ec. 3.1

Superíndices

Superíndice	Término
n	Exponente, potencia

Abreviaturas

Abreviatura	Término
Gl	Grados de libertad
MQ	Suma de cuadrados medios de los errores
SCA	Specialty Coffee Association of America - Asociación Americana de Cafés Especiales.
SQ	Suma de cuadrados de los errores

Abreviatura	Término
<i>Q-grader</i>	Profesional con habilidades de evaluación sensorial de cafés tanto arábicas como robustas. Estos trabajan en diferentes segmentos de la industria, enfocándose principalmente en compras y transferencia a partir de la calidad.
<i>S0</i>	Polisombra con 0% de sombra, libre exposición
<i>S13</i>	Polisombra con 13% de sombra de acuerdo con referencia del fabricante, 20.5% calculado
<i>S32</i>	Polisombra con 32% de sombra de acuerdo con referencia del fabricante, 46% calculado
<i>S52</i>	Polisombra con 52% de sombra de acuerdo con referencia del fabricante, 64.4% calculado
<i>S65</i>	Polisombra con 65% de sombra de acuerdo con referencia del fabricante, 69.7% calculado
<i>RS</i>	<i>Referencia de secado, relaciona las diferentes polisombras</i>
<i>TF</i>	<i>Tiempo de fermentación en horas</i>
<i>TA</i>	<i>Tiempo de almacenamiento en días</i>
<i>DCCR</i>	<i>Diseño central compuesto rotacional</i>
<i>ODS</i>	<i>Objetivo de Desarrollo Sostenible</i>

Introducción

La producción de café es una de las principales fuentes de ingresos en muchos países y es esencial para el sustento de aproximadamente 25 millones de pequeñas familias productoras en todo el mundo, las cuales hacen parte de una industria de gran crecimiento con valor actual de 126.17 Billones de dólares y un crecimiento anual aproximado del 4.72% (MordorIntelligence, 2023). Sin embargo, el productor recibe un pequeño porcentaje de todo el valor generado, mientras que las tendencias del mercado han logrado generar oportunidades para que los productores comercialicen café a mejor precio, lo cual requiere un producto de calidad con sostenibilidad en los perfiles. No obstante, la construcción de la calidad del café presenta aún ciertos interrogantes, dado que esta depende de múltiples factores (Peñuela et al., 2013). Por esta razón, la investigación sobre el impacto de las variables poscosecha, labores realizadas por los productores durante cada ciclo de producción, en la calidad del café es un tema de gran relevancia e interés tanto nacional como mundial.

En el proceso de producción de cafés naturales, la cereza no es despulpada por lo que el café no es lavado. Por lo tanto, la cereza es fermentada y secada en su estado original, reduciendo el consumo de agua durante el proceso de beneficio casi a cero (0) litros. Este tipo de procesamiento seco es de los más antiguos (SweetMarias, 2015). En la actualidad países como Brasil y Etiopía cuentan con una producción interesante de cafés naturales orientados a consumo, sin grandes expresiones organolépticas inherentes de café de alta calidad, mientras que Colombia se ha enfocado y especializado en la producción de cafés lavados, también conocidos como suaves lavados, debido a su perfil sensorial (Rodríguez, Sanz, Oliveros, & Ramírez, 2015).

En este aspecto la mayoría de los productores en Colombia se han dedicado generacionalmente a la producción de cafés lavados, junto con una estructura institucional establecida para comprarlos a partir de metodologías tradicionalmente orientadas al volumen y no a la calidad (Alfonso, 2018).

Actualmente los cafés naturales han tomado un auge importante debido al impacto positivo que tienen en el medio ambiente, principalmente en la mitigación de la contaminación de cuerpos de agua y a sus perfiles con notas a frutos rojos, jengibres y tamarindo en taza. Es por esto por lo que grandes exportadores están cambiando a modelos de análisis por calidad y diferenciación de procesos que dinamicen a los productores a aplicar estas prácticas (Grant, 2020).

Los procesos poscosecha de fermentación, secado y almacenamiento, son prácticas que las familias productoras realizan cosecha a cosecha, y que tienen un alto porcentaje de impacto de la calidad del café. Así mismo es aquí donde, según diversos autores, se generan los compuestos volátiles que durante la tostión y preparación de la bebida se maximizan, dando origen a la complejidad organoléptica que posee la bebida del café (Zhang, y otros, 2019), (Wenjiang, y otros, 2019), (Worku, de Meulenaer, Duchateau, & Boeckx, 2018).

Este estudio tuvo como objeto desarrollar una metodología de procesamiento de cafés naturales de alta calidad procesados por vía seca, con el potencial de ser implementada por el pequeño, mediano y gran productor, a partir del estudio del impacto de variables asociadas a los procesos poscosecha de fermentación, secado y almacenamiento.

1. Problema de investigación

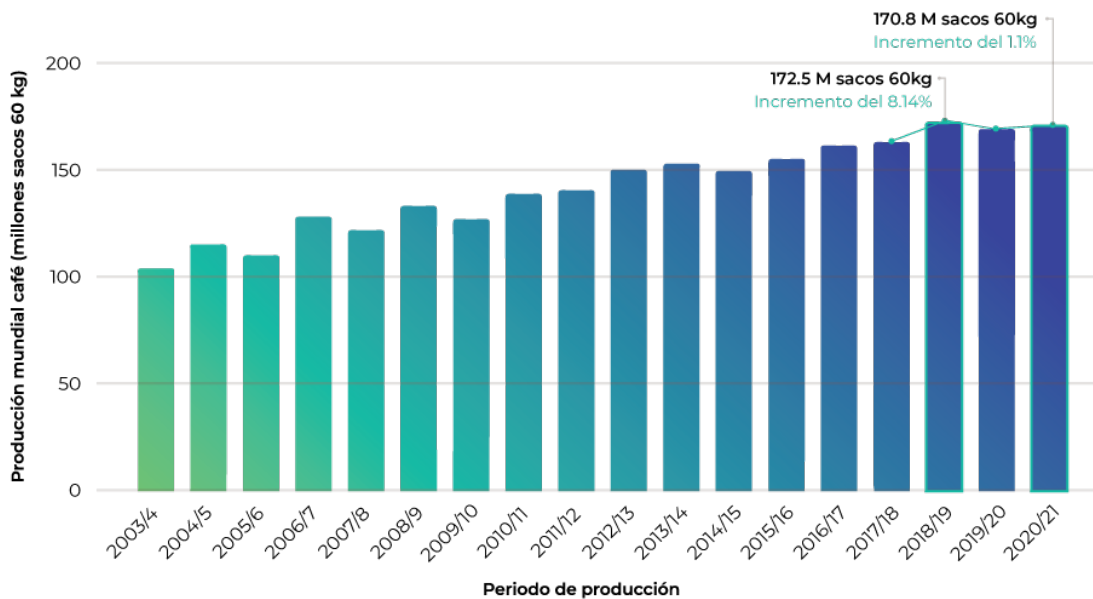
1.1 Planteamiento del problema

El café es un “commodity” de gran importancia tanto en países productores como en consumidores. En países emergentes, fue uno de los commodities más comercializados en una gran parte del periodo comprendido entre 1970 – 2000. Sin embargo, desde entonces ha sido superado por otros productos agrícolas como el aceite de palma y la soya (UNCTAD, 2018). El café se produce en más de 50 países alrededor del mundo dentro de los cuales se destacan Brasil, Vietnam, Colombia, Indonesia y Etiopía, con la mayor producción (ICO, 2020a).

Tucker (2011) y UNCTAD (2018) señalan que la industria cafetera ha experimentado un crecimiento y expansión constantes durante más de 500 años. Según UNCTAD (2018), el crecimiento actual de la industria se atribuye principalmente a la apertura y expansión de tiendas de café, bares, kioscos y franquicias entre otros. Por esto, es común encontrar bebidas de café en todo el mundo, incluido China, país que cuenta con una población de 1433 millones de habitantes (ACNUR, 2019), y que tradicionalmente es un gran consumidor de té, el cual produjo 2.8 millones de toneladas en 2018 y consume alrededor del 40% del producto a nivel mundial. Su consumo de café se ha venido incrementando en un 30% por año en comparación al 2% mundial (PerfectDailyGrind, 2020), por lo cual resulta ser un mercado muy interesante para el café. Ma (2022) comenta que el mercado Chino contribuye con alrededor del 1% de la producción mundial, y que para su consumo interno depende fuertemente de la importación, llegando a importar aproximadamente 1.68 millones de sacos de café verde en el 2020. Finalmente, se comenta, en congruencia con lo establecido anteriormente, que el crecimiento de la industria se encuentra principalmente influenciado por las tendencias de consumo de las nuevas generaciones, rápido crecimiento de la oferta de tiendas de cafés en el territorio y las soluciones tecnológicas de entrega de café a domicilio (Ma, 2022).

Durante el periodo 2020/2021 en el mundo se produjeron 170,8 millones de sacos de 60 kg, lo cual representó un incremento de aproximadamente un 1,1% respecto al periodo anterior, el cual se vio afectado principalmente por la pandemia del Covid-19, al limitar los viajes y esencialmente la logística mundial (ICO, 2021). En este sentido, es importante mencionar que durante el periodo 2018/2019 en el mundo se produjeron 172,46 millones de sacos, aproximadamente 4,75 millones de toneladas de café verde tipo exportación, lo cual representa un incremento del 8,14% respecto al periodo 2017/2018 (ICO, 2020b), Figura 1-1.

Figura 1-1: Variación anual de la producción mundial de café en millones de sacos de 60 kg. Adaptado de Total Coffee Production (ICO, 2020b).

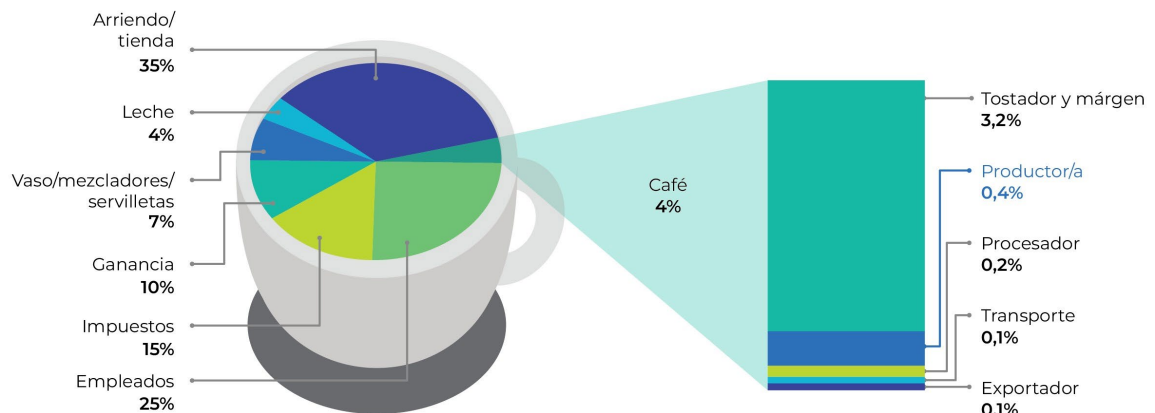


Este incremento en la producción se dio en un periodo caracterizado por bajos precios, conocido como “la crisis mundial del café de 2019” en la cual se experimentaron precios históricos, establecidos en la operación de la bolsa de Nueva York fuera del control de los productores. El café verde tipo exportación en países productores bajó hasta 88 centavos de dólar por libra, cifra inferior a los costos de producción en finca, los cuales ascienden a 1 dólar por libra (ICO, 2020c).

BBC (2019) menciona que este comportamiento se debe a la alta oferta que generó Brasil durante ese periodo, el comportamiento de los especuladores y a problemas económicos en países productores de Centroamérica y África. Es interesante que, a pesar de los fluctuantes precios del café, el valor de la bebida en países consumidores se incrementa, se establecen nuevas tiendas y tostadoras, tanto pequeñas como comunitarias y se originan nuevos segmentos de mercado de especialidad, los cuales han creado una cultura y experiencia en torno al producto (MacDonnell, 2023).

En INTERNATIONAL COFFEE DAY (2019) se señala que alrededor de 12 millones de familias de pequeños productores dependen económicamente de la producción de café, las cuales reciben aproximadamente el 0.4% del valor de comercialización de una taza, (Figura 1-2). Es importante mencionar que estos datos aplican a los cafés que son vendidos al por mayor o “commodities”, por lo cual resulta imperativo el desmarcar el producto de esta categoría respondiendo a las necesidades de los mercados de especialidad.

Figura 1-2: Distribución del precio de una taza de café. Adaptado de Allegra Strategies; International Trade Centre; FT Calculations (2019)



Sin embargo, tal como lo describe Dong et al. (2019) el desarrollo económico, la conciencia social y económica, el interés de las nuevas generaciones en consumir y pagar más por productos y alimentos de calidad, saludables, con procesos sostenibles y amigables con el medio ambiente, representa una oportunidad de negocio interesante para la caficultura, dado que el café cuenta con el potencial de expresar aromas y sabores complejos, producto de buenos procesos o prácticas en finca u origen, tal como el caso de las uvas y el vino. A

su vez, presenta la facultad de reducir los niveles de insulina, reducir el riesgo de algunos tipos de cáncer, reducir la grasa corporal, reducir el riesgo de algunas enfermedades neuronales y proteger de los impedimentos al hígado que produce el alcohol (Samsonowicz et al., 2019).

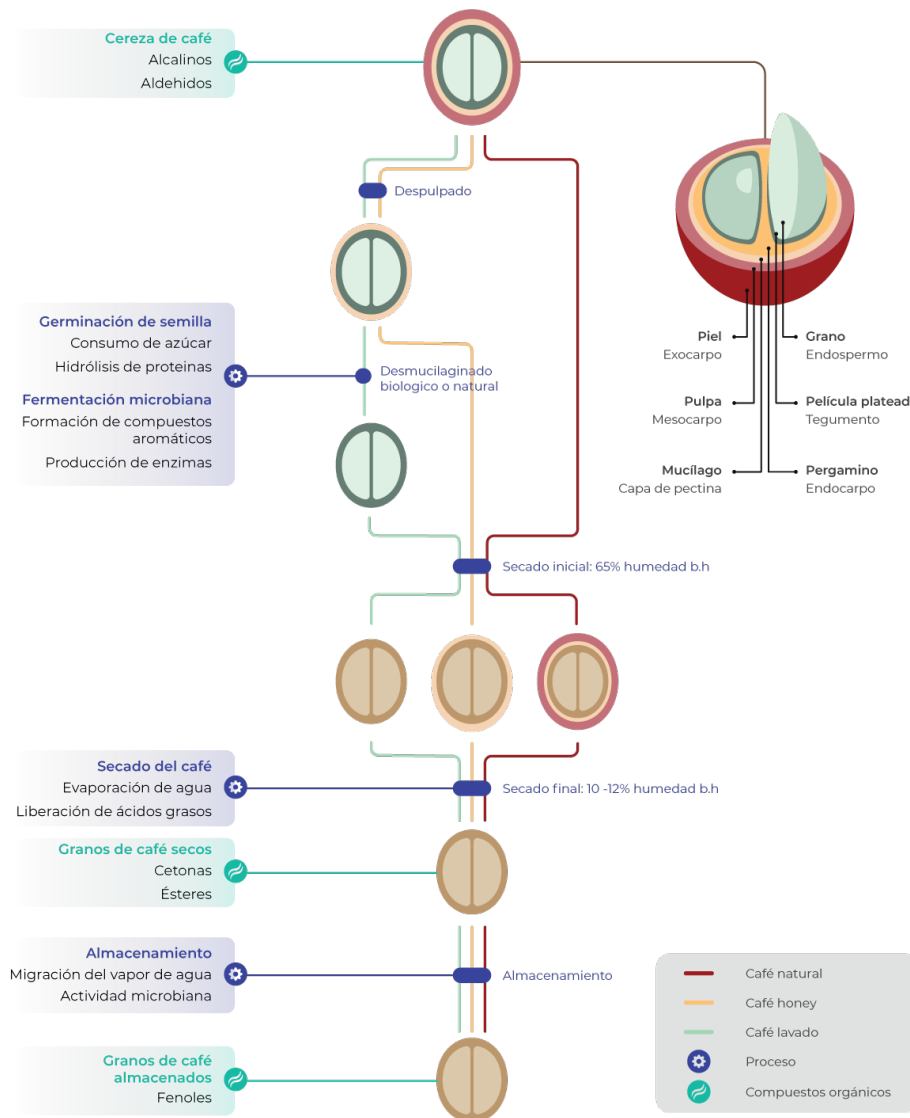
En concordancia con los intereses de las nuevas generaciones, los mercados han optado por preferir y favorecer cafés que posean las siguientes características (CBI, 2022):

- Historia o información que le permita al consumidor saber más acerca de cómo fue procesado, climas, ambiente, etc.
- Soluciones de preparación prácticas y rápidas como cápsulas o saches.
- Alta calidad organoléptica, ya que los consumidores hoy son más conocedores de diferentes preparaciones y pueden identificar propiedades organolépticas.
- Impactos positivos en la salud, ya que se han identificado diferentes beneficios del consumo de café, reduciendo el riesgo de diabetes, enfermedades cardíacas, Parkinson y depresión, (Harvard, 2021).
- Certificaciones que garanticen buenas prácticas en la finca. Sin embargo, esta tendencia se encuentra a la baja.
- Comercio directo entre productor y tostador.
- Blockchain, principalmente en temas relacionados a la trazabilidad y sostenibilidad.
- Sostenibles, con bajo impacto ambiental.

Los cafés procesados se pueden categorizar, esencialmente en tres grupos: lavados, enmielados y naturales, debido a diferencias en los métodos de procesamiento postcosecha. El café lavado es despulpado, fermentado y lavado, de aquí el nombre, para eliminar la capa viscosa que cubre la semilla conocida como mucílago, compuesta de azúcares, lípidos, proteínas y otros (Puerta-Quintero & Rios-Arias, 2011); finalmente es llevado a secado. Los cafés enmielados luego de ser fermentados son llevados directamente al área de secado. Estos cafés se caracterizan por contar con el mucílago semejante a la miel que se torna viscoso y de diferentes colores, dependiendo de la fermentación y las condiciones de secado (TrianonCoffee, 2019). Finalmente están los cafés naturales, que son obtenidos con el método de procesamiento más antiguo originado en Yemen, país con baja precipitación y limitantes de agua, que jugó un rol importante en la expansión y comercio del café alrededor del siglo XIV (SweetMarias, 2015) (PerfectDailyGrind, 2019). En este método de procesamiento, la cereza puede ser fermentada o no y posteriormente secada. El procesamiento de cafés

naturales es considerado el más complejo de controlar y ejecutar correctamente por la alta actividad metabólica que se presenta en la cereza, siendo altamente influenciada por la temperatura y humedad relativa del ambiente (Clayton, 2022). Por estas condiciones los cafés naturales tienen un menor impacto ambiental que el resto de los cafés, Figura 1-3.

Figura 1-3: Estructura de la cereza de café y su transformación en poscosecha, de acuerdo con el método de procesamiento.



Nota: Adaptado de *Exploring the impacts of postharvest processing on the aroma formation of coffee beans – A review* (de Melo Pereira, et al., 2019).

Brasil, país que en el periodo 2018/2019 generó alrededor del 37% de la producción mundial (ICO, 2020a), tradicionalmente se ha enfocado en el mercado de grandes volúmenes; ha venido experimentando un cambio de comportamiento y ha estado introduciéndose en el mercado de cafés especiales. La mayor cantidad del café producido es natural, cuyo proceso de beneficio es por vía seca, debido a que se realiza sin el uso de agua y porque se cuenta con condiciones idóneas de temperatura y humedad relativa necesarias para tal proceso (CoffeeResearch, 2006), lo cual ha hecho que los naturales de Brasil tengan un valor de cotización base diferente al resto de los cafés (ICO, 2020a).

Por estas razones, las pocas investigaciones que se encuentran respecto a la producción de cafés naturales son realizadas en Brasil. Se puede citar el análisis del efecto de los procesos postcosecha en la generación de compuestos volátiles, precursores de sabor y olor (de Melo Pereira et al., 2019).

Otros estudios se han enfocado en la influencia del secado de café sobre el aroma y otras propiedades organolépticas y la influencia de estos procesos sobre la microbiota del producto (De Bruyn et al., 2016). Sin embargo, no se encuentran artículos científicos que relacionen las variables asociadas a la postcosecha con la calidad de los cafés naturales, que puedan influenciar la toma de decisiones por parte de los productores.

En Colombia, Cenicafé es uno de los centros de investigación de café más importante del mundo, el cual se encarga de realizar investigación práctica que:

- Es transferida a los productores para el manejo eficiente de la finca.
- Permite desarrollar herramientas y equipos para la optimización de los procesos en finca.
- Permite entender los procesos de la etapa de finca.
- Desarrolle variedades híbridas de café adaptadas a las diferentes condiciones del país.
- Permite entender e implementar el manejo agronómico eficiente en finca.

Sin embargo, dado que Colombia se ha enfocado y es reconocido mundialmente por los cafés suaves lavados, de perfiles característicos y estándar, que al igual que Brasil tiene su propio precio de base de cotización diferente al del resto de lavados del mundo (ICO, 2020a), la investigación principalmente liderada por Cenicafé se ha especializado en establecer mejores prácticas productivas para este tipo de cafés.

En Colombia, los precios de comercialización históricos del café y el mercado han hecho que los productores y compañías de procesamiento busquen mercados alternativos y una conexión directa con clientes que requieren perfiles exóticos e interesantes, lo cual abre la oportunidad de cambiar las estrategias de procesamiento tradicionales.

Delagua, compañía que compra y procesa café natural en la Sierra Nevada de Santa Marta, ha logrado crear relaciones con pequeños productores, de forma que los cafeteros que no cuentan con infraestructura de procesamiento, o son afectados por un mercado con bajos precios, puedan comercializar la cereza a un alto valor por encima del mercado tradicional de café pergamino (Delagua Coffee Paradise, 2023). Posteriormente, esta empresa procesa el producto de acuerdo con protocolos internos. Debido a esto se han obtenido resultados interesantes que le permiten vender el café a un mayor valor en un mercado especializado, lo cual posibilita incrementar el pago a los productores por el café cereza.

Sin embargo, no existe una comprensión, basada en pruebas científicas y documentadas, de la influencia y relevancia de las variables poscosecha sobre la calidad final del producto (perfil sensorial, gustativo, notas, entre otros), procedente de las variedades de café y condiciones agroclimáticas propias de estas zonas de producción. Esto dificulta el mejoramiento de los protocolos y de la calidad del producto, no permite incrementar el precio de venta, así como el precio pagado a los productores por el café cereza.

Así mismo, a partir de la práctica profesional se ha identificado el impacto que genera esta volatilidad de bajos precios en los productores, sin acceso a metodologías o prácticas concisas de fácil adopción que les permita incursionar en mercados de calidad con la expectativa de poder acceder a mejores precios de comercialización de los cafés.

1.2 Justificación

La industria del café es uno de los principales motores económicos de muchos países y es de vital importancia para la supervivencia de aproximadamente 25 millones de pequeños productores en todo el mundo, que mayoritariamente se encuentran en vulnerabilidad económica (UNCTAD, 2018). Sin embargo, a pesar de su importancia y capacidad de mercado, los productores de café enfrentan una serie de desafíos, incluyendo la falta de acceso a tecnologías modernas de procesamiento y la falta de información práctica y de fácil

implementación sobre las mejores prácticas agrícolas que les permita mejorar la calidad del café producido.

Por tanto, se tomó decisión de abordar el desafío que enfrentan las numerosas familias dedicadas a la producción de café a nivel mundial: la carencia de metodologías de procesamiento poscosecha para el café natural, procesado por vía seca, que permitan obtener una bebida de especialidad de forma sostenible. Estas etapas específicas han sido identificadas, a través de la experiencia práctica, como responsables de aproximadamente el 67% de los defectos que afectan la calidad del café.

Esta situación reviste una gran importancia debido a diversos factores. En primer lugar, afecta la principal fuente de ingresos de cientos de familias productoras que actualmente colaboran con Delagua Coffee Paradise, una compañía cafetera ubicada en el municipio de Santa Marta, departamento del Magdalena, Colombia. Además, esta situación también impacta a la propia organización, que trabaja en estrecha colaboración con estos productores y genera empleos tanto directos como indirectos en diferentes etapas de la cadena de comercialización del café.

Por otro lado, abordar esta problemática permite hacer frente a la contaminación de fuentes de agua y suelo causada por los subproductos derivados del proceso de beneficio del café lavado. Esta es una preocupación relevante que requiere una solución sostenible y eficiente.

El objetivo de esta investigación fue desarrollar una metodología de procesamiento de cafés naturales de alta calidad, procesado por vía seca. Para lograrlo, se estudió el impacto de variables relacionadas con los procesos poscosecha de fermentación, secado y almacenamiento. El propósito de esta investigación es proporcionar herramientas tecnológicas a los productores interesados en procesar estos cafés para mercados de alto valor comercial, lo cual contribuirá a alcanzar los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) relacionados con la erradicación de la pobreza (ODS 1), la educación de calidad (ODS 4) y el trabajo decente y crecimiento económico (ODS 8).

Además, los resultados de esta investigación tienen el potencial de mejorar la comprensión de los procesos de beneficio del café, lo cual permitirá tomar decisiones informadas para mejorar los procesos llevados a cabo por la organización. Esto, a su vez, beneficiará a más familias productoras de café, contribuyendo a los ODS relacionados con el trabajo decente y crecimiento económico (ODS 8), la industria, innovación e infraestructura (ODS 9) y las ciudades y comunidades sostenibles (ODS 11).

Asimismo, el conocimiento adquirido sobre la producción de café natural permitirá aumentar el volumen de procesamiento, reduciendo así el consumo de agua en los procesos poscosecha y disminuyendo la contaminación ambiental. Esto contribuirá a los ODS relacionados con el agua limpia y saneamiento (ODS 6), la acción por el clima (ODS 13) y la vida de ecosistemas terrestres (ODS 15).

En resumen, el desarrollo de esta investigación y los resultados obtenidos proporcionarán a los productores de café metodologías claras, de fácil implementación y ambientalmente sostenibles de producción de cafés naturales de alta calidad, así como mejorar la relación beneficio-precio de las prácticas poscosecha y potencialmente aumentar la utilidad y por ende, los ingresos de la actividad cafetera, a partir del mercado potencial al que se tendría acceso por las mejores prácticas y sostenibilidad. Esto tendría un impacto significativo en la economía de las familias productoras, ayudando así a la sostenibilidad de la industria cafetera. A su vez, permitirá a la organización “Del Agua Coffee Paradise” conocer mejor los cafés producidos y de esta manera mejorar su calidad, incrementar el precio de compra y aumentar la base de productores partícipes de esta iniciativa como proveedores.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo General

Desarrollar una metodología de procesamiento de cafés naturales de alta calidad procesados por vía seca, con el potencial de ser implementada por el pequeño, mediano y gran productor, a partir del estudio del impacto de variables asociadas a los procesos poscosecha de fermentación, secado y almacenamiento

1.3.2 Objetivos Específicos

- Identificar el efecto de variables asociadas a la fermentación en la calidad de cafés Arábicos procesados por vía seca (cafés naturales), provenientes de la Sierra Nevada de Santa Marta.
- Identificar el efecto de variables asociadas al secado en la calidad de cafés Arábicos procesados por vía seca (cafés naturales), provenientes de la Sierra Nevada de Santa Marta.

- Identificar el efecto de variables asociadas al almacenamiento en la calidad de cafés Arábicos procesados por vía seca (cafés naturales), provenientes de la Sierra Nevada de Santa Marta.

1.4 Hipótesis de investigación

Las metodologías poscosecha de procesamiento de café natural asociadas a fermentación, secado y almacenamiento impactan en la calidad final de la bebida y la posibilidad de generar un café con una calificación superior a 84 puntos según la metodología SCA.

2. Marco teórico

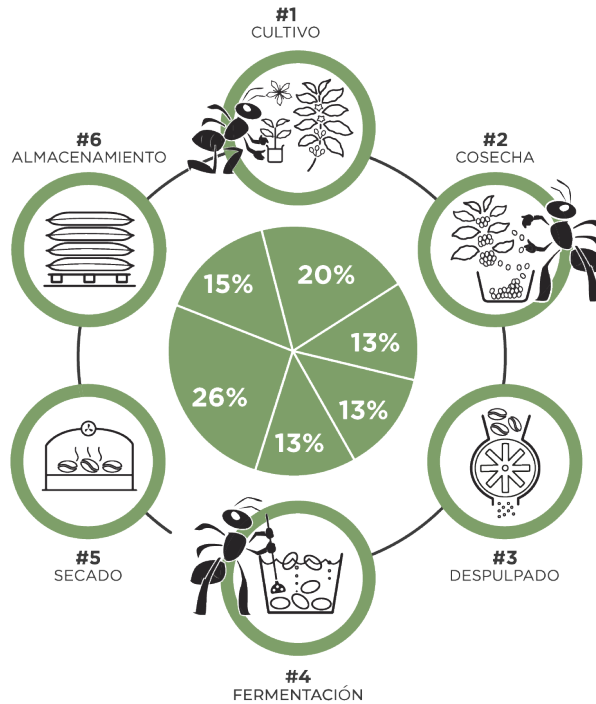
La calidad en café se relaciona con aquellas cualidades físicas y sensoriales propias del grano, asociadas a los procesos de producción en finca u origen, la genética de la semilla y las condiciones agroclimáticas de la finca; la interrelación de estos tres factores conlleva a que los precursores de aroma y sabor expresen durante la tostión un conjunto de sabores y aromas complejos y de gran atractivo sensorial (Peñuela et al., 2013).

El desarrollo tecnológico e investigación es variable en las principales etapas, necesarias para producir una taza de café. Dentro de estas etapas se encuentran (Puerta Quintero, 2015):

- Cultivo
- Recolección
- Despulpado
- Fermentación
- Lavado
- Secado
- Almacenamiento
- Tostión
- Preparación

La selección de las etapas a evaluar se justifica a partir de análisis que han determinado los procesos con mayor potencial de degradar la calidad de la bebida, en los cuales se identifica que aproximadamente el 74% de los defectos encontrados en taza se originan en las etapas de cultivo, fermentación, secado y almacenamiento, siendo el análisis sensorial indispensable para determinar la calidad del café producido y por ende la eficacia de los procesos productivos realizados, Figura 2-1.

Figura 2-1: Mapa de riesgos de la calidad del café. Adaptado de: Innovakit SAS BIC; Mapa de riesgos (<https://www.innovakit.com>)



Nota: La figura ilustra el porcentaje de riesgo de deterioro de calidad del café en las etapas principales de su producción, siendo el riesgo de deterioro un 20% durante la etapa de cultivo y un 26% durante la etapa de secado. Adaptado de: Innovakit SAS BIC; Mapa de riesgos (<https://www.innovakit.com>)

2.1 Cultivo

La etapa de cultivo es clave en la producción de café, ya que es aquí donde la cereza se forma y desarrolla, cuyo potencial depende de tres factores (Peñuela et al., 2013):

- Factores Genéticos, referentes a las diferentes variedades de cafés que se cultivan en el territorio y como estas tienen diferentes potenciales de generación de aromas y sabores.

- Factores de manejo, que comprenden el manejo agronómico, la nutrición, las competencias, la densidad de siembra y el manejo de plagas y enfermedades.
- Factores ambientales, tales como el suelo, clima y las interacciones entre suelo, clima y planta, así como la disponibilidad de agua y los factores biológicos. Son también importantes, el brillo solar, la temperatura, la humedad relativa, la velocidad de viento y la precipitación en la formación y desarrollo de la semilla.

La altura sobre el nivel del mar de los lotes de café influye en la composición química y microbiana, así como en los perfiles sensoriales de los cafés producidos. Esto es más relevante en la producción de cafés naturales, dado que a alturas superiores a 1400 msnm se obtienen mejores resultados organolépticos con los mismos procesos de beneficio, mientras que para cafés lavados se obtienen resultados interesantes desde alturas superiores a los 800 msnm (Machado Martins et al., 2020). Así mismo, los diferentes microorganismos (bacterias, levaduras y hongos) presentes durante la fermentación y demás procesos postcosecha, provienen de la cereza y se ven fuertemente influenciados por las condiciones agroecológicas en las cuales se desarrollan (Puerta, 2012).

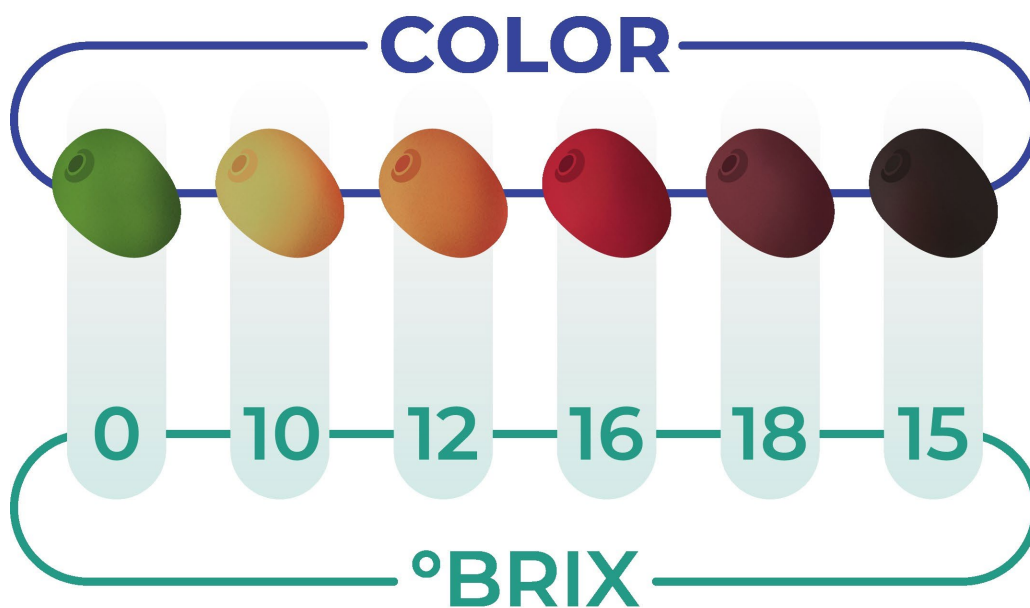
Las condiciones de temperatura y humedad relativa en la cual se desarrolla el cultivo inciden en el crecimiento de las hojas jóvenes y en la aparición de enfermedades fungosas. A su vez, la precipitación incide sobre el crecimiento de la planta, floración, productividad y en las plagas y z.

Worku et al. (2018) evaluaron el efecto del nivel de sombrero y los procesos postcosecha para la producción de cafés naturales y lavados en la concentración de cafeína, ácidos clorogénicos y la calidad de taza. Encontraron que no existe una relación directa entre altitud, sombra, la concentración de cafeína y los ácidos clorogénicos. Sin embargo, mostraron que el porcentaje de sombra influencia la acidez, el contenido de azúcar de la bebida y algunas propiedades físicas del grano. Por otra parte, los cafés naturales presentaron mejores cualidades físicas que los lavados al crecer en carencia de sombra. Sin embargo, en regiones calurosas el contar con un porcentaje de sombra del 30% se mejora el rendimiento de la planta y se optimiza el uso que hace del agua y de las cualidades nutricionales del grano (Liu et al., 2018).

Finalmente, se identifica la recolección como la acción de desprender el fruto de café del árbol, realizado tradicionalmente a mano debido a las altas pendientes presentes en zona cafetera y a la baja adopción tecnológica de los productores, que limita la inserción de nuevas tecnologías; el fruto recogido debe encontrarse en estado de madurez adecuado, para

lo cual se han identificado cinco (5) estados de madurez (verde, pintón, maduro, sobre maduro y seco). El estado ideal es el maduro ya que en este el grano alcanza su peso máximo, aproximadamente 2 gramos, y un contenido de azúcar ideal, necesario para los procesos metabólicos de los microorganismos durante el beneficio (Gomez Posada, 2019). En la Figura 2-2 se observa el estado de madurez fisiológica en contraste con el contenido de azúcar, aquí se identifica que la cereza madura presenta en las variedades Tabi, Castillo, Colombia, entre otras, un color Vinotinto oscuro con mayor contenido de azúcar.

Figura 2-2: Contenido de azúcar de la cereza de café en relación con la madurez fisiológica identificada por el color. Fuente propia.



2.2 Fermentación

La fermentación es un proceso bioquímico natural en el cual diferentes bacterias y levaduras producen enzimas naturales al alimentarse de sustratos orgánicos ricos en azúcares. Estas enzimas al oxidar parcialmente los azúcares y lípidos producen energía, diferentes tipos de alcoholes, ácidos orgánicos, dióxido de carbono y sustancias aromáticas como cetonas, ésteres y aldehídos (Puerta Quintero, 2012; Gomez Posada, 2019). Este proceso se caracteriza por presentar un cambio en el pH, color, densidad, sólidos solubles, temperatura y acidez del sustrato o masa de café. Es importante mencionar que la temperatura juega un

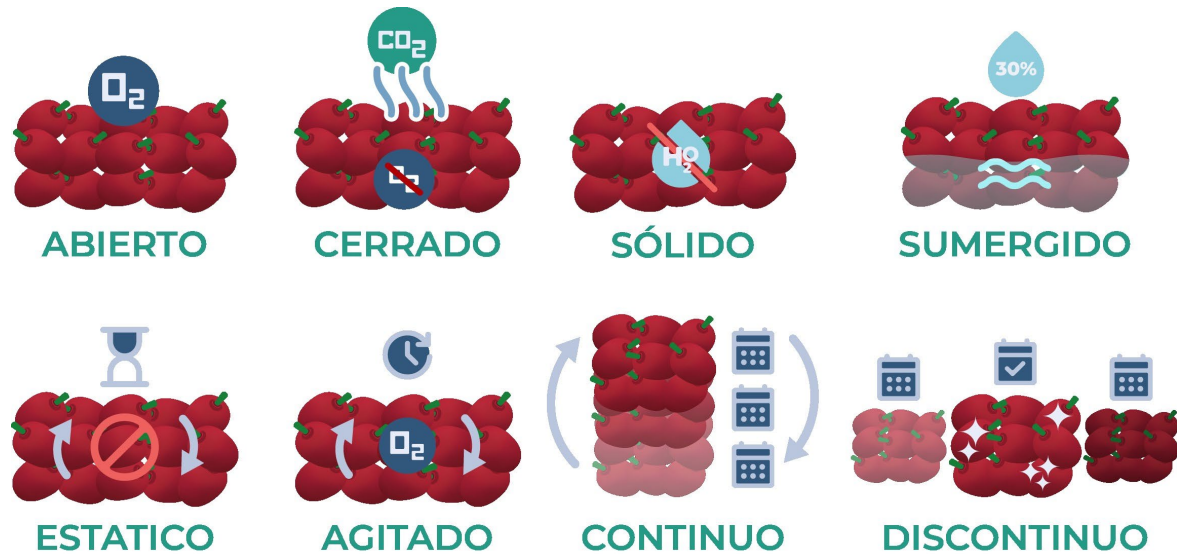
rol fundamental en los cambios fisicoquímicos que experimenta el sustrato (Puerta Quintero, 2012; Gomez Posada, 2019).

Muchos de los factores que inciden sobre la fermentación dependen de la calidad del sustrato (el cual puede ser cereza o mucílago de café), la madurez, la uniformidad y el estado de sanidad de este (que a su vez dependen de las condiciones agroecológicas en las cuales se formó el sustrato), de las condiciones climáticas externas y la limpieza de los equipos, herramientas e instalaciones de procesamiento (Puerta, 2012).

Otro factor que incide en el proceso metabólico de los microorganismos es el sistema de fermentación en el cual se desarrollan. Según Puerta Quintero & Echeverry Molina (2015), existen ocho (8) sistemas a saber, Figura 2-3:

- **Abierto**, la masa de café o sustrato se encuentra en presencia de oxígeno, lo cual favorece la fermentación láctica y la alcohólica.
- **Cerrados**, el sustrato se encuentra en ausencia de oxígeno, hay salida natural del CO₂ y se favorece la fermentación mixta.
- **Sólido**, el sustrato se fermenta en seco con ausencia de agua.
- **Sumergido**, se cuenta con la presencia de agua en relación con la masa de café a fermentar. Cenicafé recomienda utilizar una proporción del 30% de agua.
- **Estático**, el sustrato no se mueve hasta que es momento de lavar o secar.
- **Agitado**, el sustrato es mezclado periódicamente para garantizar la oxigenación de este y el desarrollo de ciertos microorganismos.
- **Continuo**, los lotes de diferentes días son mezclados, procesados y retirados continuamente.
- **Discontinuo**, cada lote de café es procesado separadamente, lo cual ocurre principalmente por los pases de cosecha y la especificidad del proceso.

Figura 2-3: Sistemas de fermentación de café.



Nota: Representación de los diferentes sistemas de fermentación de café identificado en la literatura.

Adaptado de (Puerta Quintero & Echeverry Molina, 2015).

En estudios desarrollados por Puerta-Quintero & Rios-Arias (2011) se determinó que la temperatura del sustrato (relacionada con el material del tanque donde se realiza el proceso y las condiciones climáticas externas) incide en la velocidad de degradación del mucílago y por ende en la acidez de este. Así mismo, la temperatura influye en la proporción y tipo de fragancias y notas del producto (Puerta Quintero & Echeverry Molina, 2015). Es decir, que a menor temperatura se puede alargar el tiempo de fermentación y desarrollar notas y atributos más complejos y llamativos.

Las levaduras juegan un papel importante en la fermentación, por lo que se ha adoptado el uso de levaduras externas durante el proceso para generar nuevas rutas metabólicas y perfiles exóticos. El uso de levaduras incrementa levemente la calidad de los cafés lavados. Así mismo, se observó un deterioro de los atributos en fermentaciones mayores a 24 horas. Se determinó una función con $R^2 = 0.9954$ que expresa la relación inversamente proporcional entre el Balance y el puntaje del catador (atributos del café) y el tiempo de fermentación (Louzada Pereira et al., 2019).

La región de Yunnan en China ha ganado notoriedad en los últimos años por los perfiles característicos originados en microlotes, tales como té negro, chocolates, especias, cerezas

secas y almendras (Jagelman, 2019). No es de extrañarse que en esta región se estén realizando diversas investigaciones que buscan explorar los factores que inciden en la producción de cafés de alta calidad. Zhang et al. (2019) evaluaron la incidencia de diferentes métodos de procesamiento y tiempos de fermentación en las dinámicas de los microorganismos y la calidad del producto. Encontraron que las características del agua que se utiliza en el beneficio y el tiempo de fermentación afectan enormemente a los tipos y cantidades de microorganismos presentes en el sustrato. Así mismo, el tiempo de fermentación es la variable con mayor impacto en la calidad final de la bebida (de Melo Pereira et al., 2019). A su vez se comprobó que un proceso de remojo luego del lavado ayuda a estandarizar la taza y mejora su calidad. Sin embargo, el consumo de agua es excesivo y requiere de mayor mano de obra para realizarse. Se identificó que el mayor cambio de pH se evidencia a las 36 h y que la mayor presencia de bacterias lácticas se evidencia luego de 24 h. Finalmente, se observa que los parámetros de procesamiento medidos y los resultados obtenidos dependen en gran medida de la variedad de café estudiada y de las condiciones geográficas donde estas se desarrollan.

La práctica de inoculación de microorganismos, tales como bacterias de ácido láctico, levaduras, entre otros, ha tomado más fuerza en productores que buscan generar nuevas rutas metabólicas para sus cafés. Tradicionalmente estos microorganismos se desarrollan naturalmente durante los procesos de oxidación o fermentación de acuerdo con las condiciones de pH, temperatura y carga microbiana inicial (Puerta, 2012). Sin embargo, al implementar estas inoculaciones se busca estandarizar el proceso de generación de los perfiles de café. Se han realizado múltiples estudios, como los de Martínez Jimenez et al. (2022), quienes encontraron que la inoculación de levaduras en diferentes procesos de beneficio de café (natural y lavado) efectivamente estimulan la generación de diferentes compuestos volátiles, los cuales significan nuevos atributos y perfiles. Así mismo, los autores comprueban que el beneficio del café en biorreactores cerrados estimula la producción de bacterias del ácido láctico.

de Jesús Cassimiro et al. (2023), validaron el impacto en calidad de la inoculación de seis (6) tipos de microorganismos, encontrando que la inoculación de levaduras y bacterias del ácido láctico tienen un impacto positivo en la calidad final de la bebida y que estos significan rutas metabólicas diferentes, ocasionando atributos y perfiles, por lo cual los autores consideran que la inoculación de bacterias en procesos de fermentación de café (carencia de oxígeno) impactan positivamente en la calidad de la bebida.

2.3 Secado

Los granos de café se deterioran rápidamente después que se supera el proceso de fermentación y lavado, debido principalmente al alto contenido de humedad, el cual varía entre 52,7% y 53,5% bh (Peñuela et al., 2013); esta humedad debe ser reducida mediante procesos de secado que llevan el producto hasta un contenido de humedad interna con valores comercialmente aceptables (entre 10% - 12% g agua/g materia seca), logrando disminuir la actividad de agua, la cual hace referencia al agua disponible que tiene un alimento que afecta su conservación o deterioro, dificultando el crecimiento de microorganismos, tales como mohos y levaduras (Puerta, 2006).

Existen dos sistemas de secado en Colombia, el secado al sol y el secado mecánico. En el primero el grano se expone a las condiciones ambientales para que las diferencias de humedad del aire y la temperatura aceleren el proceso de deshidratación; este es el más comúnmente usado, en especial por los pequeños y medianos productores ya que es más económico. En el secado mecánico se hace uso de una fuente de calor, un sistema de ventilación y una recámara para el grano, de manera tal que mediante ductos se conforma un sistema de flujo de aire que atraviesa las capas de café y acelera el proceso de secado (Peñuela, et al., 2013).

El secado solar es recomendado para fincas con producciones anuales menores a 6250 kg de café pergamino seco, usualmente fincas familiares pequeñas, que no pueden invertir en un silo de secado o tienen buena radiación solar durante el periodo necesario (Peñuela, et al., 2013). En la categoría de secado solar existen diferentes variaciones tales como, patios de secado en concreto, mesas, carros de madera, secador parabólico tipo Cenicafé, techos corredizos, entre otros. En la Figura 2-4 se muestra una representación de una cama africana modificada, la cual es utilizada para el proceso de secado de café natural con la implementación de técnicas de sombrío.

Figura 2-4: Café con proceso natural secado en cama africana modificada.



Nota: Café natural fermentado siendo secado en camas solares bajo referencia de sombrío S52 sin cobertura plástica. Fuente propia.

Cada uno de los métodos de secado solar mencionados anteriormente comparte un común denominador, la energía empleada en la extracción de agua del grano, la cual proviene de la radiación solar incidente y se ve afectada por condiciones atmosféricas, tales como la humedad relativa, la presión atmosférica y el flujo de aire (Burmester & Eggers, 2010). Otra variable importante, no climática, que cumple un rol fundamental durante el proceso de secado, es el espesor de la capa de grano y la cantidad de veces que se revuelve el café al día (Oliveros et al., 2013).

Como se mencionó anteriormente, el secado de granos busca reducir el contenido de agua presente a un nivel establecido que garantice la conservación de las propiedades del producto. De realizar este proceso en condiciones no favorables para la conservación del embrión, se presenta el rompimiento de tejidos, destrucción celular y la reducción de la calidad debido a la rápida extracción de agua de las células vivas dentro del grano (Cadena, 2014).

do Livramento et al. (2017) estudiaron el efecto del secado mecánico y secado solar en las proteínas y precursores de aromas presentes en el grano verde previo a la tosti3n. Se encontr3 que el secado mecánico a una temperatura igual o superior a 60°C destruye el embri3n y reduce la cantidad y tipo de precursores de aroma y sabor en el grano. As3 mismo, se determin3 una tasa de p3rdida de agua para secado de caf3s especiales (que garantice la integridad de la pared celular) de 13 gH₂O kg⁻¹h⁻¹, la cual se logra a temperaturas entre 35°C – 37°C con flujo de aire bajo.

Burmester & Eggers (2010) mencionan que para optimizar el proceso de secado se pueden emplear altas temperaturas al inicio del proceso y bajas temperaturas hacia el final. Sin embargo, esto aplica para secado mecánico y no evaluaron las propiedades organol3pticas del producto durante el estudio.

Kulapichitr et al. (2019) exploraron el efecto de diferentes m3todos de secado en los compuestos aromáticos y el aroma (atributo del caf3). Se encontr3 que el secado mecánico empleado a temperaturas cercanas a 50°C sirve como una alternativa al secado solar, con tiempo reducido.

2.4 Almacenamiento

Al finalizar el proceso de secado, es necesario almacenar el grano en condiciones 3ptimas que permitan mantener su humedad interna y minimicen el deterioro de la calidad. Es importante entender que el caf3 al ser un grano cuenta con la facultad de ceder o ganar humedad del medio (material higrosc3pico), por lo cual es muy usual el fen3meno de re-humedecimiento del grano una vez ha llegado al punto 3ptimo de secado, ocurriendo tanto en secado como en el almacenamiento (Oliveros et al., 2013).

El almacenamiento de productos agropecuarios tiene como objeto la conservaci3n de la calidad y cantidad de los productos, as3 como regular el mercado. Dado que en esta etapa el control de inventarios juega un rol fundamental, este proceso se realiza principalmente a esperas de una coordinaci3n log3stica o demanda del mercado para transportar al sitio o punto final de consumo o utilizaci3n (Puerta Quintero, 2015).

El almacenamiento es un proceso de gran importancia, debido a que este periodo en el cual el grano es almacenado a esperas de ser comercializado puede durar entre 1 – 16 semanas,

dependiendo de la necesidad de dinero para cubrir los costos del proceso y del fluctuante precio del café.

Estudios tales como el de Smrke et al. (2022) han evaluado el impacto de cinco (5) diferentes tipos de empaques utilizados para almacenar café en la frescura del grano, medido a partir de la cromatografía de gases y espectrometría de masas, niveles de O₂ y CO₂. En paralelo, a partir de la práctica se ha logrado identificar la importancia de las condiciones climáticas del almacenamiento, específicamente, temperatura y humedad relativa, ya que estas dos variables inhiben o favorecen el desarrollo de microorganismos durante el almacenamiento. En este proceso ciertos atributos pueden verse favorecidos mejorando la calidad del producto, o pueden disminuir respecto a los primeros análisis de calidad.

El concepto de almacenamiento va estrechamente relacionado con el de Vida de Anaquel, ya que este último finalmente condiciona el tiempo de almacenamiento máximo que un producto puede tener antes de no ser apto para consumo o perder calidad y por ende parte de su valor comercial (Puerta Quintero, 2015).

En café se han determinado buenas prácticas mínimas para que los productores puedan realizar un proceso de almacenamiento que no acelere el deterioro fisicoquímico del café previo a su comercialización, las cuales contemplan (Perfect Daily Grind, 2021):

- Evitar el contacto directo del café con el suelo, separarlo preferiblemente con estibas.
- Separar entre 30 y 50 cm los arrumes de café de las paredes.
- Separar el área de almacenamiento del café de otras áreas, especialmente de las habitaciones, cocina, bodegas de agroquímicos o combustibles.
- Almacenamiento con un rango de humedad en base húmeda de entre 10 – 12%.
- Evitar contacto directo del café con la luz solar.
- Mantener limpia el área de almacenamiento.

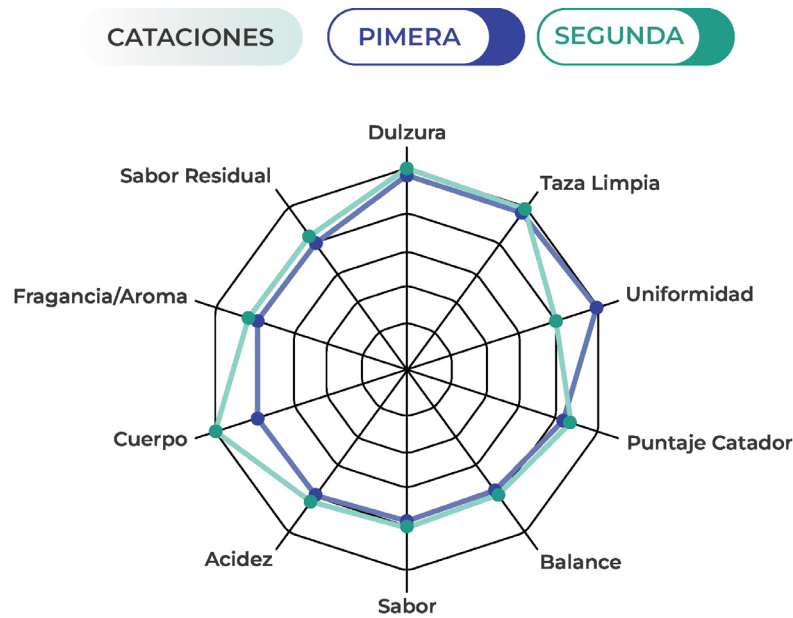
Así mismo, en procesos más especializados e industriales se ha identificado que es necesario controlar la temperatura y humedad relativa del área de almacenamiento, siendo la temperatura ideal de entre 8 y 15°C y humedad relativa entre 65 y 70% (Puerta Quintero, 2015), rangos difícilmente alcanzables en la práctica sin un proceso industrial de control climático.

Para solventar parte de estos retos, en el mercado se encuentran diferentes soluciones de empaque que complementan, no reemplazan, el costal de fique. Estas soluciones de

almacenamiento incluyen el uso de bolsas herméticas de diferentes tamaños y conceptos que son utilizadas tanto en café como en otros granos. Estas soluciones apoyan la conservación de la calidad por mayor tiempo, protegen el producto de insectos y microorganismos, así como de gases y otras influencias externas (Grainpro, 2022).

En la práctica se presenta un fenómeno coloquialmente llamado tiempo de estabilización o de reposo, en el cual el café mantiene sus atributos finales cercanos a lo que recibirá el cliente final. En prácticas realizadas en procesos de producción de cafés naturales, se evidencia que en promedio en alrededor de dos (2) meses de almacenado el café en bolsas plásticas GrainPro (Smrke et al., 2022), el cuerpo de la bebida aumenta considerablemente, seguido por mejoras leves en la acidez, fragancia y sabor residual con una reducción considerable en la uniformidad; comportamiento evidenciado en la Figura 2-5. Sin embargo, es importante mencionar que los resultados varían dependiendo del café y el proceso al que fue sometido, ya que dentro de la misma experiencia cafés con mayor tiempo de fermentación demostraron ser más inestables, perdiendo calidad y alcanzando reposo.

Figura 2-5: Estabilización del café natural.



Nota: Se presentan los 10 atributos evaluados en el análisis de calidad del café, junto con su respectiva variación en dos procesos de catación realizados con una diferencia de dos (2) meses. Elaboración propia a partir de datos de experiencias productivas anteriores.

2.5 Análisis de calidad

El análisis de la calidad del café, el cual se refiere al conjunto de propiedades organolépticas producto de la interacción entre la genética, el agroclima y los procesos, es realizado actualmente a través de la catación. A partir de esta, se establece el precio de los cafés especiales en el mundo y es una práctica que involucra confianza entre el vendedor y comprador. Para realizar la catación se emplea una metodología bien documentada y estructurada, siendo la más usada a nivel mundial la metodología SCA, desarrollada por la asociación de cafés especiales con sede en Estados Unidos de América. Esta metodología busca estandarizar el proceso definiendo los tipos de defectos y su influencia negativa a través de un sistema de puntos, para lo cual se realiza una evaluación cuantitativa y cualitativa de diez (10) atributos definidos (fragancia, aroma, acidez, cuerpo, sabor, dulzura, taza limpia, balance, sabor residual y puntaje de catador), con los cuales se determina la calidad de las muestras (CoffeeChemistry, 2017).

A pesar de esto, la práctica de catación realizada por los catadores (término para llamar a los profesionales que realizan las cataciones) sigue siendo subjetiva y el gusto personal e intereses particulares juegan un papel importante durante la evaluación del café. Múltiples estudios que realizan análisis sensorial de los procesos optan por incrementar el número de catadores que evalúan las muestras y tratan de que estos catadores sean Q graders (Louzada Pereira et al., 2019; Zhang et al., 2019). Al profesionalizarse, se garantiza que el catador ha pasado unas pruebas rigurosas y es capaz de identificar con gran precisión las propiedades del café (CQI, 2020). Sin embargo, en la práctica comercial los procesos de perfilación no son realizados por equipos o paneles de catadores debido a la practicidad de la operación y costos asociados a las mismas.

Diferentes implementos necesarios para construir dispositivos electrónicos de gran precisión que puedan simular a la lengua y nariz humana han evolucionado entre 1906 y 1998, pasando por el diseño y construcción de electrodos de pH, la teoría de intercambio de iones, biosensores, desarrollo de la microelectrónica y de sensores hasta llegar a los sistemas

compuestos por matrices de múltiples sensores. Al realizar ensayos se logró evidenciar que a través del uso de estos dispositivos se lograba realizar análisis cuantitativos muy complejos de soluciones, permitiendo distinguir diferencias entre líquidos semejantes. En esa época, la lengua electrónica era posible hacer análisis cualitativos y analizar aguas contaminadas, bebidas y líquidos biológicos (Vlasov & Legin, 1998).

Latha & Lakshmi (2012) recomiendan su uso para probar nuevos medicamentos, sustancias que signifiquen un peligro potencial para los humanos, así como reducir la subjetividad de los panelistas durante pruebas de alimentos, originando mejores resultados.

Várvölgyi et al. (2015) evaluaron diferentes muestras de café a través de la lengua electrónica y la cromatografía de gases. Se encontró que a través del uso de la cromatografía no se logró identificar las diferencias de fragancia y sabor entre las diferentes muestras ya que todas contenían los mismos precursores. Sin embargo, la lengua electrónica logró diferenciar el origen del café y el método de preparación. Se concluye que estos dispositivos complementarán la labor de los catadores, sin reemplazarlos completamente.

La lengua y nariz electrónica han sido empleadas para evaluar la incidencia de los tipos de filtro y la temperatura del agua utilizados para la preparación de cafés espresso, en los atributos y perfiles aromáticos de estos. Se encontró que, si bien los filtros no influyen en el perfil aromático y los atributos de la bebida, si afectan el pH, los sólidos totales y el nivel de cafeína. Así mismo, durante estos estudios se logró medir con gran precisión el aroma, dulzura, sabor, astringencia, sabor residual y acidez, lo cual demuestra el potencial de estos equipos para realizar un análisis de calidad completo (Severini et al., 2016; Buratti et al., 2017).

Rodríguez et al. (2010) obtuvieron resultados positivos al evaluar muestras de café tostado haciendo uso de una nariz electrónica. Lograron categorizar e identificar defectos del café como grano negro, decolorado, vinagres de cafés excelsos con requerimientos para mercados específicos.

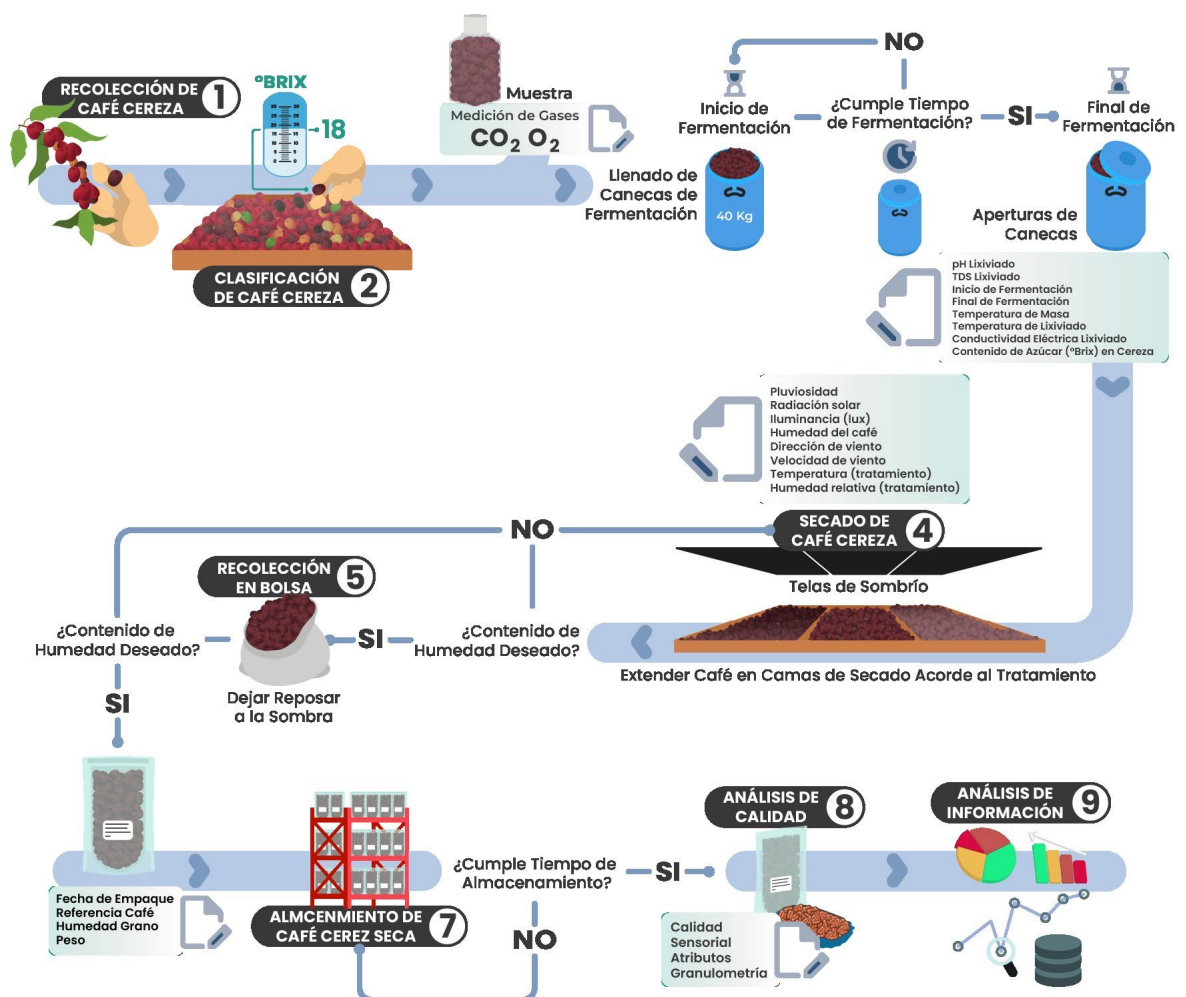
Wenjiang et al. (2019) encontraron que el secado juega un rol fundamental en pH, acidez total, sólidos totales y sólidos solubles totales de la bebida. Así mismo, a través del uso de la lengua y nariz electrónica se lograron identificar características que fueron atribuidas a los métodos de secado, lo cual garantiza que a través del uso de estos dispositivos electrónicos se pueda identificar las condiciones de procesamiento del café y determinar, objetivamente, la calidad de este.

Sin embargo, estas metodologías no son comercialmente aplicadas en la industria, debido a la practicidad, eficiencia de los procesos y costos aún elevados de estas tecnologías. En análisis de calidad recientemente se ha venido adoptando por la industria el uso de cámaras UV para identificación de defectos y la medición de actividad del agua, complementaria a la humedad del grano (Pate, 2019).

3. Materiales y métodos

El resumen de la metodología empleada para lograr los objetivos de la presente investigación se presenta en la Figura 3-1.

Figura 3-1: Metodología de investigación. Fuente propia.



3.1 Zona de estudio

El estudio se realizó en alianza con la compañía cafetera que compra y procesa café de alto valor comercial, Delagua Coffee Paradise, ubicada en la ciudad de Santa Marta, departamento de Magdalena, Colombia, la cual cuenta con el área de secado solar de cafés naturales más grande de Colombia, alrededor de 2000 m², ubicado en las coordenadas 11.106637N, -74.213529W y a una altitud aproximada de 40 msnm, con precipitaciones anuales de alrededor de 500 mm, temperatura media de 27°C, temperatura máxima de 34°C, y humedad relativa que oscila entre el 70 y 80% durante el año (IDEAM, 2023), condiciones climáticas relativamente constantes durante el periodo de cosecha (Noviembre – Enero). En la Figura 3-2 se observa un segmento de la central de secado.

Figura 3-2: Central de secado solar de cafés Naturales durante época de cosecha. Fuente Propia



Esta organización ha logrado crear relaciones con 30 familias cafeteras en siete (7) veredas (San Javier, Cerro Azul, Páramo, Cherua, Agua Viva, Palestina y Palmor), ubicadas entre los 1300 y 1800 msnm, en las inmediaciones del Parque Nacional de la Sierra Nevada de Santa Marta (Figura 3-3), las cuales suministran café cereza (*Coffea arabica* L.) para el

procesamiento en la central de secado solar, de variedades principalmente Castillo, Colombia, Tabi y Caturra.

Figura 3-3: Principales puntos de acopio de café. Fuente propia.



3.2 Diseño experimental

Debido al costo del café y necesidades de trabajo durante la cosecha, se decidió emplear un diseño factorial central compuesto rotacional 2^3 , (el cual contempla un componente factorial, axial y central), con el objeto de aumentar la eficiencia de la fase experimental en campo y por tal, reducir al máximo el número de muestras de café necesarias para mantener la significancia estadística de la investigación.

A partir de la consulta de estado del arte y de la experiencia práctica en este campo, se optó por evaluar el efecto de la fermentación, secado y almacenamiento en la calidad sensorial del café, entendiendo que estas actividades poscosecha son realizadas por los productores cafeteros durante la cosecha y pueden ser ajustadas en búsqueda de la calidad.

En este estudio se realizaron 18 experimentos, de los cuales fueron 8 factoriales, 6 axiales y 4 centrales. En esta experiencia las variables independientes fueron el tiempo de fermentación (x_1 entre 72 y 120 horas), la referencia de polisombra utilizada en el secado (x_2 entre 0 y 65%), y tiempo de almacenamiento del grano antes de consumo (x_3 entre 20 y 90 días), Tabla 3-1.

Tabla 3-1: Relación de los tratamientos realizados, variables independientes y codificadas con sus respectivos niveles codificados usados en el diseño factorial central compuesto rotacional. Fuente propia

No. Tratamiento	Variables Codificadas			Variables no Codificadas		
	x_1	x_2	x_3	x_1 Fermentación (horas)	x_2 Referencia de sombrio	x_3 Almacenamiento (días)
1	-1	-1	-1	82	13	34
2	1	-1	-1	110	13	34
3	-1	1	-1	82	52	34
4	1	1	-1	110	52	34
5	-1	-1	1	82	13	76
6	1	-1	1	110	13	76
7	-1	1	1	82	52	76
8	1	1	1	110	52	76
9	-1,68	0	0	72	32.5	55
10	1,68	0	0	120	32.5	55
11	0	-1,68	0	96	0	55
12	0	1,68	0	96	65	55
13	0	0	-1,68	96	32.5	20
14	0	0	1,68	96	32.5	90
15	0	0	0	96	32.5	55
16	0	0	0	96	32.5	55
17	0	0	0	96	32.5	55
18	0	0	0	96	32.5	55

El modelo matemático que describe la relación entre las variables independientes, previamente mostradas, y la variable dependiente de interés del estudio (puntaje total de calidad construido a partir de la suma de los 10 atributos, tales como aroma, fragancia, acidez, balance, etc.), fue calculado a partir de la ecuación polinómica de segundo orden Ecuación 3.1.

$$Y = \beta_0 + \beta_1x_1 + \beta_2x_2 + \beta_3x_3 + \beta_{12}x_1x_2 + \beta_{13}x_1x_3 + \beta_{23}x_2x_3 + \beta_{123}x_1x_2x_3 + \beta_{11}x_1^2 + \beta_{22}x_2^2 + \beta_{33}x_3^2 \tag{3.1}$$

Como se mencionó anteriormente, la variable de respuesta o dependiente, está asociada a calidad, puntaje total en taza (Y); x_1 , x_2 y x_3 representan las variables independientes fermentación, referencia de polisombra utilizada en el secado y almacenamiento, respectivamente; mientras que β_0 es el intercepto del modelo, β_1 , β_2 y β_3 son los coeficientes de regresión de las variables independientes; β_{11} , β_{22} y β_{33} son los coeficientes de regresión cuadrática; β_{12} , β_{13} y β_{23} son los coeficientes de las interacciones y β_{123} es el coeficiente de la interacción triple.

En la Tabla 3-2 se presentan las variables medidas directamente en campo de los diferentes procesos poscosecha.

Tabla 3-2: Resumen de las variables medidas por proceso poscosecha. Fuente propia.

Etapa	Variable	Unidad	Equipo	Periodicidad de medición
Fermentación	Contenido de azúcar	°Brix	Refractómetro ATC	Al finalizar la fermentación
	pH	N/A		
	Temperatura lixiviado	°C	Apera AI311 PH60	
	TDS	ppm		
	Conductividad	mS/cm		
	Temperatura café	°C	Termómetro punzón	
	CO ₂	ppm	Vernier Go Direct® CO2 Gas Sensor	
	O ₂		%	
Vernier LabQuest 3				
Secado	Temperatura	°C	Govee H5074	Cada minuto
	Humedad relativa	%		
	Iluminancia	lux	LiebeWH LX1330B	Diariamente
	Temperatura externa	°C		
	Humedad externa	%		
	Velocidad de viento	km/h	Ambient Weather WS-2000	Cada minuto
	Dirección de viento	°		
	Radiación solar	w/m ²		
	Precipitación	mm		
	Presión	hpa		
Almacenamiento	Contenido de humedad grano	%	Kett450	Diariamente
	Temperatura interna	°C	Ambient Weather WS-2000	Cada minuto
	Humedad relativa interna	%		

3.3 Material de estudio

El café para este estudio fue obtenido a partir de un protocolo básico de calidad, el cual puede ser implementado en finca por cualquier productor, con el objeto de obtener una muestra estandarizada de variedad Castillo proveniente de la misma finca, recolectado manualmente con el objeto de tener una muestra lo más uniforme y madura posible.

El café maduro clasificado fue colocado en canecas plásticas limpias con capacidad de 40 kg, con el objeto de realizar el proceso de fermentación del café cereza. A su vez, se tomó una muestra representativa de café cereza maduro, la cual fue colocada en un recipiente con la misma relación de volumen a la caneca de 40 kg para realizar las mediciones de CO₂ y O₂ gaseosos en los tiempos de fermentación establecidos en el diseño experimental. Para realizar estas mediciones, se emplearon sensores de la marca Vernier los cuales cuentan con escala de medición de 0 – 100000 partes por millón (ppm), precisión de 100 ppm y resolución de 1 ppm para CO₂. Así mismo, el sensor O₂ de cuenta con una escala de medición de 0 – 100%, precisión de 1% y resolución de 0.01%. En ambos recipientes se registró el tiempo, fecha de inicio y finalización para la determinación de las horas de fermentación.

3.4 Fermentación

Al cumplirse las horas de fermentación establecidas, las canecas fueron abiertas y se procedió a realizar la medición de la temperatura de la masa de café con un termómetro análogo de punzón con rango de medición de 0 – 100°C y precisión de 1°C. Así mismo, se tomó una muestra de 10 cerezas por caneca para medir su contenido de azúcar, a partir del uso de un refractómetro de bolsillo marca ATC con escala de 0 – 32° Brix y compensación de temperatura. Posteriormente, se tomó una muestra representativa de los lixiviados producto de la fermentación para la medición de pH, temperatura, TDS y conductividad eléctrica con el Kit portátil de Apera AI311 PH60, el cual cuenta con precisión de 0.01 para pH, 0.1 para temperatura, TDS y conductividad eléctrica.

Posteriormente, se obtuvo la concentración de CO₂ y O₂ en el recipiente de muestra haciendo uso de una solución de la marca vernier, compuesta por el Go Direct® CO₂ y O₂ Gas Sensor, y el hub de registro, gestión e interacción LabQuest 3, la cual cuenta con pantalla táctil, memoria y permite configurar los parámetros de las mediciones.

Finalmente, al cumplir el tiempo de fermentación establecido en el tratamiento, el café fue llevado al área destinada para su secado.

3.5 Secado

El café obtenido del proceso de fermentación fue puesto en las camas asignadas para el secado natural (solar), garantizando una capa delgada de una cereza de alto, con el fin de minimizar el riesgo de afectación de calidad por desarrollo de hongos, muy propio de estos procesos de secado. Así mismo, se revolvió cuatro (4) veces al día haciendo uso de un rastrillo plástico, garantizando la homogeneidad de todo el producto durante el proceso de secado.

El área de secado de 164 m² estaba compuesta por camas de con diseño modificado basado en las marquesinas tipo túnel de Cenicafé y las camas africanas tradicionales. Este diseño es óptimo para la zona de estudio, debido a las bajas precipitaciones y las altas temperaturas, no requiriendo el uso de plástico u otros materiales de cubierta para generación de efecto invernadero. En la Figura 3-4 se observa el área de secado en operación, tanto para el café expuesto directamente al sol (a), como para el que se secó bajo diferentes polisombras (b). Así mismo, se identifica el tipo de camas de secado y su operación bajo condiciones de temporada seca sin precipitación, la cual se define como normal.

Figura 3-4: Área de secado de café. (a) café expuesto al sol directamente. (b) café bajo diferentes polisombras acorde al diseño experimental. Fuente propia.



a



b

Dos (2) termohigrómetros (sensores de temperatura y humedad relativa) con registro de información, precisión de 0.5°C de temperatura, 3% de humedad relativa y bluetooth de referencia Govee H5074 fueron instalados por cada una de las cinco (5) referencias de polisombra. Se midió el efecto de las polisombras sobre la cantidad de luz o energía efectiva sobre las camas, o iluminancia con el LiebeWH LX1330B, el cual cuenta con rango de medición de 0 – 200000 lux. Así mismo, se midió la temperatura (rango de medición de -40 - 65°C, precisión de 1°C y resolución de 0.1°C), humedad relativa (rango de medición del 10 – 99%, precisión de 5% y resolución de 1%), velocidad y dirección de viento, radiación solar (rango de medición de 0 – 300000 lux, precisión del 15% y resolución de 1 lux), presión (rango de medición de 300 – 1100 hPa, precisión de 2 hPa y resolución de 0.03 hPa) y precipitación del área de secado durante toda la cosecha con la estación meteorológica Ambient Weather WS-2000. Finalmente, se realizó un seguimiento al contenido de humedad en base húmeda del café con el medidor de humedad Kett450; al llegar la masa de café a un contenido de humedad del 12% b.h., < 0.67 aw, fue empacado y llevado a reposar previo a su empaque final.

3.6 Almacenamiento

Una vez seco el café, fue dejado en sacos de fique con Bolsa Grainpro por tres (3) días, se verificó la humedad y se volvió a secar de ser necesario. Posteriormente, el café fue empacado en bolsas de 500g con rótulo y almacenado. Las condiciones de temperatura y humedad relativa de la zona de almacenamiento fueron medidas con el termohigrómetro de la estación meteorológica Ambient Weather WS-2000.

3.7 Análisis de calidad

Se seleccionó una muestra representativa de 1.5 kg de café cereza seca por tratamiento para ser trillada y procesada de acuerdo con la metodología SCA (2015), la cual contempla, análisis físico, granulométrico y sensorial. El grano posteriormente fue tostado y dejado reposar por un tiempo mínimo de 8 horas. Pasado este tiempo se realizó el proceso de

catación en el cual un panel de dos (2) catadores, utilizando una relación de 0.055 g de café por ml de agua y tres (3) tazas por muestra (repeticiones), se identificaron los atributos, notas y el perfil de cada una de las muestras.

3.8 Análisis estadístico

El análisis estadístico fue realizado con el programa R versión 4.2.2, el IDE R Studio y los paquetes rsm, readxl, plot3D y DescTools, para implementar el diseño central compuesto rotacional, gestionar archivos de Excel, generar las figuras de las superficies de respuesta y realizar la prueba de Dunnett, respectivamente. Así mismo, se utilizó el lenguaje de programación Python versión 3.10 con las librerías de pandas y Numpy para procesar la información de los sensores, y el programa PowerBi para la realización de figuras. Se realizó un análisis de varianza (ANOVA) y prueba de Fisher (F valor) para determinar con un nivel de significancia del 10% ($p < 0.1$) si alguno de los tratamientos tuvo incidencia sobre la calidad del café, en conjunto con el análisis de comparaciones múltiples para determinar diferencias entre las medias de los tratamientos y el punto central con su grado de diferencia. La significancia de los coeficientes de regresión se determinó a partir del t valor, y la calidad del modelo generado fue analizado a partir del coeficiente de determinación R^2 .

4. Resultados

Debido al contexto de la investigación y el objeto del estudio se presentan a continuación los resultados clasificados, con el objeto de poder realizar un análisis estadístico general del diseño experimental y más específico de los datos complementarios medidos en campo inherentes a los procesos intervenidos.

Un resumen de los dieciocho (18) tratamientos con los resultados de calidad obtenidos en laboratorio, los estimados con el modelo matemático resultante y la diferencia entre estos se muestra en la Tabla 4-1.

Tabla 4-1: Diseño completo con las variables de respuesta (calidad de café) experimentales y estimadas con el modelo matemático.

No. Tratamiento	Referencia de Tratamiento	Variables Codificadas			Variables no Codificadas			Respuesta (Y) Calidad de café (Puntaje SCA)		
		x ₁	x ₂	x ₃	x ₁ Fermentación (horas)	x ₂ Referencia de sombrero	x ₃ Almacenamiento (días)	Experimental	Estimada	Diferencia
1	S13F82A34	-1	-1	-1	82	13	34	86	86,01	-0,01
2	S13F110A34	1	-1	-1	110	13	34	85	83,89	1,11
3	S52F82A34	-1	1	-1	82	52	34	83	83,89	-0,89
4	S52F110A34	1	1	-1	110	52	34	86	86,01	-0,01
5	S13F82A76	-1	-1	1	82	13	76	80	83,56	-3,56
6	S13F110A76	1	-1	1	110	13	76	80	81,43	-1,43
7	S52F82A76	-1	1	1	82	52	76	80	81,43	-1,43
8	S52F110A76	1	1	1	110	52	76	84,5	83,56	0,94
9	S32F72A55	-1,68	0	0	72	32	55	84,5	81,83	2,67
10	S32F120A55	1,68	0	0	120	32	55	81	81,83	-0,83
11	S0F96A55	0	-1,68	0	96	0	55	85	84,76	0,24
12	S65F96A55	0	1,68	0	96	65	55	85,5	84,76	0,74
13	S32F96A20	0	0	-1,68	96	32	20	86	86,82	-0,82
14	S32F96A90	0	0	1,68	96	32	90	85	82,70	2,30
15	S32F96A55	0	0	0	96	32	55	85	84,76	0,24
16	S32F96A55	0	0	0	96	32	55	85,25	84,76	0,49
17	S32F96A55	0	0	0	96	32	55	85	84,76	0,24
18	S32F96A55	0	0	0	96	32	55	85	84,76	0,24

Nota: las referencias de los tratamientos se construyen a partir de las variables no codificadas y de las letras “S”: Secado, “F”: Fermentación y “A”: Almacenamiento.

4.1 Diseño experimental

Los coeficientes de regresión del modelo general se presentan en la Tabla 4-2, en esta se observa que con un nivel de significancia de (p -valor $< 0,1$) solo dos (2) efectos fuera del intercepto son significativos previa reparametrización del modelo. Para profundizar en el proceso estadístico, códigos y resultados referirse al Anexo: Análisis estadístico.

Tabla 4-2: Coeficientes de regresión del modelo polinomial de segundo orden. Fuente propia.

Variables	Coefficientes de regresión estimados	Error estandar	t-valor	p-valor
Intercepto	85,128	0,920	92,493	2,084e-13 ***
Fermentación	0,045	0,499	0,090	0,931
Secado	0,245	0,499	0,490	0,637
Almacenamiento	-1,227	0,499	-2,490	0,039 *
Fermentación ²	-1,112	0,518	-2,145	0,064 .
Secado ²	-0,228	0,518	-0,434	0,672
Almacenamiento ²	-0,184	0,518	-0,355	0,732
Fermentación - Secado	1,063	0,652	1,630	0,142
Fermentación - Almacenamiento	0,313	0,652	0,478	0,644
Secado - Almacenamiento	0,813	0,652	1,245	0,248

Nota: “***” = nivel de significancia de 0,001, “*” = nivel de significancia de 0,05 y “.” = nivel de significancia de 0,1.

Los coeficientes de regresión finales, posterior a la reparametrización se muestra en la Tabla 4-3, se observa que tres (3) de los nueve (9) efectos fueron significativos (p -valor $< 0,1$), un efecto lineal, almacenamiento X_3 , uno cuadrático, fermentación X_2^2 y una interacción, fermentación – secado X_1X_2 . Así mismo, se observa que con un nivel de significancia de 0,1 se cuenta con evidencia estadística para rechazar la hipótesis nula, es decir que al menos uno de los tratamientos, tienen incidencia sobre la calidad del café.

Tabla 4-3: Coeficientes de regresión reparametrizados del modelo polinomial de segundo orden. Fuente propia.

Variables	Coefficientes de regresión estimados	Error estandar	t-valor	p-valor
Intercepto	84,762	0,49	171,47	0,00 ***
Almacenamiento	-1,227	0,43	-2,87	0,01 *
Fermentación (C)	-1,040	0,43	-2,43	0,03 *
Fermentación - Secado	1,063	0,56	1,90	0,08 .

Nota: “***” = nivel de significancia de 0,001, “*” = nivel de significancia de 0,05 y “.” = nivel de significancia de 0,1.

La Tabla 4-4 muestra el análisis de varianza, en la cual se corrobora el rechazo de la hipótesis nula y el efecto de los tratamientos mostrados sobre la calidad. A su vez, al comparar los valores de F y F crítico se observa que al menos un par de medias son diferentes respecto a los diferentes tratamientos y que el modelo es tanto significativo como predictivo, por tal es posible generar el modelo matemático y la superficie de respuesta.

Tabla 4-4: Análisis de varianza del DCCR. Fuente propia

Fuente de variación	GI	SQ	MQ	F	Fcrit	P
Regresión	3	44,37	14,79	5,92	2,52	0,01
Residuales	14	35,00	2,50			
Falda de ajuste	4	16,53	4,13	2,24	2,61	0,14
Error puro	10	18,47	1,85			

Así mismo, a partir de la prueba de comparaciones múltiples respecto al punto central (Dunnett), Tabla 4-5, se ratifica el rechazo de la hipótesis nula y se observa una diferencia estadística entre las medias de los tratamientos¹ S13F110A76, S13F82A34, S13F82A76, S32F120A55, S32F96A20, S52F110A34, S52F82A34, S52F82A76 y el punto central

¹ Las referencias de los tratamientos se muestran en la Tabla 4-1. Estos se construyen a partir del factor representado por una letra (S: Referencia de secado, F: Tiempo de fermentación y A: Tiempo de almacenamiento) y el nivel o condición evaluada.

S32F96A55. Así mismo, se observa que la calidad media generada por los tratamientos S13F82A34 y S52F110A34 es superior al del punto central.

Tabla 4-5: Comparaciones múltiples respecto al punto central. Fuente propia.

Hipótesis	Diferencia	Intervalo de Confianza Inferior	Intervalo de Confianza Superior	p-valor
S0F96A55-S32F96A55	-0,063	-0,770	0,645	0,9999
S13F110A34-S32F96A55	-0,063	-0,770	0,645	0,9999
S13F110A76-S32F96A55	-5,063	-5,770	-4,355	0,0003
S13F82A34-S32F96A55	0,938	0,230	1,645	0,0382
S13F82A76-S32F96A55	-5,063	-5,770	-4,355	0,0003
S32F120A55-S32F96A55	-4,063	-4,770	-3,355	0,0005
S32F72A55-S32F96A55	-0,563	-1,270	0,145	0,1459
S32F96A20-S32F96A55	0,688	-0,020	1,395	0,0882
S32F96A90-S32F96A55	-0,063	-0,770	0,645	0,9999
S52F110A34-S32F96A55	0,938	0,230	1,645	0,0381
S52F110A76-S32F96A55	-0,563	-1,270	0,145	0,1461
S52F82A34-S32F96A55	-2,063	-2,770	-1,355	0,0039
S52F82A76-S32F96A55	-5,063	-5,770	-4,355	0,0003
S65F96A55-S32F96A55	0,438	-0,270	1,145	0,2595

El análisis de regresión de la información permite generar el siguiente modelo matemático que explica la generación de calidad, con un coeficiente de determinación (R^2) de 56%, esto significa que el 56% de la variación en la variable de respuesta o dependiente (calidad del café) puede ser explicada por las variables independientes incluidas en el modelo; donde alguna incidencia se comienza a manifestar con valores de R^2 mayores a 0,5. Un valor de R^2 entre 0,66 y 0,81 indica un desempeño predictivo adecuado, un valor de R^2 entre 0,82 y 0,90 revela buena predicción y los modelos con un valor de R^2 superior a 0,91 se consideran excelentes (Williams, 2003). En este orden de ideas, el 44% restante de la variación en la calidad del café no es explicada por el modelo actual y puede deberse a otras variables no incluidas en el modelo o a factores no estudiados, Ecuación 4.1.

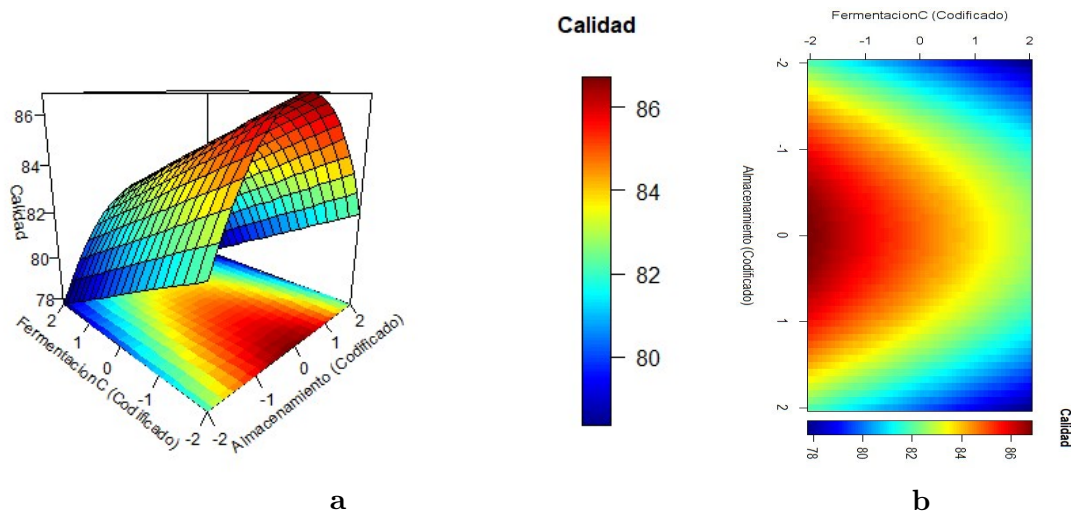
$$Y = 84,762 - 1,227X_3 - 1,040X_1^2 + 1,063X_1X_2 \quad (4.1)$$

En esta ecuación se observa que los factores importantes para la construcción de la calidad son el tiempo de almacenamiento en días (X_3), el tiempo de fermentación al cuadrado en horas (X_1^2) y la interacción tiempo de fermentación en horas – referencia de polisombra en secado en valor comercial (X_1X_2); el resto de las variables lineales, cuadráticas e interacciones obtuvieron un nivel de significancia inferior al establecido. Así mismo, se identifica que tanto el almacenamiento como la fermentación al cuadrado tienen un efecto inverso en la calidad. Es decir, a mayor tiempo de almacenamiento y fermentación menor es el potencial de generar un café de alta calidad. Por otra parte, se observa que la interacción tiempo de fermentación y referencia de polisombra (secado) incide positivamente en la calidad.

Se recomienda reducir el tiempo de almacenamiento al mínimo posible, ya que tiene un impacto negativo en la calidad del café. El tiempo de fermentación puede disminuir la calidad del café, pero cuando se combina con la referencia de polisombra, puede favorecer la generación de cafés con mayor calidad. Sin embargo, el tiempo de fermentación tiene un mayor potencial de generar pérdida de calidad que de incrementarla. Por lo tanto, se debe encontrar un equilibrio entre el tiempo de fermentación y la referencia de polisombra para obtener la mejor calidad posible en el café. Es decir, resulta necesario realizar un análisis a detalle que permita identificar el equilibrio entre los factores fermentación, secado y almacenamiento.

En la Figura 4-1 se observan los valores óptimos para obtener el mayor puntaje de taza (calidad), se identifica que, el punto central (0 en la figura), representado por un tiempo de fermentación de 96 horas, referencia de polisombra S32 y tiempo de almacenamiento de 55 días, genera las mejores condiciones de calidad de la bebida; referirse a la Tabla 4-1 para relación entre variables codificadas y no codificadas.

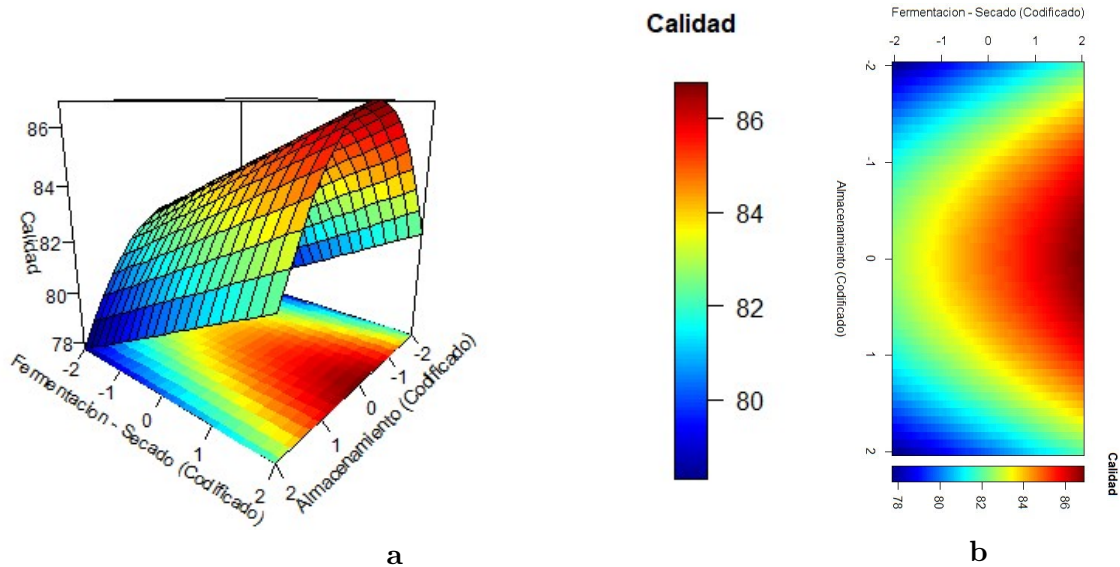
Figura 4-1: Superficies de respuesta para las interacciones FermentaciónC (C)- Almacenamiento (C). (a) Superficie de respuesta. (b) Gráfico de contorno de la interacción. Fuente propia.



Nota: En la figura se muestran las variables codificadas. Para la variable "fermentación", los valores codificados son los siguientes: -2 representa 72 horas, -1 representa 82 horas, 0 representa 96 horas, 1 representa 110 horas y 2 representa 120 horas. En cuanto a la variable "almacenamiento", los valores codificados son los siguientes: -2 representa 20 días, -1 representa 34 días, 0 representa 55 días, 1 representa 76 días y 2 representa 90 días.

Respecto a la interacción tiempo de almacenamiento y fermentación – secado (Figura 4-2), se observa reiteradamente que el mejor tiempo de almacenamiento es de 55 días (0 en la figura), mientras que la interacción Fermentación – Secado debe ser alta.

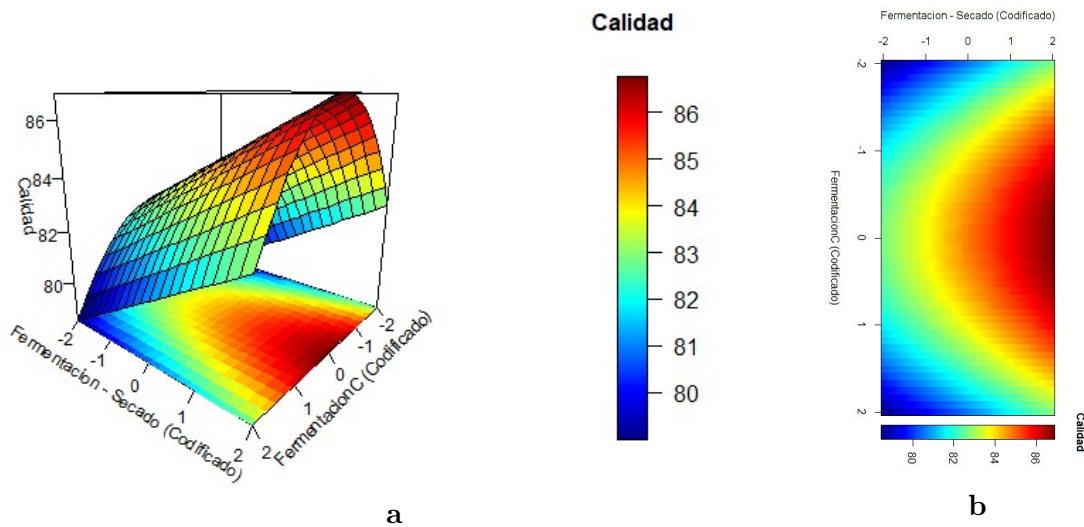
Figura 4-2: Superficies de respuesta para las interacciones Fermentación Secado - Almacenamiento. (a) Superficie de respuesta. (b) Gráfico de contorno de la interacción. Fuente propia.



Nota: En la figura se muestran las variables codificadas. Para la variable "fermentación-secado", los valores codificados son los siguientes: -2 representa 72 horas – S0, -1 representa 82 horas – S13, 0 representa 96 horas – S32, 1 representa 110 horas – S52 y 2 representa 120 horas – S65. En cuanto a la variable "almacenamiento", los valores codificados son los siguientes: -2 representa 20 días, -1 representa 34 días, 0 representa 55 días, 1 representa 76 días y 2 representa 90 días.

La Figura 4-3 muestra la superficie de respuesta para la fermentación al cuadrado y la interacción fermentación – secado. Se observa en este caso que la fermentación al cuadrado genera mejores resultados con valores de 96 horas (0 en la figura).

Figura 4-3: Superficies de respuesta para las interacciones Fermentación Secado – FermentaciónC (C). (a) Superficie de respuesta. (b) Gráfico de contorno de la interacción. Fuente propia.



Nota: En la figura se muestran las variables codificadas. Para la variable "fermentación-secado", los valores codificados son los siguientes: -2 representa 72 horas – S0, -1 representa 82 horas – S13, 0 representa 96 horas – S32, 1 representa 110 horas – S52 y 2 representa 120 horas – S65. En cuanto a la variable "fermentación", los valores codificados son los siguientes: -2 representa 72 horas, -1 representa 82 horas, 0 representa 96 horas, 1 representa 110 horas y 2 representa 120 horas.

4.2 Fermentación

En la Tabla 4-6 se presentan los resultados obtenidos correspondientes a las variables químicas del café asociadas a la fermentación del café cereza, los cuales fueron agrupados por tiempo de fermentación a partir de la data individual de cada tratamiento.

Tabla 4-6: Variables químicas del café asociadas a la fermentación del café cereza. Fuente propia

Fermentación	72		82		96		110		120	
Tratamiento	S32F72	S13F82	S52F82	S0F96	S32F96	S65F96	S0F110	S13F110	S52F110	S32F120
Brix Café	17,5	16,33			14			14,25		14,67
Temperatura Café (°C)	27	28,25			28,5			29,2		30
Temperatura Lixiviado (°C)	28,4	28,88			29,55			29,55		29,93
pH	4,22	4,2			4,11			4,07		3,98
Conductividad (mS/cm)	8,5	8,59			9,95			10,37		11,55
TDS (ppm)	6,46	6,95			7,02			7,32		8,13
CO₂ (ppm)	100000	100000			100000			100000		100000
O₂ (%)	15,32	13,26			10,54			10,24		4,24

En la Tabla 4-4 se observa que a pesar de que todo el café utilizado en el experimento es de la misma variedad (Castillo) y de la misma finca, los °Bx o sólidos solubles totales (SST) en el jugo del café exprimido no fue exactamente el mismo. Esto se puede deber a diferentes factores dentro de los que se encuentran diferentes estados de maduración del café, fertilización del lote, edad de los árboles de donde provino el material, entre otros. Sin embargo, se reconoce que a mayor contenido de azúcar o mayor contenido de sólidos solubles totales (°Bx) presente en el café, mayor será el insumo disponible para los procesos metabólicos realizados por los microorganismos, por lo cual se prefieren cafés con valores de °Bx más altos (Carvalho, et al., 2023). Aun así, no se encuentra una relación directa entre los SST y las otras variables medidas.

Respecto a la temperatura, se observa que tanto la temperatura de la masa de café como la del lixiviado generado por el café durante la fermentación son directamente proporcionales al tiempo de fermentación y similares entre sí, no superando los 30°C, valores en los cuales las bacterias del ácido láctico y levaduras realizan sus procesos metabólicos de forma idónea. Esta variable es crítica dado que, dependiendo de las condiciones climáticas y el área de beneficio, la temperatura de la masa de café puede elevarse a puntos en los cuales los microorganismos no pueden realizar sus funciones metabólicas inhabilitando la fermentación; esto también puede causar la muerte del embrión, destruyendo el potencial de expresión de calidad del producto, según lo indicado por do Livramento et al. (2017).

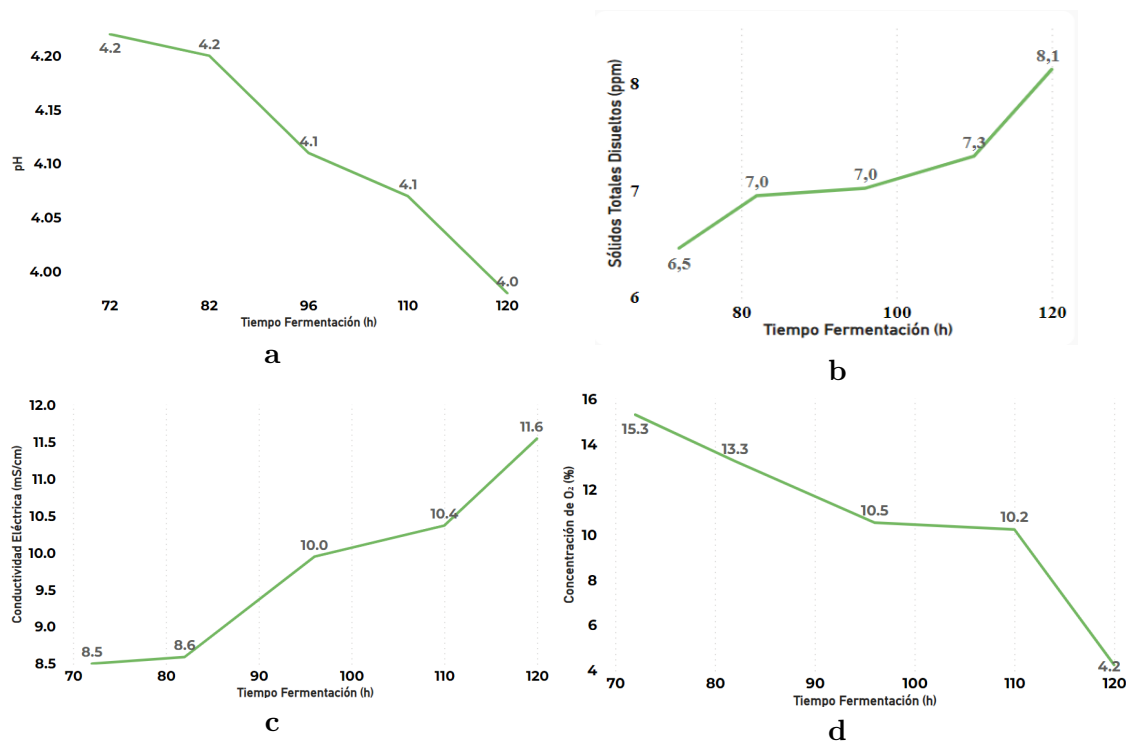
A partir de los valores del potencial de hidrógeno (pH), se observa una relación inversamente proporcional entre esta y el tiempo de fermentación. Así mismo, el valor más bajo es cercano a 4.0, el cual se considera el límite para el correcto desarrollo de las bacterias ácido lácticas

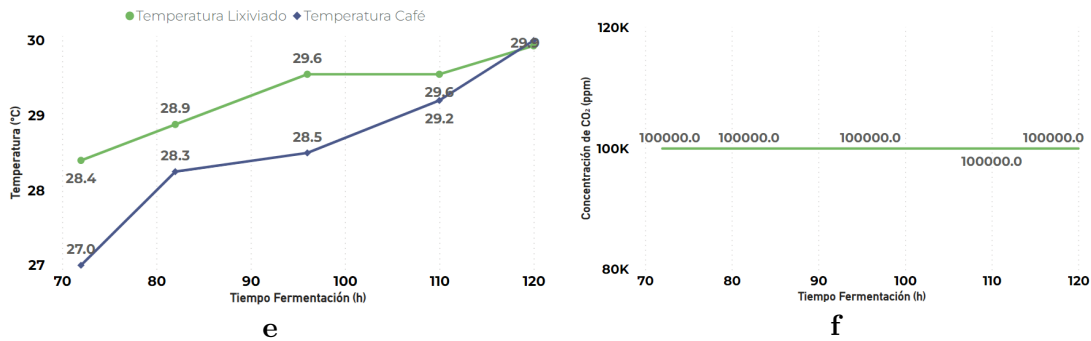
y ácido acéticas, que se evidencia con las notas de los estudios de calidad, en las cuales los catadores durante el reconocimiento del aroma del café cereza seca y del grano verde trillado identificaron aromas lácteos, vinagres y de alcoholes.

La conductividad eléctrica y los sólidos totales disueltos (TDS), se relacionan esencialmente con la cantidad de sólidos disueltos en un fluido (inorgánicos y orgánicos) y como estos propician que dicho fluido tenga el potencial de conducir electricidad. Por tanto, es congruente la relación que se observa entre las dos variables. Lo cual implica que en el transcurso del tiempo en el lixiviado se encuentra mayor cantidad de TDS y este cuenta con una mayor conductividad eléctrica.

En la Figura 4-4 se presentan las variables asociadas al tiempo de fermentación de los cafés naturales, analizadas en este estudio.

Figura 4-4: Variables asociadas a la fermentación del café. (a) Relación pH – tiempo de fermentación (h). (b) Relación TDS – tiempo de fermentación (h). (c) Relación conductividad eléctrica – tiempo de fermentación (h). (d) Relación concentración de oxígeno – tiempo de fermentación (h). (e) Relación temperatura del café y del lixiviado – tiempo de fermentación (h). (f) concentración de dióxido de carbono – tiempo de fermentación (h). Fuente propia.





En los tiempos de fermentación estudiados se identifica que la liberación de CO₂ generada por los microorganismos llegó al rango máximo de medición del dispositivo, lo cual significa una alta actividad de microorganismos y la necesidad de establecer un mecanismo de salida de gases sin el ingreso de O₂ al interior de la unidad de fermentación. Así mismo, se observa que el proceso no es 100% anaerobio, debido a que existe un bajo porcentaje de oxígeno disuelto, el cual disminuye en función al tiempo de fermentación. Por lo tanto, al ser un volumen finito, no podrá el dióxido de carbono ocupar la totalidad del volumen de la caneca sin facilitar la salida del oxígeno.

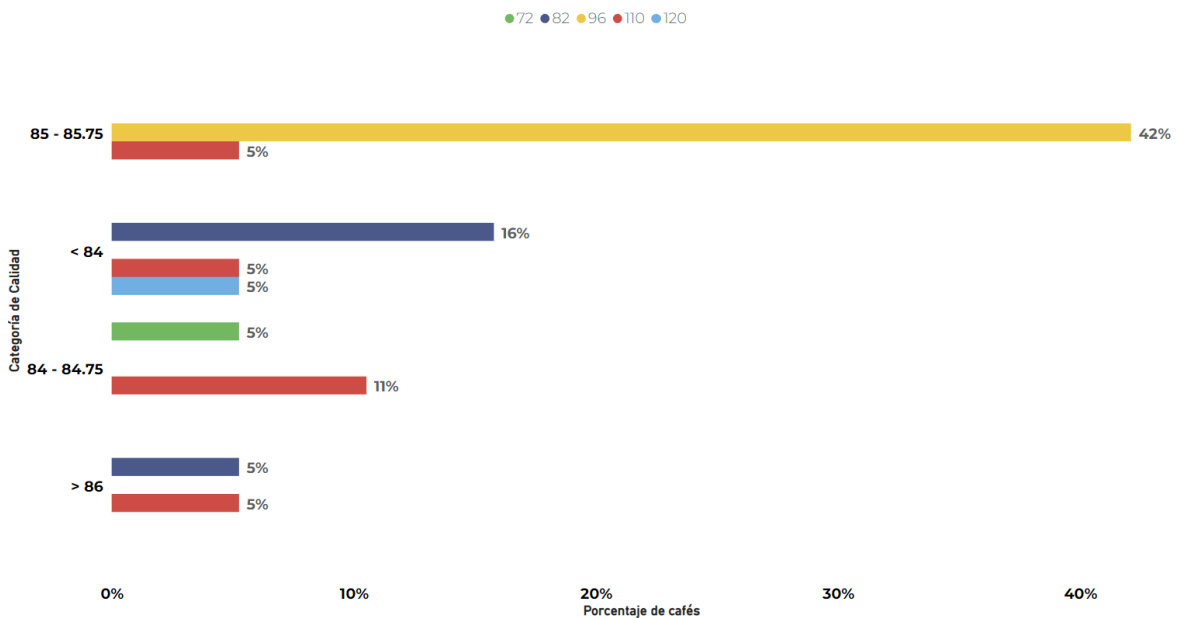
Esencialmente, existe una relación directamente proporcional de los tiempos de fermentación con la temperatura del café y de los lixiviados, la conductividad y los sólidos totales disueltos (TDS), e inversamente proporcional con el pH y el O₂. Finalmente, no se identifica relación entre los °Bx del café, ya que este valor viene dado por la variedad de la semilla, manejo agronómico y estado de maduración.

Al analizar los resultados de calidad respecto al tiempo de fermentación, se observa que el 74% del café producido obtuvo valores de calidad superiores o iguales a 84 puntos de la clasificación SCA. Si bien todas las pruebas de taza de café obtenidas en el presente estudio puntuaron sobre los 80 puntos (referirse al Anexo: Fichas de calidad de los tratamientos para profundizar en los resultados de calidad), lo cual los cataloga como cafés de especialidad (TheSpecialtyCoffeeCompany, 2022), para el presente estudio el mínimo de calidad establecido es de 84 puntos SCA.

Se observa que el 31% de los cafés producidos cuentan con una calidad inferior a 84, de los cuales el 52% fueron fermentados por 82 horas, 16% por 72 horas, 16% por 110 horas y el 16% restante por 120 horas. Así mismo, se observa que el café fermentado por 96 horas

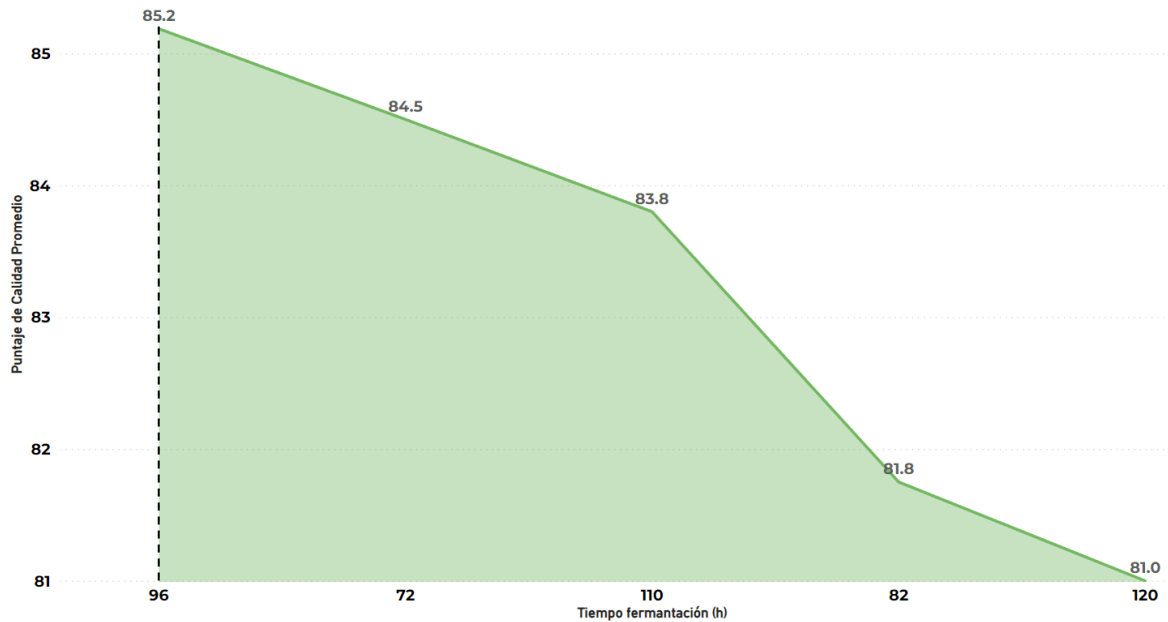
originó el mayor porcentaje de café de especialidad (42%), seguido por 110 horas, con un 11%, Figura 4-5.

Figura 4-5: Resultados de calidad obtenidos respecto a los diferentes niveles de fermentación. Fuente propia.



Congruente con la información anteriormente mostrada, en la Figura 4-6 se observa que los mayores puntajes de calidad promedio se presentaron con 96 y 72 horas de fermentación, respectivamente. Los demás tiempos de fermentación originaron valores promedio inferiores a 84 puntos, lo cual indica que el proceso de beneficio con 96 horas de fermentación fue el más consistente en producir café de alta calidad.

Figura 4-6: Relación entre el puntaje de calidad promedio y el tiempo de fermentación. Fuente propia



Al comparar los resultados de calidad con las diferentes variables asociadas a la fermentación, Figura 4-7, se observa una tendencia indirectamente proporcional entre el puntaje de calidad o análisis de taza y el pH, comportamiento que se mantiene hasta valores cercanos e inferiores a 4, donde se espera una reducción paulatina de la calidad del café (Puerta, 2012).

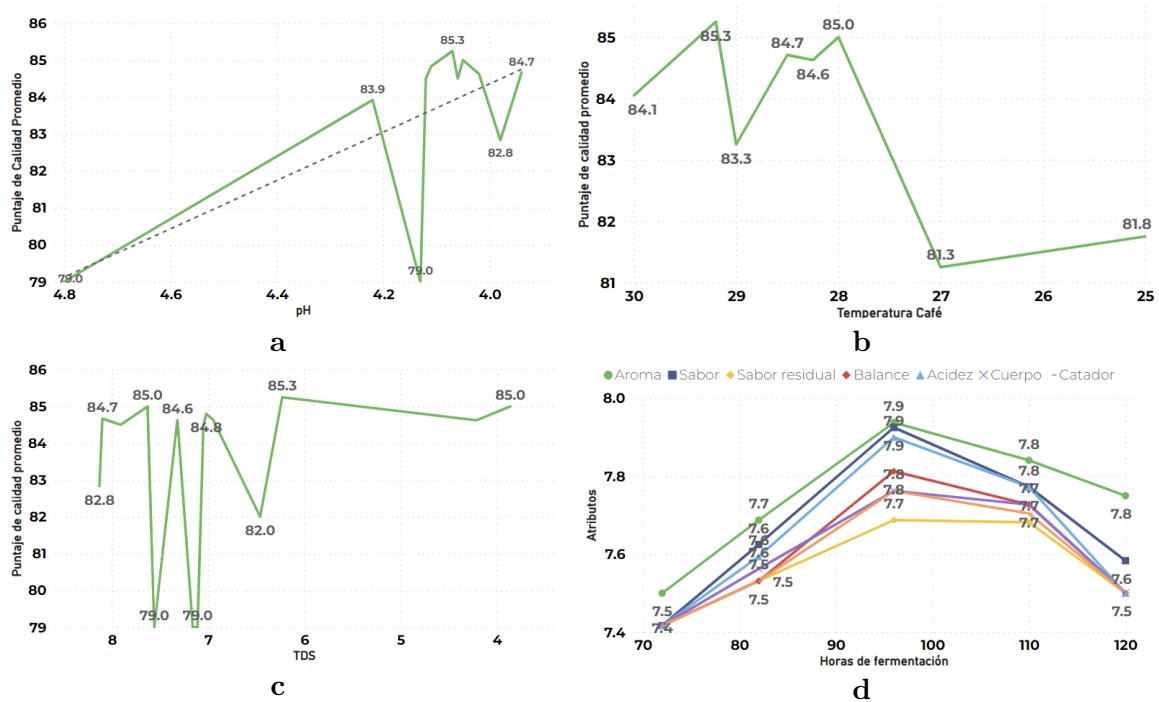
Respecto a la relación entre la temperatura media del café y la calidad del café, se identifica una relación directamente proporcional, donde mayores puntajes de calidad se observan a mayores temperaturas de la masa de café. Sin embargo, las temperaturas máximas medidas fueron de 30°C, valores inferiores a las condiciones de temperatura necesarias para que se presente la destrucción del embrión, comportamiento asociado a la pérdida de calidad (de Melo Pereira, et al., 2019). Así mismo, como se mencionó anteriormente estos rangos de temperatura son óptimos para el desarrollo metabólico de las bacterias ácido lácticas.

Al contrastar el puntaje de calidad con los TDS, no se logra identificar una relación clara entre ambos, por lo cual, la medición de esta variable durante el proceso de fermentación no aporta un valor real para la comprensión y toma de decisiones durante el proceso.

Finalmente, al contrastar los diferentes atributos que componen el puntaje de taza respecto a las horas de fermentación, se observan puntajes medios por atributo superiores, que

generan una mejor calidad en taza, en las 96 horas de fermentación respecto a los otros tiempos de fermentación. Comportamiento que corroboró lo anteriormente identificado en la Figura 4-6.

Figura 4-7: Relación entre variables asociadas a la fermentación y el puntaje promedio de calidad. (a) Relación entre el puntaje de calidad promedio y el pH. (b) Relación entre el puntaje de calidad promedio y la temperatura media del café al finalizar el proceso de fermentación. (c) Relación entre el puntaje de calidad promedio y los TDS. (d) Relación entre los atributos del café y las horas de fermentación, cada color corresponde a un atributo diferente, verde: aroma, azul oscuro: sabor, amarillo: sabor residual, rojo: balance, azul claro: acidez, púrpura: cuerpo, naranja: puntaje de catador. Fuente: propia.



Al evaluar los resultados de los análisis de calidad, se logran identificar alrededor de 80 diferentes notas asociadas al aroma (café seco recién molido), y al sabor del café preparado a diferentes temperaturas. En la Tabla 4-7 se observan las principales notas obtenidas ordenadas de manera descendente respecto a 96 horas de fermentación, tiempo más interesante debido a su consistencia en la producción de café de calidad según lo visto a través del presente estudio. Así mismo, se observa que las notas a naranjas fueron las más presentes a 96 horas de fermentación; mientras que la nota de melaza se encontró transversalmente en todos los tiempos de fermentación estudiados. A partir de esta

información se evidenciaron dos conceptos importantes en calidad, el puntaje de taza (sumatoria de los atributos), y las notas, que describen el sabor y olor que experimentará el consumidor al probar el café.

Tabla 4-7: Principales notas obtenidas de aroma y sabor respecto a los tiempos de fermentación. Fuente propia.

Nota	Frecuencia de incidencia (%) - Fermentación (h)				
	72	82	96	110	120
Naranja		6,30%	10,00%	3,40%	
Aromático		6,30%	8,80%	1,10%	
Miel			6,30%	3,40%	
Miel maple		6,30%	5,60%	4,60%	
Chocolate negro	16,70%	3,10%	5,00%	4,60%	
Fresa		9,40%	4,40%	6,80%	
Cereza			3,80%	1,10%	8,30%
Vino		6,30%	3,80%	4,60%	16,70%
Ciruela pasa			3,80%	5,70%	
Melaza	8,30%	6,30%	2,50%	4,60%	25,00%
Mora			2,50%	5,70%	

Al relacionar las notas con los puntajes promedios de calidad (Tabla 4-8), se observa que las notas no tienen una relación directa con la calidad cuantitativa, dado que notas como la guayaba o mandarina se presentaron en tratamientos con diferentes puntajes. Sin embargo, las notas de cardamomo y clavo solo se presentaron en el máximo puntaje de calidad obtenido. A su vez, el rango de calidad entre 85 – 85,75, comprende varias notas relacionadas a los frutos amarillos, tales como toronja, piña, uchuva, manzana y mango. Así mismo, este rango se compone principalmente por notas frutales y aromáticas.

Tabla 4-8: Relación entre los puntajes de taza promedio y las notas identificadas. Fuente propia.

Nota	Puntaje de calidad promedio
Cardamomo	86
Licor de cacao	86
Guayaba	86
Mandarina	86
Clavo	86
Maracuya	85,75
Tamarindo	85,75
Toronja	85,75
Canela	85,25
Miel de caña	85
Menta	85
Yerbabuena	85
Piña	85
Floral	85
Uchuva	85
Almibar	85
Te Negro	85
Papaya	85
Manzana	85
Almibar	85
Caña	85
Mango	85
Uva	84,83
Miel	84,82
Aromatico	84,78
Guayaba	84,75
Chocolate blanco	84,75
Banano	84,75
Guayaba	84,75
Licor de cacao	84,75

4.3 Secado

A partir de la información proveniente de la estación meteorológica se identifican los comportamientos de las condiciones climáticas de un día típico de secado, mostrados en la Figura 4-8, en la cual se observa que en promedio la temperatura máxima se presenta alrededor de las 3 pm, y empieza a disminuir hasta llegar a su valor mínimo cerca de las 5

am. La humedad relativa al ser inversamente proporcional a la temperatura presenta un comportamiento contrapuesto. Los valores registrados son interesantes, ya que las temperaturas máximas no superan los 37°C (do Livramento et al., 2017), que se ha identificado como la temperatura donde se genera la destrucción del embrión en altos periodos de exposición. Así mismo, durante el día la humedad relativa se encuentra debajo del 70%, con un valor máximo de 86% alrededor de las 5 a.m.

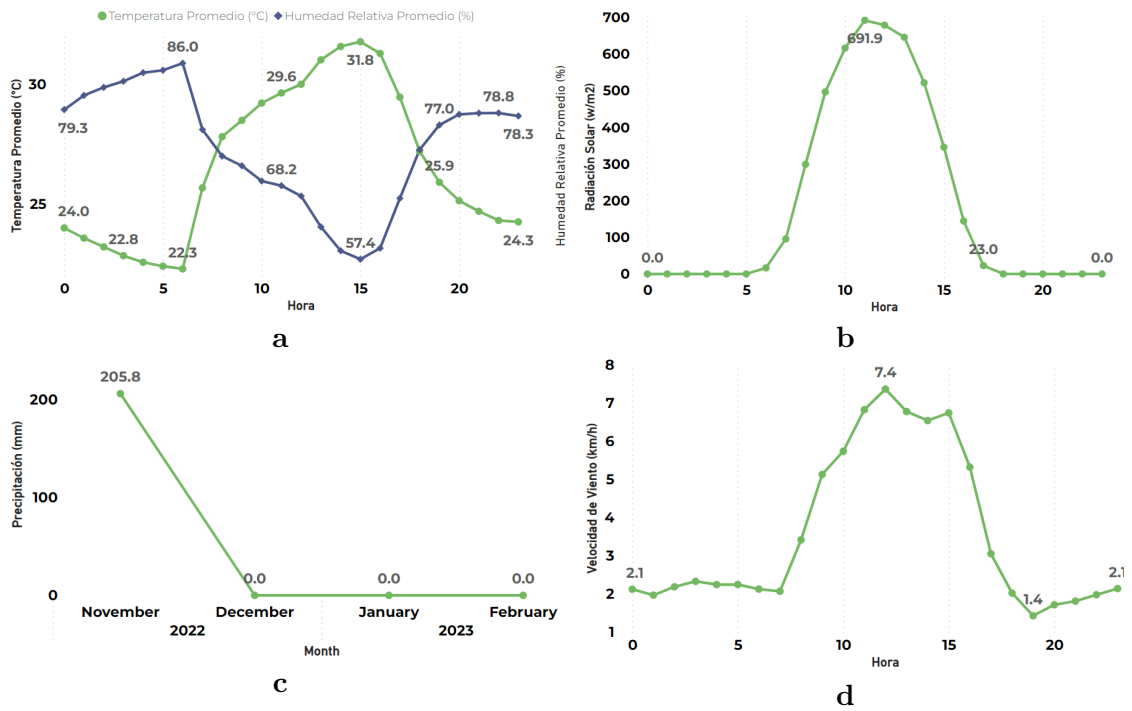
Respecto a la radiación solar, se observa que tiene un comportamiento similar a la temperatura, presentando valores máximos a las 12 p.m. Sin embargo, a partir de este punto comienza a reducirse considerablemente hasta llegar a cero a las 6 p.m. Así mismo, se observa que a pesar de que el comportamiento de la temperatura y la radiación son similares, se presenta una diferencia en las horas donde se miden puntos máximos y mínimos, comportamiento explicado por la absorción de luz y posterior conversión en energía térmica que realiza la superficie terrestre; energía, que es medida como temperatura y que no escapa fácilmente de la atmósfera por el efecto invernadero. Comportamiento diferente al de la radiación, de la cual un porcentaje es retenido o absorbido por las diferentes superficies de la tierra (porcentaje que varía de acuerdo con las propiedades de la superficie), mientras que el resto es reflejado nuevamente a la atmósfera, (Kumar et al., 2019).

Tal como se mencionó anteriormente, la zona de estudio cuenta con baja precipitación anual, lo cual se evidencia en la información meteorológica registrada, donde en los meses de diciembre, enero y febrero no se registraron lluvias, mientras que en noviembre se registraron 205 mm de precipitación total.

Finalmente, respecto a la velocidad del viento se observan valores promedios máximos alrededor del mediodía con decrecimiento en la tarde. Sin embargo, se identifica un flujo de aire constante durante todo el día, necesario para evacuar la humedad liberada por el grano de café y facilitar la transferencia de masa del café (humedad) al ambiente.

Para más información en el procesamiento de datos climáticos con Python referirse al Anexo: Gestión de datos sensores y calidad.

Figura 4-8: Condiciones climáticas generales del área de secado durante el día. (a) Temperatura y humedad relativa promedio. (b) Radiación solar promedio. (c) Precipitación total por mes. (d) Velocidad del viento promedio. Fuente propia.



Los resultados obtenidos en la etapa de campo del componente de secado se muestran en la Tabla 4-9.

De izquierda a derecha se observan las referencias de polisombras disponibles en el mercado junto con el porcentaje de sombra que efectivamente generan, medido a partir de la iluminancia y los tratamientos llevados a cabo en esta investigación.

Tabla 4-9: Resumen de variables medidas en campo en el componente de secado. Fuente propia.

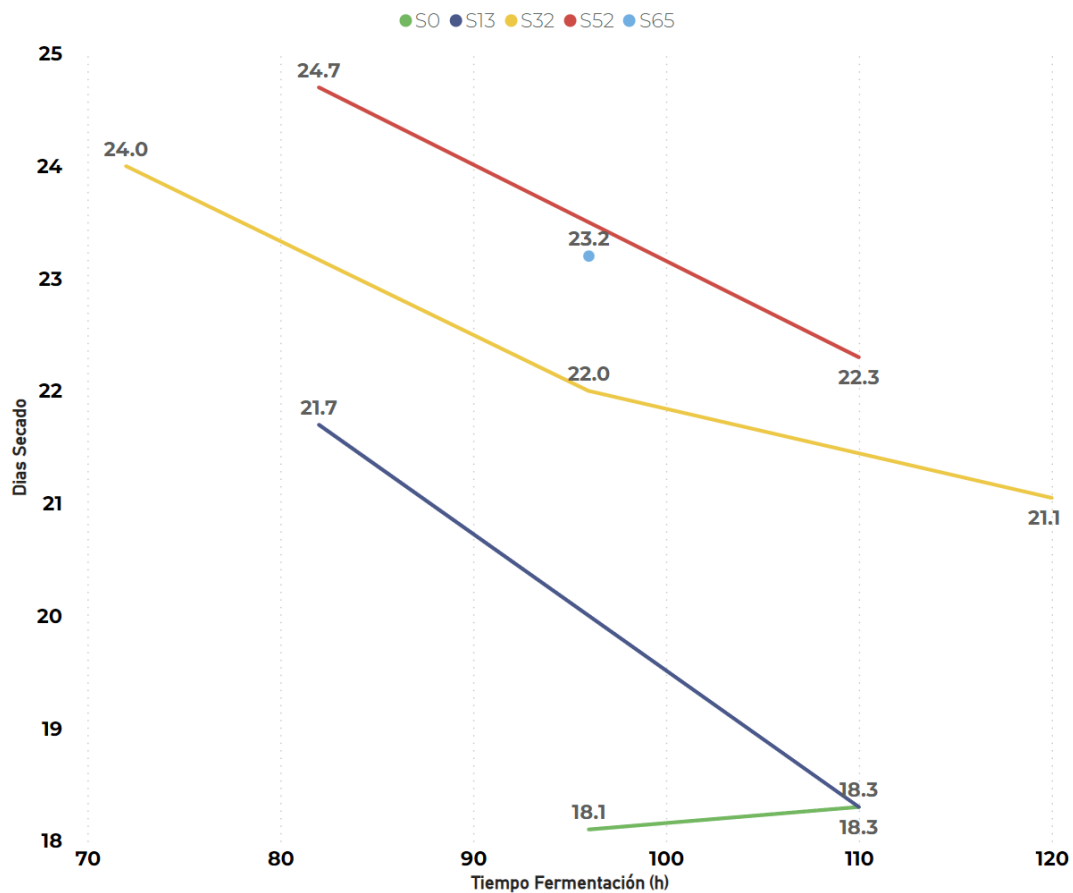
Referencia	% Sombra	Tratamiento	Inicio Secado	Final Secado	Días Secado	Días Secado Prom.
S0	0%	S0F110	3/1/2023 8:00	21/1/2023 15:00	18,3	18,2
		S0F96	1/1/2023 12:00	19/1/2023 15:10	18,1	
S13	20,50%	S13F110	3/1/2023 8:00	21/1/2023 15:20	18,3	20,0
		S13F82	30/12/2022 22:00	21/1/2023 15:10	21,7	
S32	46%	S32F120a	30/12/2022 18:00	21/1/2023 15:50	21,9	22,0
		S32F120b	1/1/2023 12:00	21/1/2023 16:20	20,2	
		S32F72	30/12/2022 12:00	23/1/2023 12:00	24,0	
		S32F96	1/1/2023 12:00	23/1/2023 12:00	22,0	
S52	64,40%	S52F110	3/1/2023 8:00	25/1/2023 14:00	22,3	23,5
		S52F82	30/12/2022 22:00	24/1/2023 14:00	24,7	
S65	69,70%	S65F96	1/1/2023 12:00	24/1/2023 16:50	23,2	23,2

Así mismo, se observa el tiempo requerido por cada uno de los tratamientos de secado para lograr alcanzar el contenido de humedad de los granos en el rango deseado de entre el 10 – 12% en base húmeda.

Se observa un patrón parcialmente independiente de las condiciones de secado a las cuales se expusieron los tratamientos. Se identifica que, a mayor tiempo de fermentación, menor es el tiempo de secado para todas las condiciones de secado, exceptuando a los cafés que se secaron a libre exposición (Figura 4-9).

Al relacionar lo anterior con las variables asociadas a la fermentación, encontramos que a mayor tiempo de fermentación menor es el pH de la masa y mayor es la cantidad de sólidos totales disueltos en el lixiviado y en general, una mayor temperatura del sustrato (café), lo cual podría explicar la relación inversamente proporcional entre el tiempo de fermentación y el tiempo de secado. Es decir, a mayor tiempo de fermentación el café, a partir del proceso metabólico de los microorganismos, libera mayor cantidad de agua libre y sólidos, cuya ausencia en la cereza facilitan posteriormente el proceso de secado, (transferencia de humedad del grano al ambiente).

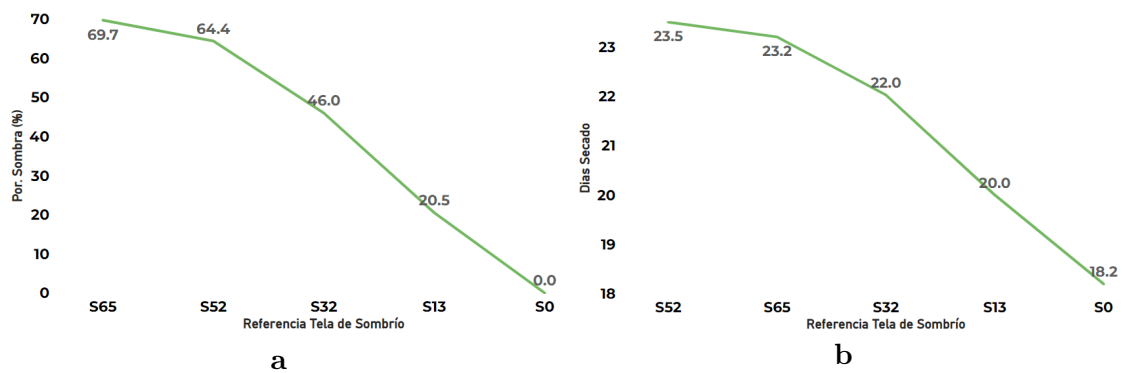
Figura 4-9: Relación días de secado vs tiempo de fermentación por tratamiento y porcentaje de sombra. Fuente propia.



Inicialmente se observa que las referencias comerciales de las polisombras bloquean un porcentaje de la luz; los valores de iluminancia y de radiación solar obtenidos muestran que las primeras cuatro (4) referencias, Tabla 4-7, representan una reducción considerable de iluminancia. Sin embargo, la referencia S65 no representa un incremento considerable respecto a la S52, información congruente con los días requeridos para el secado de los tratamientos, identificando reducciones de tiempo considerables, exceptuando las muy cercanas obtenidas para las polisombras de S52 y S65 respectivamente. Así mismo, como se muestra en la Tabla 4-7, al comparar las polisombras respecto a los porcentajes de sombra generados y los tiempos de secado, se observan comportamientos similares y por lo tanto se observa una relación directa entre la polisombra y el tiempo de secado; a mayor porcentaje de sombra dado por una referencia de polisombra, mayor es el tiempo necesario para secar el café.

Es importante mencionar que los tiempos de secado registrados fueron menores a los esperados. En experiencias propias anteriores en beneficio de café, se había identificado un tiempo promedio de secado de cafés naturales de 30 días, llegando a máximos de hasta 60 días, para cafés naturales procesados por vía seca secados a 1150 msnm con temperaturas medias de 37°C durante el día en Mbale, Uganda. Sin embargo, en la presente investigación se registraron tiempos de secado máximo de 23,5 días con rehumedecimiento del grano, lo cual implicó más tiempo de secado y tiempo mínimo de secado de 18 días en condiciones de libre exposición al sol, Figura 4-10.

Figura 4-10: Análisis de las polisombras en relación con el porcentaje de sombra generado y el tiempo de secado. (a) Relación entre el porcentaje de sombra generado respecto a su respectiva polisombra. (b) Relación entre los días de secado y sus respectivas polisombras. Fuente propia.

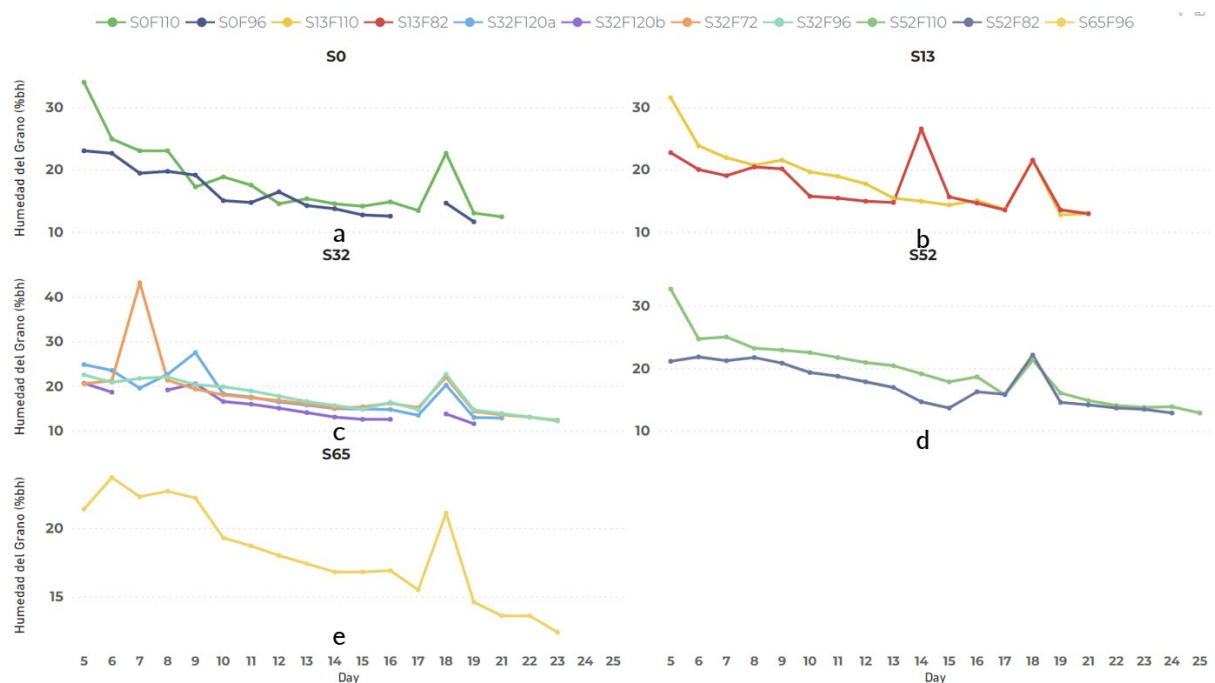


Tal como se muestra en la Figura 4-11 las curvas de secado tienen un comportamiento logarítmico. Se observa que el rehumedecimiento se presenta con mayor frecuencia cuando los tratamientos se encuentran más cercanos a estar secos, lo cual los vuelve más susceptibles a ganar humedad. El rehumedecimiento se presentó en el día 18 para todos los tratamientos, siendo el más alto, el presentado por el tratamiento S65 con porcentaje de sombrío del 69.7%. Aun así, los cafés se secaron en menos de 25 días, siendo un tiempo corto respecto a experiencias anteriores (secado de naturales en Mbale, Uganda), esto debido a las condiciones climáticas de la zona, caracterizada por baja precipitación, ventilación constante con valores máximos en las horas del día de mayor temperatura, temperaturas mínimas por encima de 23 °C y máximas de 37°C y humedad relativa media inferior al 75%.

Congruente con lo mostrado en la Tabla 4-7 se evidencian las tasas de pérdida de humedad que sufre el grano, observando una mayor pendiente (tasa de extracción de agua) en los

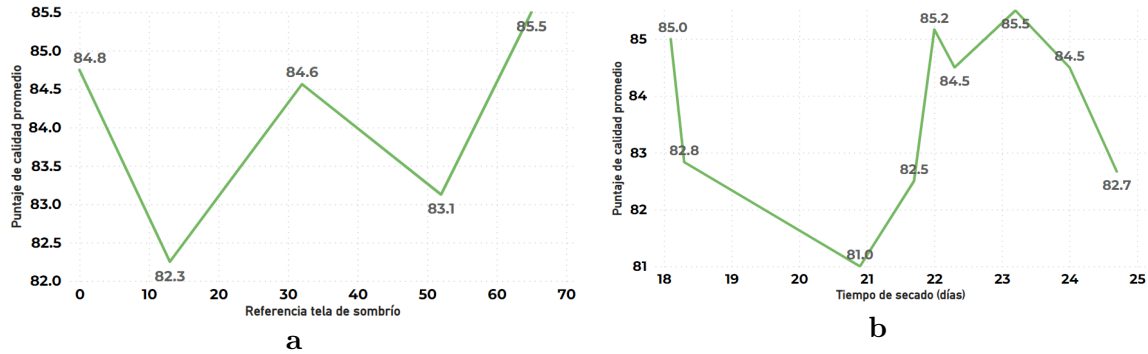
tratamientos sin polisombra y una menor pendiente (curvas más horizontales) en los tratamientos S52 y S65 con polisombra, los cuales no presentaron una diferencia considerable en el tiempo de secado, tal como se evidencia en la Figura 4-11.

Figura 4-11: Curvas de secado de los diferentes tratamientos a partir de la humedad del grano, tiempo de secado y condiciones de sombrío. (a) Curva de secado para los tratamientos sin polisombra. (b) Curva de secado para los tratamientos con polisombra No.13. (c) Curva de secado para los tratamientos con polisombra No. 32. (d) Curva de secado para los tratamientos con polisombra No. 52. (e) Curva de secado para los tratamientos con polisombra No. 65. Fuente propia.



Al comparar la información asociada al secado con los resultados de calidad se observa que no existe una relación clara entre las polisombras empleadas y el puntaje de calidad promedio. El mayor resultado de calidad fue obtenido con la polisombra S65, referencia que no muestra una diferencia considerable respecto a la S52 como se vio anteriormente. El segundo mayor resultado se obtuvo sin polisombra, lo cual ratifica la ausencia de relación entre las dos variables. Esta carencia de relación se mantiene con el tiempo de secado (días), Figura 4-12.

Figura 4-12: Relación entre variables asociadas al secado y la calidad del café producido. (a) Puntaje de taza promedio en función de la polisombra utilizada. (b) Puntaje de taza promedio en función del tiempo de secado promedio de los cafés en esa condición. Fuente propia.



Al relacionar las notas obtenidas del proceso de análisis de calidad respecto a las diferentes polisombras utilizadas en el secado del café se obtiene la información mostrada en la Tabla 4-10. Se observa que algunas notas son específicas de polisombras, mientras que otras son transversales a todos los niveles del tratamiento. Se identifica la nota fresa como transversal a todos los niveles y con una alta tasa de aparición en las referencias S52 y S65, otras notas transversales son miel y panela, mientras que, dentro de las notas propias, se encontraron manzana, pasa, arándano, etc., asociados al secado bajo libre exposición sin polisombra.

Se observa que el secado del café a libre exposición en estas condiciones climáticas favorece la incidencia de notas cítricas y frutales, con un proceso más eficiente respecto al tiempo que conlleva realizar el secado y con un menor costo en infraestructura.

Tabla 4-10: Frecuencia de las notas obtenidas de aroma y sabor respecto a las polisombras utilizadas en el secado. Fuente propia.

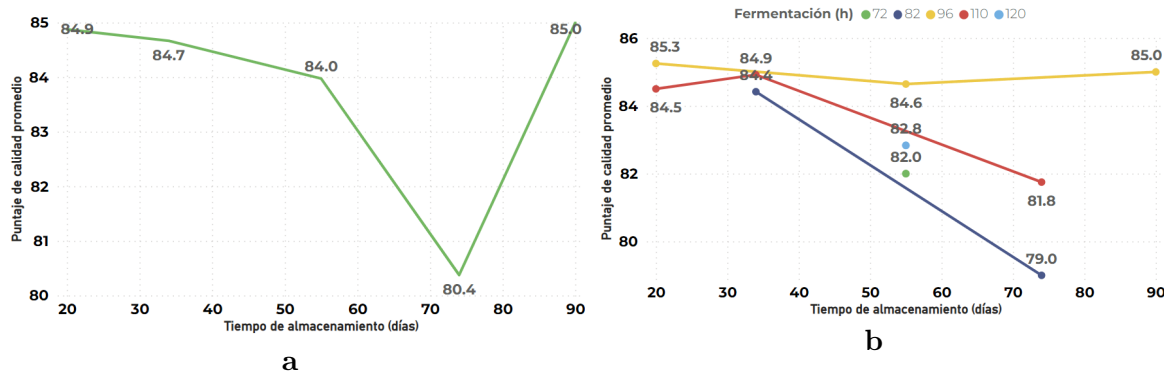
Nota	Frecuencia de incidencia (%) - Tela de Sombrío				
	0	13	32	52	65
Naranja	10,40%		7,50%	6,30%	8,30%
Cacao	8,30%		1,30%	3,10%	
Azucar Morena	8,30%	4,70%	1,30%		
Chocolate negro	8,30%	1,60%	6,30%	4,70%	
Melaza	6,30%	4,70%	6,30%	6,30%	
Afrutado	6,30%	1,60%			
Mora	6,30%	6,30%			8,30%
Vino	6,30%	7,80%	6,30%		
Ciruela pasa	6,30%	6,30%	2,50%		
Cereza	4,20%		3,80%	1,60%	
Manzana	4,20%				
Miel	4,20%		3,80%	4,70%	8,30%
Fresa	4,20%	4,70%	1,30%	10,90%	20,80%
Mandarina	4,20%		0,60%	3,10%	
Miel maple	2,10%	3,10%	4,40%	7,80%	8,30%
Pasa	2,10%				
Panela	2,10%	1,60%	1,90%	3,10%	8,30%
Arandano	2,10%				
Afrutado, caña	2,10%				
Té Negro	2,10%				

4.4 Almacenamiento

Al relacionar el tiempo de almacenamiento con los resultados de calidad se identifica que algunos cafés presentaron un detrimento de su calidad al ser almacenados por periodos largos de tiempo, mientras que otros mantuvieron su calidad inicial o presentaron una leve mejoría (Figura 4-13).

Durante el almacenamiento es importante implementar buenas prácticas (referirse al Marco teórico), para mitigar el riesgo de deterioro de calidad, representado principalmente por defectos de grano agrio, grano con hongos y grano flotador (Specialty Coffee Association, 2019).

Figura 4-13: Relación del puntaje de calidad de los cafés en función del tiempo de almacenamiento. (a) Relación calidad, tiempo de almacenamiento. (b) Relación calidad, tiempo de almacenamiento y horas de fermentación. Fuente propia.



Así mismo, en la Tabla 4-11 se observan las principales notas del café en función de los tiempos de almacenamiento. Se observa, la aparición de la nota “fermentado”, asociada a defectos de grano negro o grano con hongos, la cual significa que el café se encuentra con problemas serios que deterioran su calidad; siendo transversal a todos los tiempos de almacenamiento, pero más frecuente en 90 días. Esto significa que en café los problemas de calidad se generan en cualquier etapa de su procesamiento, y que en el almacenamiento pueden expresarse o desarrollarse, debido a la migración de humedad que experimenta el grano con el medio ambiente y la condición de nuevos compuestos bioactivos generados por condiciones de almacenamiento inestables (Tripetch & Borompichaichartkul, 2019). Así mismo, se observa que las notas cítricas y frutales se encuentran en tiempos de almacenamiento más bajos, mientras que las nueces, melazas y cereales en tiempos de almacenamiento más altos, siendo el punto medio o de inflexión los 55 días de almacenamiento. En este tiempo de almacenamiento se presenta menor tasa de incidencia de fermento, y mayor incidencia de notas cítricas y dulces.

Tabla 4-11: Frecuencia de las notas obtenidas de aroma y sabor respecto a los tiempos de almacenamiento. Fuente propia.

Nota	Frecuencia de incidencia (%) - Tiempo de almacenamiento (días)				
	20	34	55	74	90
Naranja	6,30%	4,20%	10,00%		
Melaza	4,20%	4,20%	7,50%	9,40%	
Chocolate negro	8,30%	3,10%	7,50%	6,30%	
Cereza	8,30%		3,80%	6,30%	
Miel	4,20%	3,10%	3,80%		8,30%
Aromatico	8,30%	5,20%	3,80%		16,70%
Miel maple	6,30%	7,30%	3,10%		8,30%
Fresa	4,20%	10,40%	3,10%		8,30%
Panela	4,20%	2,10%	3,10%	6,30%	
Nuez			2,50%	6,30%	
Mora	4,20%	4,20%	2,50%		
Cereales			2,50%		
Cacao	8,30%	2,10%	2,50%		
Azucar Morena	4,20%	3,10%	2,50%		
Almendra		5,20%	2,50%		
Vegetal			2,50%		
Papel			2,50%	6,30%	
Ciruela pasa	6,30%	4,20%	2,50%		
Vino	8,30%	4,20%	2,50%	6,30%	20,80%
Fermentado		5,20%	2,50%	6,30%	8,30%

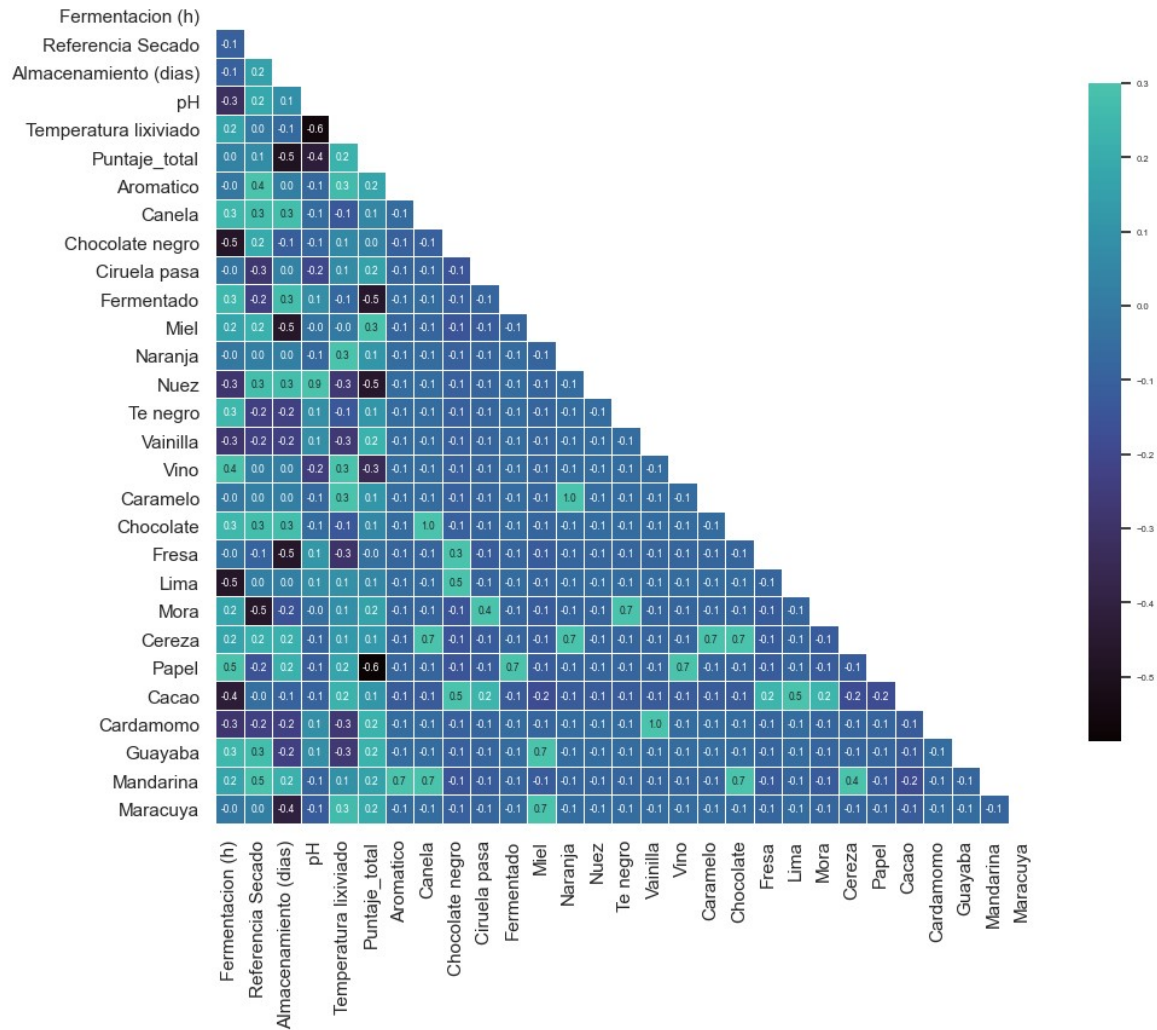
4.5 Interrelaciones

A partir de lo identificado anteriormente, tanto en el análisis estadístico como en el análisis individual por factor, se observó la necesidad de profundizar en las interrelaciones de los factores y su efecto en la calidad.

presenta la matriz de correlación que muestra las relaciones entre las principales variables asociadas a los factores estudiados y los resultados de calidad, como el puntaje de la bebida y las notas de aroma y fragancia. Se puede observar que la nota de fresa tiene una relación inversamente proporcional con el tiempo de almacenamiento (-0,5), lo que significa que a medida que aumenta el tiempo de almacenamiento, la nota de fresa tiende a disminuir. De manera similar, la nota de cacao muestra una relación inversamente proporcional con el tiempo de fermentación (-0,4), lo que indica que a medida que aumenta el tiempo de fermentación, la nota de cacao tiende a disminuir. Además, se puede observar que el puntaje de calidad tiene una relación inversamente proporcional con el tiempo de almacenamiento

(-0,5), lo que implica que a medida que aumenta el tiempo de almacenamiento, el puntaje de calidad tiende a disminuir.

Figura 4-14: Matriz de correlación entre las diferentes variables poscosecha, el puntaje de calidad de la bebida y las principales notas asociadas a sabor y aroma. Fuente propia.



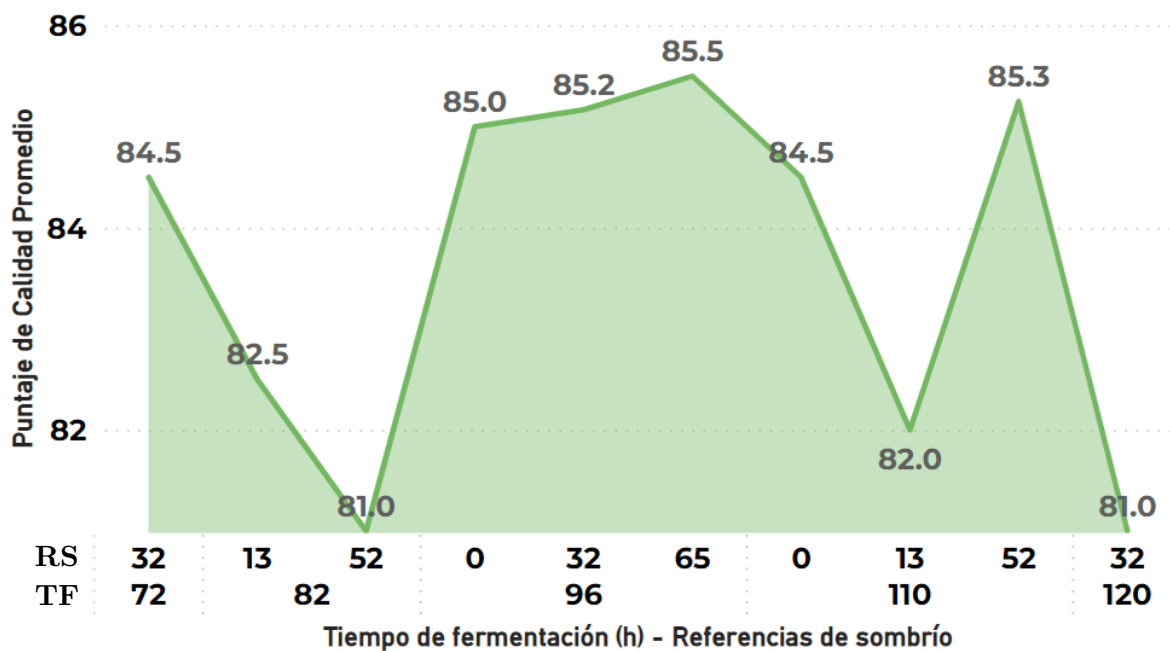
Nota: Los valores representados se calcularon a partir del coeficiente de correlación de Pearson.

Las relaciones mostradas a continuación se enfocan fundamentalmente en identificar el efecto de la fermentación, secado y almacenamiento en la calidad del café.

4.5.1 Fermentación – secado

La relación entre el tiempo de fermentación y la polisombra utilizada en el proceso de secado con respecto a la calidad general se observa en la Figura 4-15. En esta se ratifica que el tiempo de fermentación de 96 horas generó, independientemente de la polisombra utilizada, resultados de calidad superiores o iguales a 85 puntos, seguido por la relación del tiempo de fermentación de 110 horas con polisombra S52. Resulta interesante que el menor tiempo de fermentación evaluado con la polisombra S32 generó resultados de calidad superiores a 84 puntos.

Figura 4-15: Relación entre el tiempo de fermentación y la referencia de polisombra en función de la calidad de taza, donde RS: Referencia de sombrío y TF: Tiempo de fermentación. Fuente propia.



A partir de la información mostrada en la Tabla 4-12, la cual relaciona los factores tiempo de fermentación (h) y las referencias de polisombras utilizadas en el secado con las notas obtenidas, se identifican diferencias significativas en las notas dentro del mismo nivel de tiempo de fermentación. Por ejemplo, a tiempos de fermentación de 96 horas se presentaron notas a fresas en los tratamientos secados bajo las polisombras S32 y S65, siendo más frecuente en la referencia S65. Así mismo, notas a jazmín solo se presentaron en la combinación de 96 horas de fermentación secados con la polisombra S65. Notas a moras se

presentaron en tiempos de fermentación de 96 y 110 horas, con polisombas S0 y S65 para 96 horas y S0 y S13 para 110 horas.

Tabla 4-12: Frecuencia de las notas obtenidas de aroma y sabor respecto a tiempos de fermentación (h) y las referencias de polisombra. Fuente propia.

Nota	Frecuencia de incidencia (%) - Tiempo de fermentación (h) - Referencia de sombrío									
	72		82		96		110		120	
	32	13	52	0	32	65	0	13	52	32
Fresa		6,30%	12,50%			1,80%	20,80%	8,30%	3,10%	9,40%
Panela	8,30%	3,10%				0,90%	8,30%	4,20%		6,30%
Aromatico		12,50%				10,70%	8,30%		3,10%	
Miel				8,30%	5,40%	8,30%				9,40%
Miel de Caña						8,30%				
Miel maple		6,30%	6,30%		6,30%	8,30%	4,20%			9,40%
Mora				8,30%		8,30%	4,20%	12,50%		
Naranja			12,50%	8,30%	10,70%	8,30%	12,50%			
Mandarina, Almibar						8,30%				
Jazmín						4,20%				
Manzana Roja						4,20%				
Mamoncillo						4,20%				
Uva					1,80%				3,10%	
Caña					1,80%					

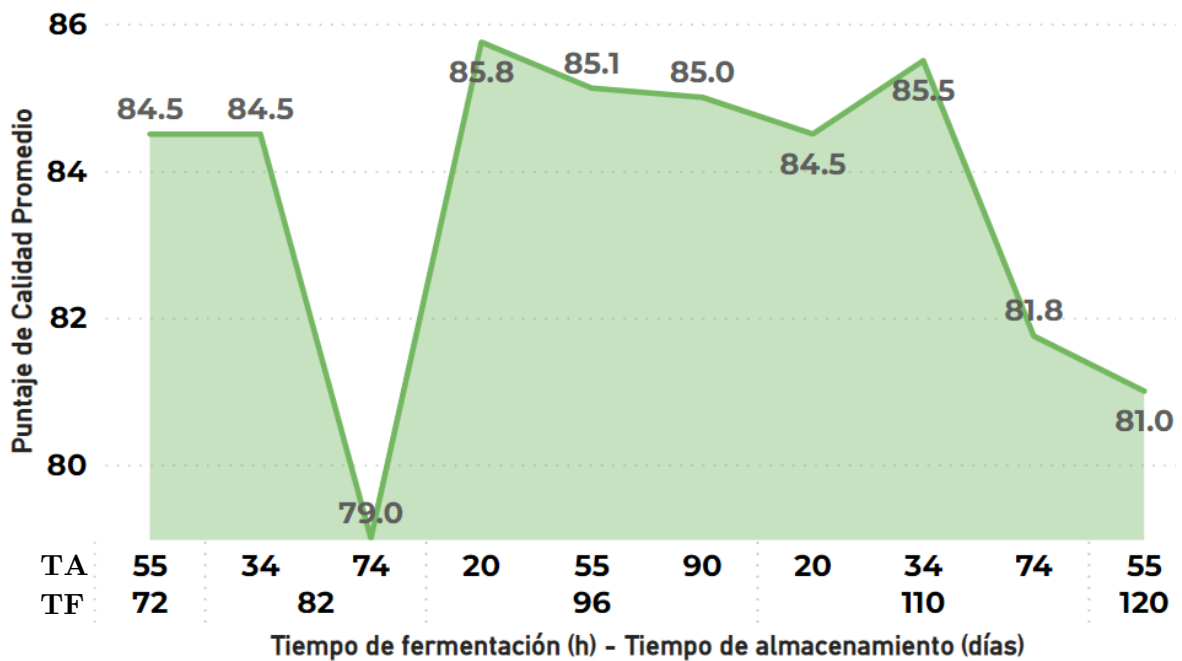
Estos resultados muestran que si bien la relación de estos factores no incide directamente sobre el componente cuantitativo de calidad (puntaje de taza), si tienen una relación sobre las notas o componente cualitativo del mismo, y que son en sí, factores que se deben controlar con el fin de producir cafés con perfiles sensoriales específicos. Importante mencionar que la polisombra, como se evidenció anteriormente, incide directamente en el tiempo de secado, es decir que a mayor referencia de sombrío o porcentaje de sombra mayor es el tiempo de secado.

4.5.2 Fermentación – almacenamiento

Al relacionar el tiempo de fermentación con el tiempo de almacenamiento se obtienen los resultados de calidad mostrados en la Figura 4-16. Aquí se observa, congruente con lo identificado anteriormente, que el tiempo de fermentación que genera mejores resultados de calidad consistentemente es de 96 horas. Sin embargo, a 96 horas de fermentación la pérdida de calidad que sufre el café no es significativa y se establece como un tiempo de fermentación

estable. Así mismo, se observa que el tiempo de almacenamiento es indirectamente proporcional a la calidad, exceptuando el tratamiento de 110 horas de fermentación con 34 días de almacenamiento.

Figura 4-16: Relación entre el tiempo de fermentación y tiempo de almacenamiento en función de la calidad de taza, donde TF: Tiempo de fermentación (h) y TA: Tiempo de almacenamiento (días). Fuente propia.



Al analizar la relación fermentación – almacenamiento en función de las notas generadas, se obtienen los resultados presentados en la Tabla 4-13. En esta se observa que la nota de naranja se presentó en tiempos de fermentación de 82, 96 y 110 horas, a 34, 55 y 20 días de almacenamiento, respectivamente. Así mismo, la nota a fresa es más probable en un café producido con 82 horas de fermentación y 34 días de almacenamiento previo al consumo. Interesantemente como se identificó anteriormente, el café fermentado por 96 horas presentó un deterioro en su calidad mínimo en tiempos de almacenamiento de hasta 90 días. Sin embargo, se observa que su perfil sensorial cambia. Este cambio viene dado por el continuo proceso metabólico en el cual se encuentran los microorganismos presentes en el café, los cuales en los valores de humedad del grano cuentan con actividad reducida (Puerta, 2006). Así mismo, hay que recordar que el grano al ser higroscópico es susceptible a la pérdida o ganancia de humedad, de acuerdo con las condiciones del medio.

Tabla 4-13: Frecuencia de las notas obtenidas de aroma y sabor respecto a tiempos de fermentación (h) y tiempos de almacenamiento (días). Fuente propia.

Nota	Frecuencia de incidencia (%) - Tiempo de fermentación (h) - Tiempo de almacenamiento (días)									
	72		82		96		110		120	
	55	34	74	20	55	90	20	34	74	55
Naranja		8,30%			14,30%		12,50%			
Chocolate negro	16,70%	4,20%			7,10%		8,30%	2,10%	6,30%	
Aromatico		8,30%		16,70%	5,40%	16,70%		2,10%		
Miel				8,30%	5,40%	8,30%		6,30%		
Miel maple		8,30%		8,30%	4,50%	8,30%	4,20%	6,30%		
Fresa		12,50%			4,50%	8,30%	8,30%	8,30%		
Ciruela pasa				8,30%	3,60%		4,20%	8,30%		
Mora					3,60%		4,20%	8,30%		
Melaza	8,30%	2,10%	18,80%		3,60%		4,20%	6,30%		25,00%
Cereza				8,30%	3,60%				6,30%	8,30%
Almendra		8,30%			3,60%			2,10%		
Panela	8,30%		6,30%		2,70%		4,20%	4,20%		
Nuez	4,20%		12,50%		2,70%					
Cascara de naranja					1,80%					
Caramelo		4,20%			1,80%			2,10%		
Miel de Caña					1,80%					
Vegetal					1,80%					8,30%
Manzana					1,80%					

Como se identificó anteriormente, estos resultados muestran que predominantemente el tiempo de almacenamiento es directamente proporcional al deterioro de la calidad. Sin embargo, el tiempo específico en el cual el café comienza a sufrir deterioro de calidad no es el mismo para todos los tratamientos. Por tal motivo es importante establecer procesos que se adecuen a las condiciones agroclimáticas específicas de cada finca.

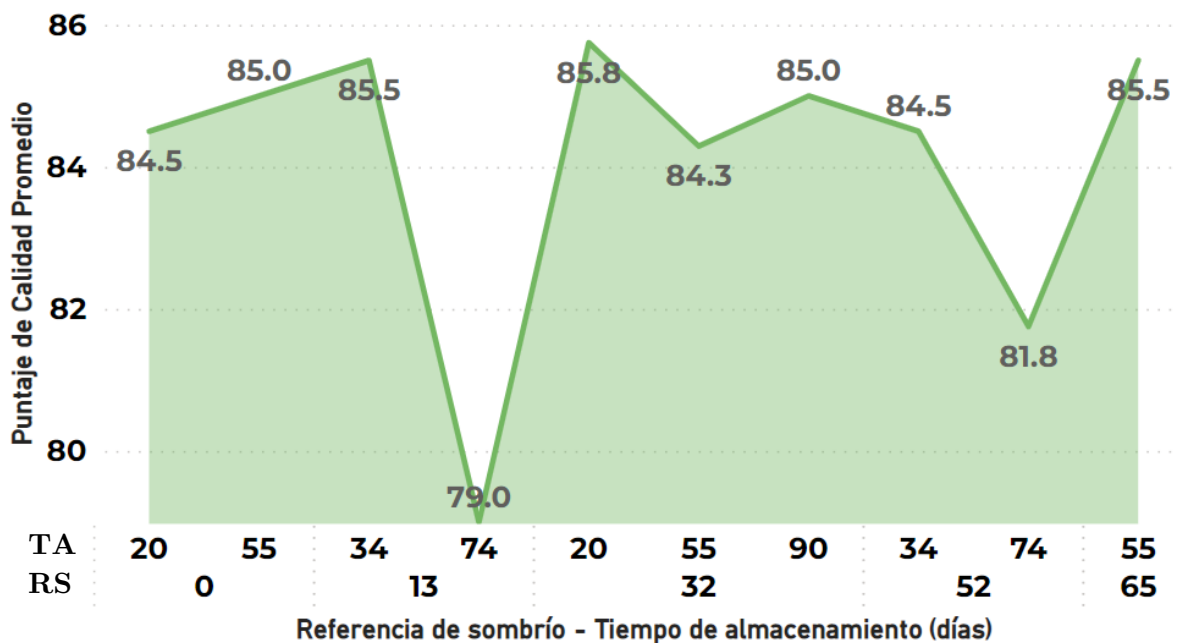
4.5.3 Secado – almacenamiento

A partir de la información mostrada en la Figura 4-17, la cual relaciona las diferentes referencias de polisombra con el tiempo de almacenamiento y el puntaje de calidad de la bebida, se observa que en el secado a libre exposición (S0) el tiempo de almacenamiento favoreció positivamente a la estabilización del café, ya que presentó un incremento en el puntaje de calidad promedio. Sin embargo, este comportamiento no fue transversal a los

otros tratamientos ya que en general el tiempo de almacenamiento es inversamente proporcional a la calidad.

Una posible explicación a los resultados atípicos o inesperados es que el café al secarse más rápido (al estar en libre exposición sin polisombra), requiere de un tiempo de estabilización mayor que el resto de los cafés que presentaron un secado más lento.

Figura 4-17: Relación entre las referencias de polisombras y tiempo de almacenamiento en función de la calidad de taza, donde RS: Referencia de sombrío y TA: Tiempo de almacenamiento (días). Fuente propia.

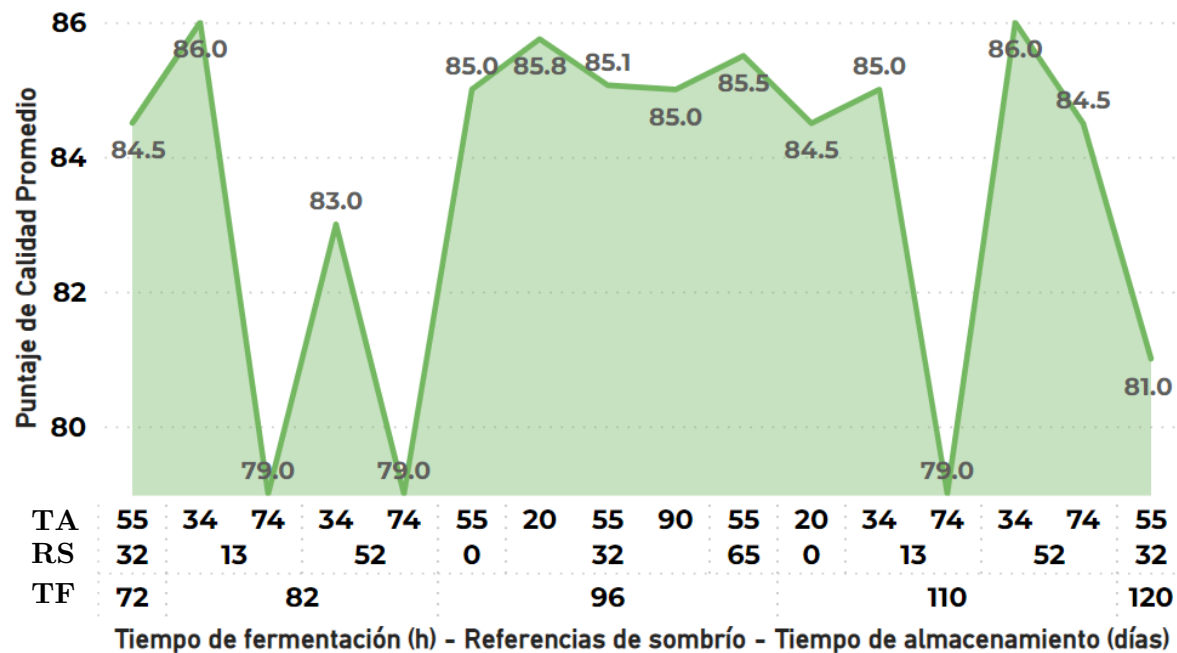


4.5.4 Fermentación – secado – almacenamiento

Finalmente, se presenta la relación de los tres factores de estudio, fermentación, secado y almacenamiento en función de la calidad, Figura 4-18. Se identifica que el café fermentado por 82 horas presentó un deterioro de calidad al ser almacenado por más de 34 días, comportamiento similar al presentado por el café fermentado por 110 horas y secado con la polisombra S13. Estos resultados son interesantes puesto que el café fermentado por 96 horas no evidenció un deterioro de calidad considerable al ser almacenado durante 90 días, lo cual ratifica la estabilidad del café fermentado por 90 horas. Así mismo, se observa que

los mayores puntajes fueron obtenidos por cafés fermentados por 82 y 110 horas, secados con referencias de sombrío S32 y S52 respectivamente con tiempos de almacenamiento de 34 días en ambos casos. Dentro de los cafés fermentados por 96 horas, se identifica que los mejores resultados se obtuvieron con las polisombras S32 y S65, con tiempos de almacenamiento de 20 y 65 días, respectivamente.

Figura 4-18: Relación entre el Tiempo de fermentación (h), referencia de polisombra y tiempo de almacenamiento en función de la calidad de taza, donde TF: Tiempo de fermentación (horas), RS: Referencia de sombrío y TA: Tiempo de almacenamiento (días). Fuente propia.



Dado que los cafés fueron secados hasta llegar a condiciones de humedades similares, de acuerdo con los procesos establecidos, se explica el deterioro acelerado en la calidad de algunos tratamientos durante el almacenamiento a partir de menores tiempos de secado dados por referencias de polisombras con poca generación de sombra, S0 y S13. Esencialmente, altas tasas de extracción de humedad del grano, generadas por altas temperaturas en tiempos prolongados, poniendo en riesgo la integridad de la membrana celular del café, finalmente promoviendo el deterioro de la bebida (Borém et al., 2018)

Al analizar las notas, en relación con la interacción de los tres factores se identifica que, para el tiempo de fermentación de 96 horas, la mayor cantidad de diferentes tipos de notas se presentaron con la polisombra S32, las cuales tienden a reducirse a medida que aumenta el tiempo de almacenamiento, relación inversamente proporcional (Tabla 4-14); sin embargo, en las notas restantes se identifica un incremento en su porcentaje de aparición. Así mismo, es importante recalcar que durante el almacenamiento el café experimenta cambios que alteran su perfil sensorial, notas, atributos, y puntaje de calidad, debido a la continua actividad metabólica de los microorganismos presentes en el café y del continuo proceso de ceder y ganar agua al medio en el cual continúa el producto hasta su consumo.

Tabla 4-14: Frecuencia de las notas obtenidas de aroma y sabor respecto a tiempos de fermentación (h), polisombras y tiempos de almacenamiento (días). Fuente propia.

Nota	Frecuencia de incidencia (%) - Tiempo de fermentación (h) - Referencias de tela de sombrío - Tiempo de almacenamiento (días)																								
	72					82					96					110					120				
	32			13		52		0		32			65		0		13			52		32			
	55	34	74	34	74	55	20	55	90	55	20	34	74	34	74	55									
Aromatico	16,70%						16,70%			6,30%		16,70%		8,30%		4,20%									
Miel maple	8,30%			8,30%				8,30%			4,70%		8,30%		8,30%		4,20%			12,50%					
Miel						8,30%		8,30%		3,10%		8,30%		8,30%					12,50%						
Uva								8,30%										12,50%							
Cereza						8,30%		8,30%		3,10%									12,50%		8,30%				
Ciruela pasa						8,30%		8,30%		3,10%				4,20%		16,70%									
Piña								4,20%																	
Toronja								4,20%																	
Papaya								4,20%																	
Floral								4,20%																	
Tamarindo								4,20%																	
Limón								4,20%		3,10%															
Uchuva								4,20%																	
Mango								4,20%																	
Maracuya								4,20%																	
Vino	16,70%							4,20%		20,80%		12,50%		12,50%			16,70%								
Manzana						8,30%																			
Caña								3,10%																	

Finalmente, el almacenamiento del café es un proceso crítico que afecta significativamente la calidad del producto final. Durante el almacenamiento, el café puede estar expuesto a factores ambientales como la humedad, la temperatura y la luz, que pueden afectar su sabor, aroma y apariencia. Además, el almacenamiento prolongado puede provocar la oxidación de los aceites esenciales del café, lo que puede resultar en una disminución de la calidad del producto (Puerta Quintero, 2015).

Para garantizar la calidad del café durante el almacenamiento, es necesario establecer mecanismos adecuados de control de calidad y gestión de inventario. Esto puede incluir el

uso de sistemas de monitoreo de temperatura y humedad relativa, así como la implementación de prácticas de rotación de inventario para garantizar que el café más antiguo se utilice primero.

5. Conclusiones y recomendaciones

5.1 Conclusiones

Los tres (3) factores estudiados, (tiempo de fermentación, referencias de sombrero en el secado y tiempo de almacenamiento) son críticos para el procesamiento de un café de calidad o de especialidad (valores superiores a 84 puntos según la metodología SCA).

Así mismo, dado que el 76% de los cafés producidos a partir de la implementación de los diferentes tratamientos establecidos en el presente trabajo (los cuales incluyen condiciones críticas de procesamiento) obtuvieron resultados de calidad iguales o superiores a 84 puntos, se concluye que es factible la generación de una metodología de procesamiento de café de especialidad a partir de prácticas de finca de bajo costo, Anexo: Metodología de procesamiento de cafés naturales propuesta.

El tiempo de fermentación de 96 horas se destaca como el más consistente para producir café de especialidad de alta calidad procesado por vía seca. Se encontró una relación inversamente proporcional entre el pH y la calidad del café, y una relación directamente proporcional entre la temperatura y la calidad. Estos hallazgos respaldan la importancia de controlar cuidadosamente la fermentación para obtener café de alta calidad.

El tiempo de secado del café se ve influenciado por el tiempo de fermentación y la polisombra. Un mayor tiempo de fermentación puede reducir el tiempo de secado necesario, mientras que una mayor sombra proporcionada por la polisombra resulta en un mayor tiempo de secado. No se encontró una relación directa entre la polisombra y la calidad del café. El secado a libre exposición puede favorecer notas frutales y cítricas en sabor y aroma. Las condiciones climáticas favorables permitieron tiempos de secado más cortos. Esto beneficia la eficiencia del proceso.

El estudio determinó que el tiempo óptimo de almacenamiento para el café natural procesado por vía seca es de 55 días, equilibrando la estabilización del grano y el deterioro de la calidad. Sin embargo, se observó variabilidad en los tratamientos, con algunos cafés

deteriorándose con períodos de almacenamiento prolongados, mientras que otros mantuvieron o mejoraron ligeramente su calidad inicial.

En general, estos resultados tienen implicaciones importantes para los productores de café y los consumidores de café de alta calidad, y pueden ayudar a mejorar la calidad y la consistencia del café de especialidad en todo el mundo. Además, establecen unas condiciones interesantes para futuras investigaciones en el campo del procesamiento del café y la optimización de los procesos de producción.

5.2 Recomendaciones

Teniendo en cuenta la importancia de las condiciones agroclimáticas, las variabilidades genéticas de las distintas variedades de café, los avances tecnológicos en el campo de la ciencia de datos, la visión artificial y otras disciplinas relacionadas, y en general, la necesidad imperante de establecer estrategias que, mediante la investigación tanto básica como aplicada, faciliten la convergencia entre el sector agropecuario y las tecnologías emergentes de la cuarta revolución industrial, se sugiere lo siguiente:

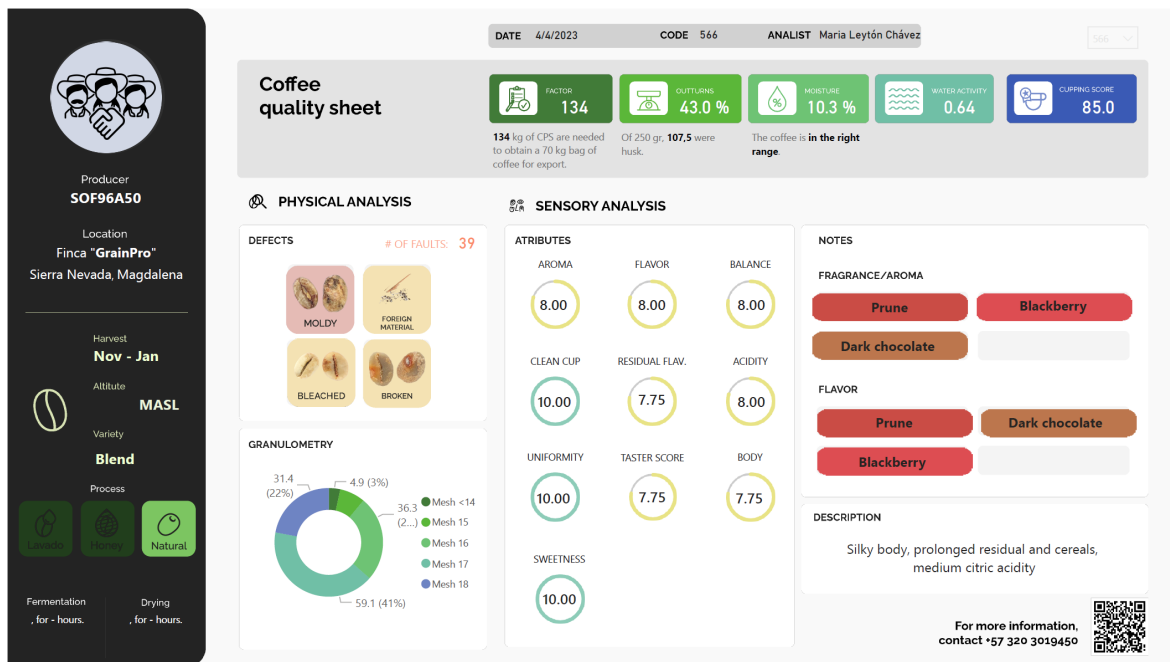
- Incorporar en la metodología la evaluación de las comunidades microbianas y su densidad poblacional en los distintos procesos de beneficiado del café, así como en relación con los factores investigados.
- Replicar el presente estudio en diferentes contextos agroclimáticos con el objetivo de obtener una mayor generalización de los resultados y evaluar la robustez de las conclusiones obtenidas en este estudio inicial.
- Realizar la validación del resultado del procesamiento con las condiciones del punto central presentado en el presente documento a través de réplicas en la misma zona de estudio, con el fin de determinar la efectividad y confiabilidad del modelo propuesto. Esta validación adicional permitirá evaluar la capacidad predictiva y la precisión del modelo en el contexto específico de la zona de estudio, brindando así una mayor garantía y respaldo científico a los resultados obtenidos.
- Establecer un mecanismo de captura de información para aumentar la amplitud del conjunto de datos, lo cual posibilitará la implementación de algoritmos de aprendizaje automático con el fin de generar modelos más precisos de procesamiento de cafés naturales en condiciones agroclimáticas específicas. Esta ampliación del

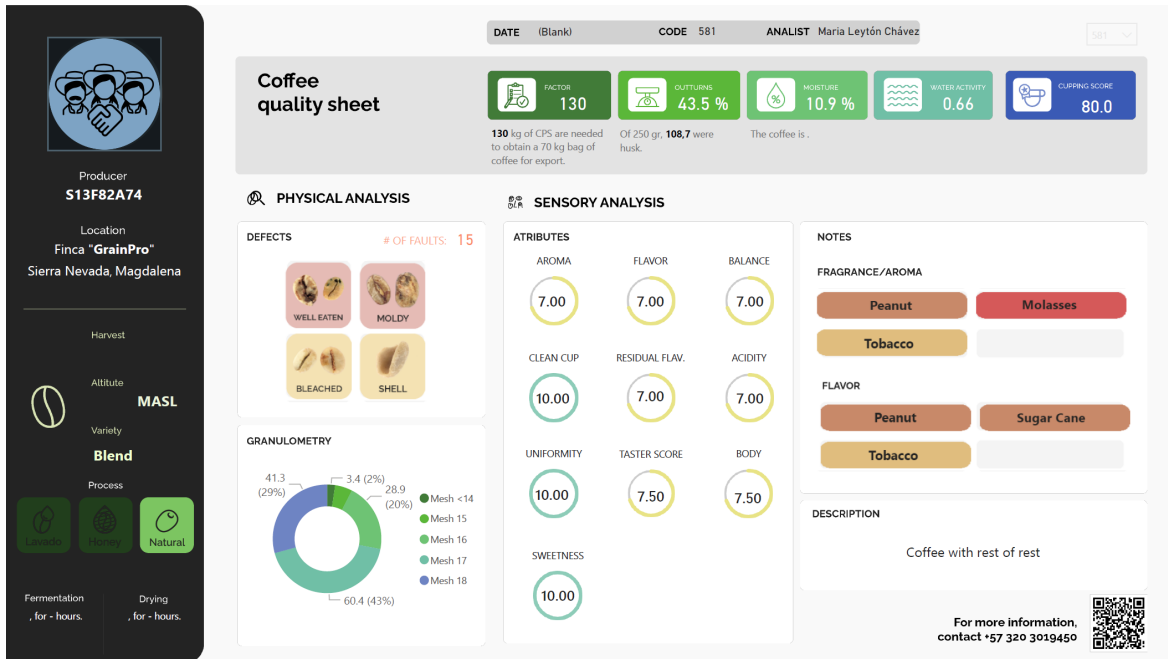
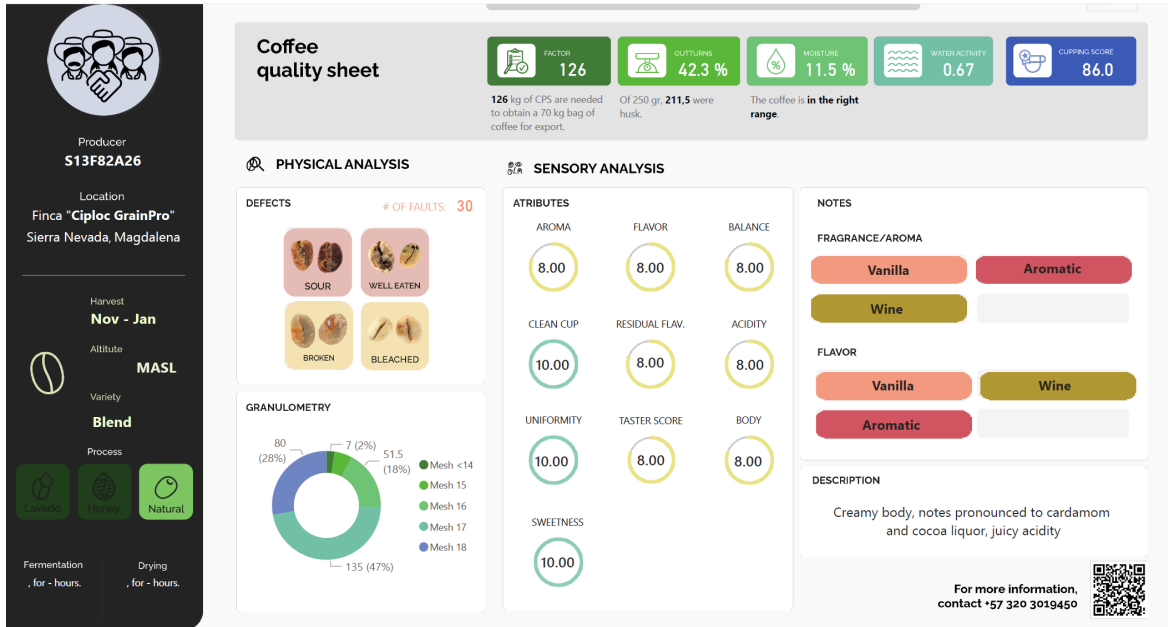
conjunto de datos permitirá capturar una mayor diversidad de variables y considerar un espectro más amplio de factores relevantes para el procesamiento del café. Al utilizar técnicas de aprendizaje de máquina, se podrán identificar patrones y relaciones complejas en los datos, lo que ayudará a desarrollar modelos más sofisticados y precisos para optimizar el procesamiento del café bajo condiciones agroclimáticas particulares.


- Desarrollar y validar mecanismos de transferencia de los resultados obtenidos con el objetivo de facilitar la adopción de los conceptos y prácticas de producción de cafés naturales de especialidad. La transferencia efectiva de conocimiento y la promoción de la producción de cafés de especialidad contribuirán a mejorar la calidad y la competitividad de la industria cafetalera.

A. Anexo: Fichas de calidad de los tratamientos

Se presentan las diferentes fichas de resultados de los análisis de calidad (cataciones) de los cafés del estudio. Estas incluyen análisis de defectos, factor de rendimiento, análisis granulométrico, atributos y perfil sensorial.








Producer
S13F110A26

Location
 Finca "Ciploc GrainPro"
 Sierra Nevada, Magdalena

Harvest
Nov - Jan

Altitude
MASL

Variety
Blend

Process


Fermentation, for - hours. **Drying**, for - hours.


Coffee quality sheet

FACTOR 133	OUTTURNS 42.7 %	MOISTURE 10.5 %	WATER ACTIVITY 0.65	CLIPPING SCORE 85.0
----------------------	---------------------------	---------------------------	-------------------------------	-------------------------------

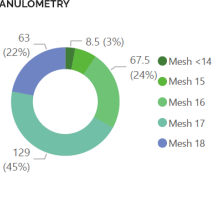
133 kg of CPS are needed to obtain a 70 kg bag of coffee for export. Of 250 gr, 213.5 were husk. The coffee is in the right range.

PHYSICAL ANALYSIS

DEFFECTS # OF FAULTS: 33



GRANULOMETRY



Mesh	Percentage
<14	8.5 (3%)
15	67.5 (24%)
16	129 (45%)
17	63 (22%)
18	8.5 (3%)

SENSORY ANALYSIS

ATRIBUTES

Attribute	Score
AROMA	8.00
FLAVOR	8.00
BALANCE	8.00
CLEAN CUP	10.00
RESIDUAL FLAV.	7.75
ACIDITY	8.00
UNIFORMITY	10.00
TASTER SCORE	7.75
BODY	7.75
SWEETNESS	10.00

NOTES

FRAGRANCE/AROMA


- Blackberry
- Caramel
- Prune
- Molasses


FLAVOR

- Black Tea
- Prune
- Blackberry
- Molasses

DESCRIPTION

Silky body, prolonged residual, tartaric acidity

For more information, contact +57 320 3019450 




Producer
S13F110A74

Location
 Finca "GrainPro"
 Sierra Nevada, Magdalena

Harvest

Altitude
MASL

Variety
Blend

Process


Fermentation, for - hours. **Drying**, for - hours.

DATE (Blank) CODE 579 ANALIST Maria Leytón Chávez 579


Coffee quality sheet

FACTOR 129	OUTTURNS 42.1 %	MOISTURE 9.7 %	WATER ACTIVITY 0.63	CLIPPING SCORE 80.0
----------------------	---------------------------	--------------------------	-------------------------------	-------------------------------

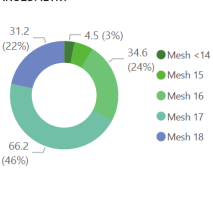
129 kg of CPS are needed to obtain a 70 kg bag of coffee for export. Of 250 gr, 105.2 were husk. The coffee is .

PHYSICAL ANALYSIS

DEFFECTS # OF FAULTS: 24



GRANULOMETRY



Mesh	Percentage
<14	4.5 (3%)
15	34.6 (24%)
16	66.2 (46%)
17	31.2 (22%)
18	4.5 (3%)

SENSORY ANALYSIS

ATRIBUTES

Attribute	Score
AROMA	7.00
FLAVOR	7.00
BALANCE	7.00
CLEAN CUP	10.00
RESIDUAL FLAV.	7.00
ACIDITY	7.00
UNIFORMITY	10.00
TASTER SCORE	7.50
BODY	7.50
SWEETNESS	10.00

NOTES

FRAGRANCE/AROMA


- Paper
- Ferment
- Tobacco


FLAVOR


- Ferment
- Paper
- Wine

DESCRIPTION

Coffee with rest of rest

For more information, contact +57 320 3019450 



Producer
S32F72A50
 Location
 Finca "GrainPro"
 Sierra Nevada, Magdalena
 Harvest
Nov - Jan
 Altitude
MASL
 Variety
Blend
 Process

 Fermentation
 , for - hours.
 Drying
 , for - hours.

DATE 4/4/2023 CODE 564 ANALIST Maria Leytón Chávez


Coffee quality sheet

FACTOR 122 **OUTRIPE 41.2 %** **MOISTURE 10.1 %** **WATER ACTIVITY 0.64** **CUPPING SCORE 84.5**

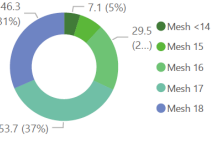
122 kg of CPS are needed to obtain a 70 kg bag of coffee for export. Of 250 gr, 103,0 were husk. The coffee is in the right range.

PHYSICAL ANALYSIS

DEFECTS # OF FAULTS: 10



GRANULOMETRY



Mesh	Percentage
Mesh <14	7.1 (5%)
Mesh 15	29.5 (2...)
Mesh 16	
Mesh 17	
Mesh 18	53.7 (37%)

SENSORY ANALYSIS

AROMA	FLAVOR	BALANCE
8.00	7.75	8.00
CLEAN CUP	RESIDUAL FLAV.	ACIDITY
10.00	7.75	7.75
UNIFORMITY	TASTER SCORE	BODY
10.00	7.75	7.75
SWEETNESS		
10.00		

NOTES

FRAGRANCE/AROMA

Dark chocolate Ferment

Lime

FLAVOR


Dark chocolate Ferment

Lime


DESCRIPTION

Silky body, prolonged residual, citric acidity

For more information, contact +57 320 3019450





Productor
S32F96A11
 303 6965829
 Ubicación
 Finca "Ciploc GrainPro"
 Sierra Nevada, Magdalena
 Cosecha
Nov - Ene
 Altura
msnm
 Variedad
Blend
 Tipo de proceso

 Fermentación
 , por (Blank) horas.
 Secado
 En , por (Blank) horas.

FECHA 06/03/2023 CÓDIGO 519 ANALISTA Maria Leytón C...

Hola, S32F96A11


Esta es la FICHA DE CALIDAD de tu café.

FACTOR 125 **MERMA 41.6 %** **HUMEDAD 11.8 %** **ACTIVIDAD AGUA** **PUNTAJE DE TAZA 85.8**

Se necesitan 125 kg de CPS para 70 kg de café excedo. De 250 gramos, 208,0 gramos fueron cascarrilla. Su café está en el rango Este es el resultado de sumar todos los puntajes de atributos.

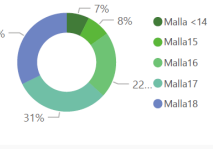
ANÁLISIS FÍSICO

DEFECTOS # DE FALTAS: 28



GRANULOMETRÍA

Los granos que quedan en las mallas 17 y 18 son los más grandes, o sea, de mejor calidad.



Malla	Percentage
Malla <14	7%
Malla 15	8%
Malla 16	
Malla 17	22%
Malla 18	31%

ANÁLISIS SENSORIAL

AROMA	SABOR	BALANCE
8	8,00	8,00
TAZA LIMPIA	SABOR RESIDUAL	ACIDEZ
10,00	7,75	8,00
UNIFORMIDAD	PUNT. CATADOR	DULZOR
10,00	8,00	10,00
CUERPO		
8,00		

NOTAS

AROMA/FRAGANCIA

Miel Aromatico

Toronja Maracuya

SABOR

Aromatico Miel


Limón Tamarindo


DESCRIPCIÓN

Cuerpo Jugoso, Residual prolongado y arático, es un café con acidez pronunciada.

Para resolver sus dudas, hable directamente con un asesor, usando el link o el código QR

wa.link/gkuufq





Producer
S32F96A50 N1

Location
Finca "GrainPro"
Sierra Nevada, Magdalena

Harvest
Nov - Jan

Altitude
MASL

Variety
Blend

Process
Natural

Fermentation
, for - hours.

Drying
, for - hours.

DATE 4/4/2023 CODE 565 ANALIST Maria Leytón Chávez


Coffee quality sheet

FACTOR 121 OUTFURNS 41.2% MOISTURE 12.0% WATER ACTIVITY 0.68 CLIPPING SCORE 85.0

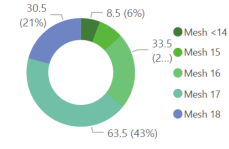
121 kg of CPS are needed to obtain a 70 kg bag of coffee for export. Of 250 gr, 103,0 were husk. The coffee is **in the right range**.

PHYSICAL ANALYSIS

DEFECTS # OF FAULTS: 5



GRANULOMETRY



SENSORY ANALYSIS

ATTRIBUTES

AROMA	FLAVOR	BALANCE
8.00	8.00	8.00
CLEAN CUP	RESIDUAL FLAV.	ACIDITY
10.00	7.75	8.00
UNIFORMITY	TASTER SCORE	BODY
10.00	7.75	7.75
SWEETNESS		
10.00		

NOTES

FRAGRANCE/AROMA

Cherry Orange

Caramel

FLAVOR


Orange Cherry


Caramel

DESCRIPTION

Silky body, prolonged residual, juicy acidity

For more information, contact +57 320 3019450





Producer
S32F96A50 #1

Location
Finca "GrainPro"
Sierra Nevada, Magdalena

Harvest
Nov - Jan

Altitude
MASL

Variety
Blend

Process
Natural

Fermentation
, for - hours.

Drying
, for - hours.

DATE 4/4/2023 CODE 567 ANALIST Maria Leytón Chávez

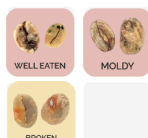
Coffee quality sheet

FACTOR 122 OUTFURNS 41.8% MOISTURE 12.3% WATER ACTIVITY 0.68 CLIPPING SCORE 85.3

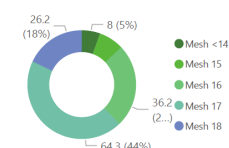
122 kg of CPS are needed to obtain a 70 kg bag of coffee for export. Of 250 gr, 104,4 were husk. The coffee is **too wet**.

PHYSICAL ANALYSIS

DEFECTS # OF FAULTS: 9



GRANULOMETRY



SENSORY ANALYSIS

ATTRIBUTES

AROMA	FLAVOR	BALANCE
8.00	8.00	8.00
CLEAN CUP	RESIDUAL FLAV.	ACIDITY
10.00	7.75	8.00
UNIFORMITY	TASTER SCORE	BODY
10.00	7.75	7.75
SWEETNESS		
10.00		

NOTES

FRAGRANCE/AROMA

Maple syrup Lemon

Dark chocolate

FLAVOR


Maple syrup Lemon

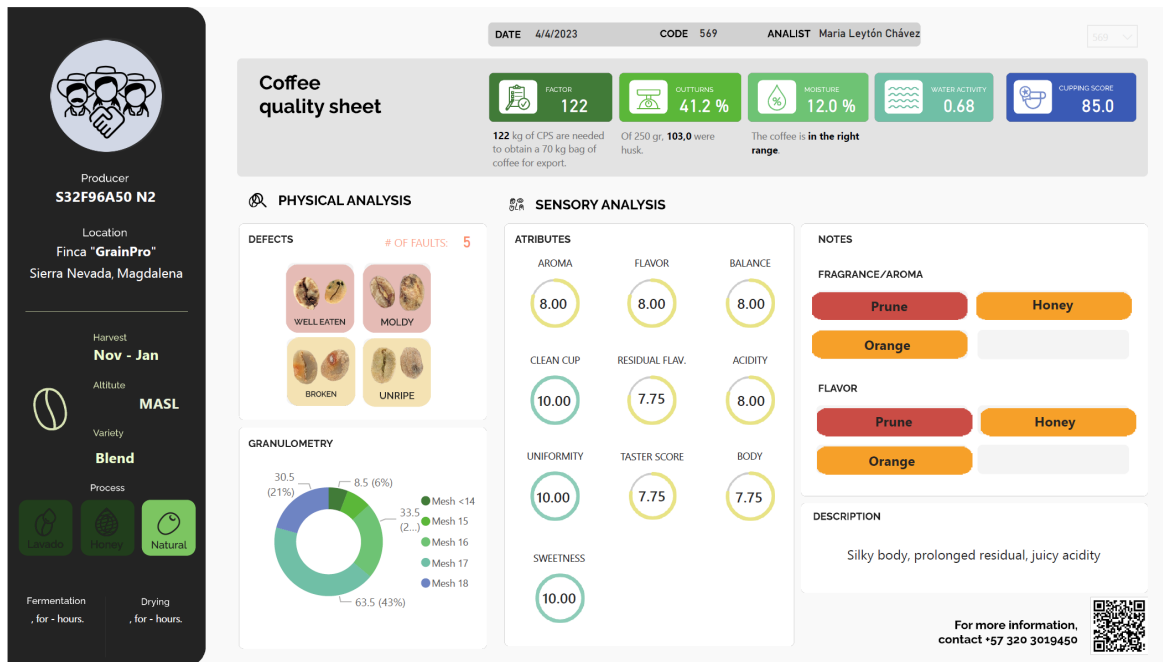
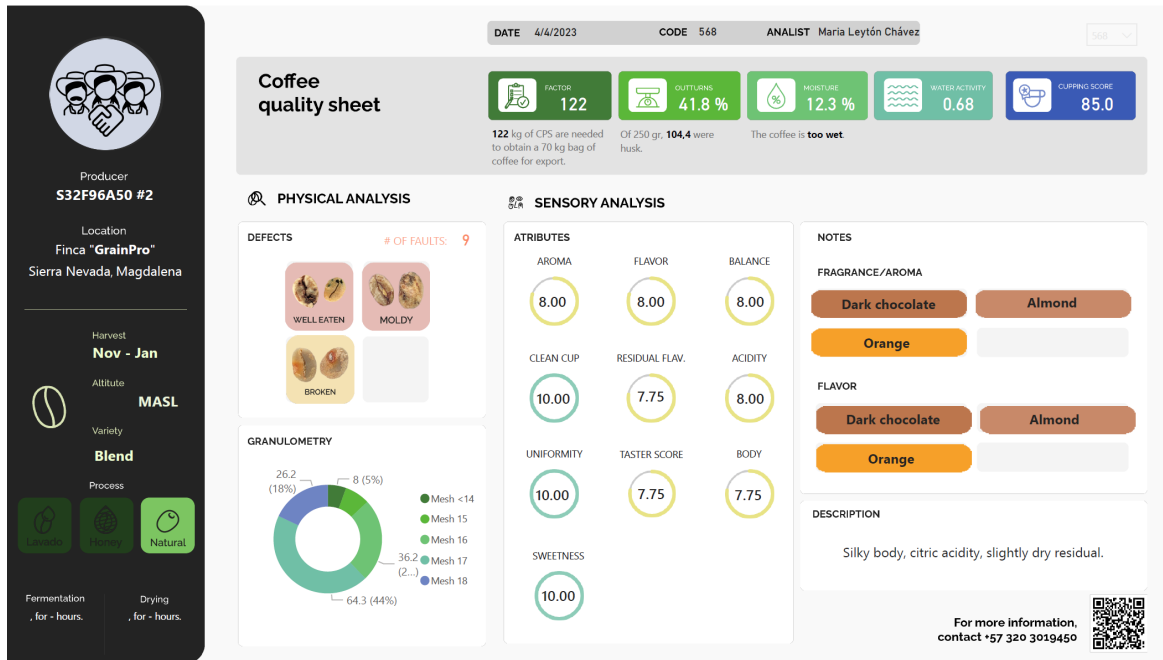
Dark chocolate


DESCRIPTION

Silky body, juicy acidity, prolonged residual

For more information, contact +57 320 3019450







Producer
S32F96A90

Location
Finca "GrainPro"
Sierra Nevada, Magdalena

Harvest
Nov - Jan

Altitude
MASL

Variety
Blend


Process
Washed, Natural

Fermentation
, for - hours.

Drying
, for - hours.


DATE 8/5/2023
CODE 598
ANALIST Maria Leytón Chávez
598

Coffee quality sheet




FACTOR
123

123 kg of CPS are needed to obtain a 70 kg bag of coffee for export.




OUTTURNS
41.2 %

Of 250 gr, 103,0 were husk.




MOISTURE
10.4 %

The coffee is in the right range.




WATER ACTIVITY
0.64




CUPPING SCORE
85.0

PHYSICAL ANALYSIS


DEFECTS # OF FAULTS: 13




WELL EATEN



MOLDY

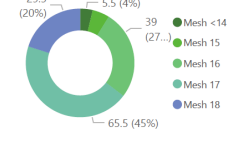


BROKEN



UNRIPE

GRANULOMETRY



Mesh <14	39 (27.3%)
Mesh 15	5.5 (4%)
Mesh 16	29.5 (20%)
Mesh 17	65.5 (45%)
Mesh 18	0 (0%)

SENSORY ANALYSIS

AROMA	FLAVOR	BALANCE
8.00	8.00	8.00
CLEAN CUP	RESIDUAL FLAV.	ACIDITY
10.00	7.75	8.00
UNIFORMITY	TASTER SCORE	BODY
10.00	7.75	7.75
SWEETNESS	10.00	

NOTES

FRAGRANCE/AROMA

Maple syrup Wine

Ferment

FLAVOR


Maple syrup Wine


Ferment

DESCRIPTION

Silky body, prolonged residual, juicy acidity

For more information, contact +57 320 3019450





Producer
S32F120A55

Location
Finca "GrainPro"
Sierra Nevada, Magdalena

Harvest
Nov - Jan

Altitude
MASL

Variety
Blend


Process
Washed, Natural

Fermentation
, for - hours.

Drying
, for - hours.


DATE 4/4/2023
CODE 563
ANALIST Maria Leytón Chávez
563

Coffee quality sheet




FACTOR
127

127 kg of CPS are needed to obtain a 70 kg bag of coffee for export.




OUTTURNS
43.5 %

Of 250 gr, 108,7 were husk.




MOISTURE
10.2 %

The coffee is in the right range.




WATER ACTIVITY
0.64




CUPPING SCORE
81.0

PHYSICAL ANALYSIS


DEFECTS # OF FAULTS: 10




WELL EATEN



MOLDY

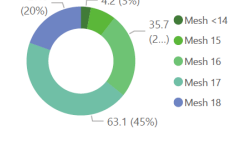


BROKEN



UNRIPE

GRANULOMETRY



Mesh <14	4.2 (3%)
Mesh 15	27.6 (20%)
Mesh 16	35.7 (27.3%)
Mesh 17	63.1 (45%)
Mesh 18	0 (0%)

SENSORY ANALYSIS

AROMA	FLAVOR	BALANCE
7.50	7.25	7.00
CLEAN CUP	RESIDUAL FLAV.	ACIDITY
10.00	7.25	7.25
UNIFORMITY	TASTER SCORE	BODY
10.00	7.25	7.25
SWEETNESS	10.00	

NOTES

FRAGRANCE/AROMA

Wine Paper

Molasses

FLAVOR


Wine Paper

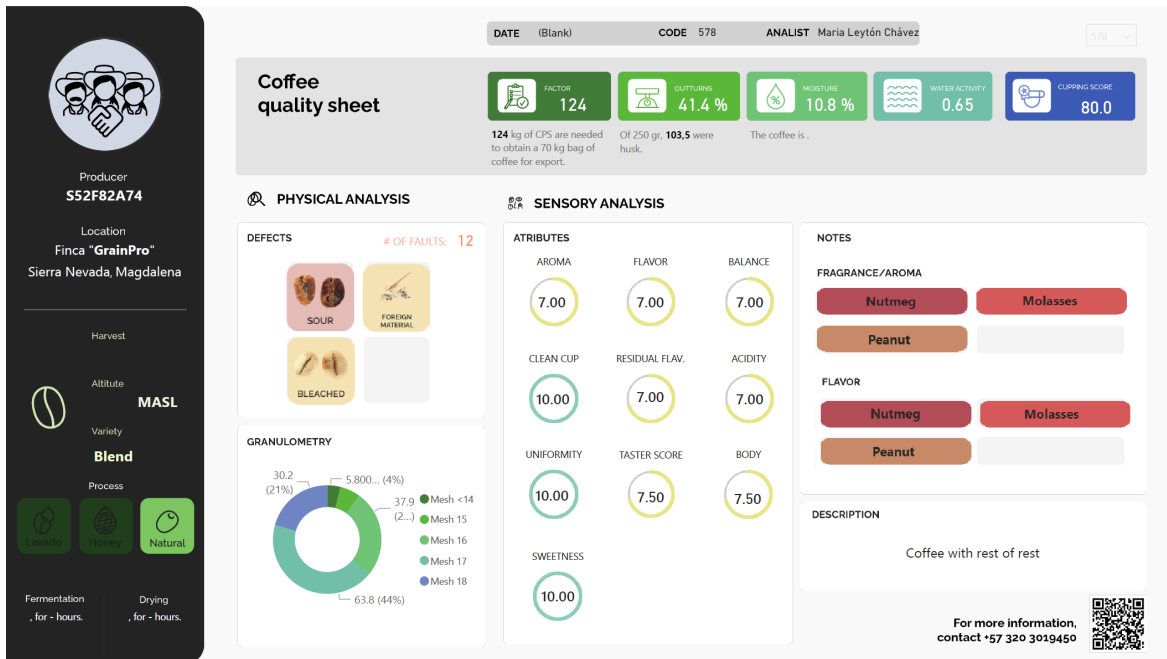
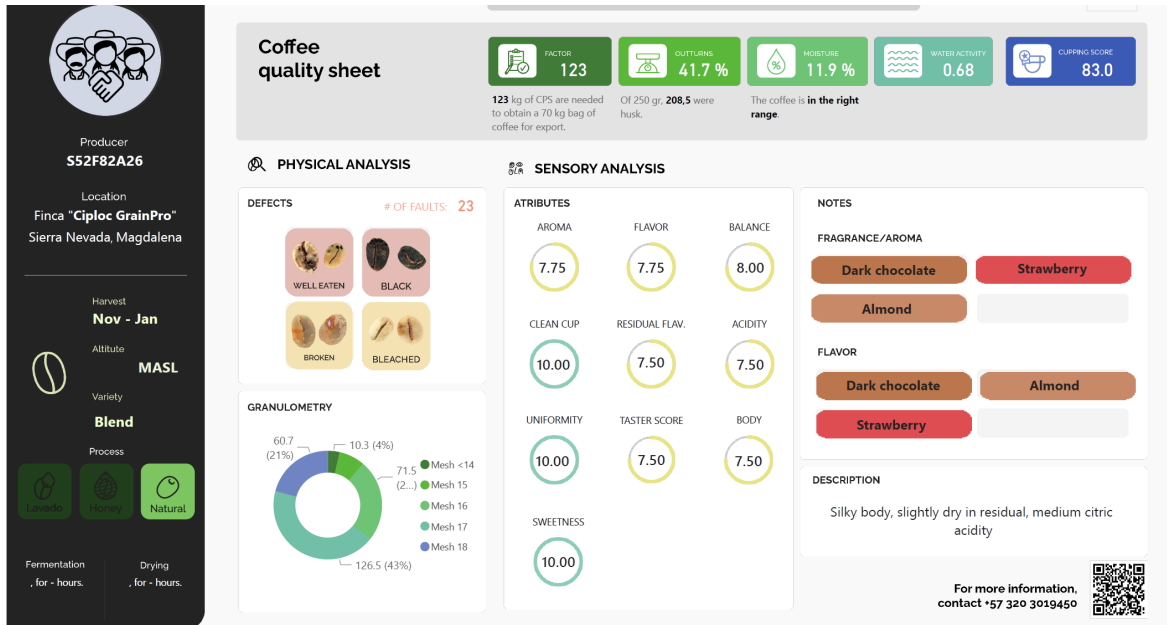
Molasses


DESCRIPTION

Coffee with rest of rest, paperwork, cereals, dry and vegetable in the mouth

For more information, contact +57 320 3019450








Producer
S52F110A26

Location
 Finca "Ciploc GrainPro"
 Sierra Nevada, Magdalena

Harvest
Nov - Jan

Altitude
MASL

Variety
Blend

Process


Fermentation , for - hours. **Drying** , for - hours.

Coffee quality sheet

FACTOR 129	OUTTINGS 43.4 %	MOISTURE 11.8 %	WATER ACTIVITY 0.67	CUPPING SCORE 86.0
----------------------	---------------------------	---------------------------	-------------------------------	------------------------------

129 kg of CPS are needed to obtain a 70 kg bag of coffee for export. Of 250 gr, 205,0 were husk. The coffee is **in the right range**.

PHYSICAL ANALYSIS

DEFECTS # OF FAULTS: 22

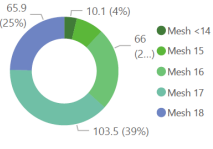
BLACK

WELLEATEN

BLEACHED

BROKEN

GRANULOMETRY



Mesh <14	65.9 (25%)
Mesh 15	10.1 (4%)
Mesh 16	66 (2...)
Mesh 17	103.5 (39%)
Mesh 18	

SENSORY ANALYSIS

ATTRIBUTE	SCORE
AROMA	8.00
FLAVOR	8.00
BALANCE	8.00
CLEAN CUP	10.00
RESIDUAL FLAV.	8.00
ACIDITY	8.00
UNIFORMITY	10.00
TASTER SCORE	8.00
BODY	8.00
SWEETNESS	10.00

NOTES

FRAGRANCE/AROMA

Honey Clove

Cinnamon


FLAVOR


Honey Clove

Cinnamon

DESCRIPTION

Silky body, aromatic and prolonged residual, juicy acidity

For more information, contact +57 320 3019450 




Producer
S52F110A74

Location
 Finca "GrainPro"
 Sierra Nevada, Magdalena

Harvest
Nov - Jan

Altitude
MASL

Variety
Blend

Process


Fermentation , for - hours. **Drying** , for - hours.

DATE (Blank) CODE 580 ANALIST Maria Leytón Chávez 580

Coffee quality sheet

FACTOR 131	OUTTINGS 43.4 %	MOISTURE 11.8 %	WATER ACTIVITY 0.67	CUPPING SCORE 84.5
----------------------	---------------------------	---------------------------	-------------------------------	------------------------------

131 kg of CPS are needed to obtain a 70 kg bag of coffee for export. Of 250 gr, 108,4 were husk. The coffee is **in the right range**.

PHYSICAL ANALYSIS

DEFECTS # OF FAULTS: 16

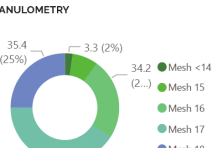
WELLEATEN

MOLDY

BLEACHED

BROKEN

GRANULOMETRY



Mesh <14	35.4 (25%)
Mesh 15	3.3 (2%)
Mesh 16	34.2 (2...)
Mesh 17	
Mesh 18	57.0 (41%)

SENSORY ANALYSIS

ATTRIBUTE	SCORE
AROMA	8.00
FLAVOR	7.75
BALANCE	8.00
CLEAN CUP	10.00
RESIDUAL FLAV.	7.75
ACIDITY	7.75
UNIFORMITY	10.00
TASTER SCORE	7.75
BODY	7.75
SWEETNESS	10.00

NOTES

FRAGRANCE/AROMA

Grapes Dark chocolate

Cinnamon


FLAVOR

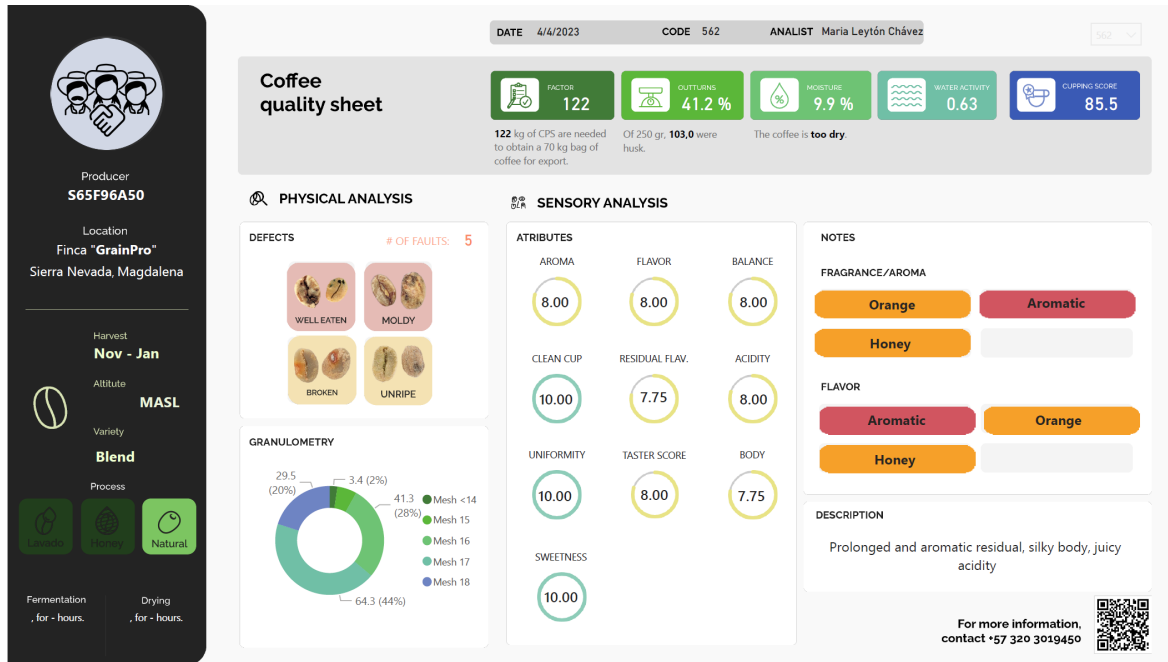
Cinnamon Cherry

Chocolate

DESCRIPTION

Prolonged residual, silky body and juicy acidity

For more information, contact +57 320 3019450 



B. Anexo: Análisis estadístico

Se presenta el análisis estadístico realizado con el lenguaje R y el entorno de programación RStudio. En este apartado se presenta el código y los resultados obtenidos, así como una explicación del proceso de toma de decisiones.

1. Importar librerías

```
{r}
library("readxl")
library("rsm")
library("plot3D")
```

2. Leer la data de la hoja de excel

```
{r}
my_data <- read_excel("cataciones.xlsx", sheet = "Ranalysis")
```

3. Organizar variables y garantizar que sean números, para posterior creación del conjunto de datos

3b. Impresión del conjunto de datos.

```
{r}
#Variables como numerico y cambio de nombres

FermentacionSC <- as.numeric(my_data$FermentacionSC)
SecadoSC <- as.numeric(my_data$SecadoSC)
AlmacenamientoSC <- as.numeric(my_data$AlmacenamientoSC)

Fermentacion <- as.numeric(my_data$Fermentacion)
Secado <- as.numeric(my_data$Secado)
Almacenamiento <- as.numeric(my_data$Almacenamiento)
Fer2 <- as.numeric(my_data$Fermentacion2)
Sec2 <- as.numeric(my_data$Secado2)
Alm2 <- as.numeric(my_data$Almacenamiento2)

FerSec <- as.numeric(my_data$`Fermentacion-Secado`)
FerAlm <- as.numeric(my_data$`Fermentacion-Almacenamiento`)
SecAlm <- as.numeric(my_data$`Secado-Almacenamiento`)
Calidad <- as.numeric(my_data$Calidad)

# Creacion de dataframe
datos<-data.frame(Fermentacion, Secado,Almacenamiento, Fer2, Sec2, Alm2,FerSec
,FerAlm, secAlm, Calidad)

#Impresion de tabla resumen
print.data.frame(datos)

rm(my_data)
```

	Fermentacion	Secado	Almacenamiento	Fer2	Sec2	Alm2	FerSec	FerAlm
SecAlm	Calidad							
1	-1.000	-1.000	-1.000	1.000000	1.000000	1.000000	1	1
1	86.00							
2	1.000	-1.000	-1.000	1.000000	1.000000	1.000000	-1	-1
1	85.00							
3	-1.000	1.000	-1.000	1.000000	1.000000	1.000000	-1	1
-1	83.00							
4	1.000	1.000	-1.000	1.000000	1.000000	1.000000	1	-1
-1	86.00							
5	-1.000	-1.000	1.000	1.000000	1.000000	1.000000	1	-1
-1	80.00							
6	1.000	-1.000	1.000	1.000000	1.000000	1.000000	-1	1
-1	80.00							
7	-1.000	1.000	1.000	1.000000	1.000000	1.000000	-1	-1
1	80.00							
8	1.000	1.000	1.000	1.000000	1.000000	1.000000	1	1
1	84.50							
9	-1.682	0.000	0.000	2.829124	0.000000	0.000000	0	0
0	84.50							

4. Se construye la ecuación para identificar las significancias de los parámetros A partir del p-valor, el primero en ser descartado del modelo por su baja significancia es Fermentación

```
{r}
ej.rsm0 <- rsm(Calidad ~ FO(Fermentacion, Secado,Almacenamiento, Fer2, Sec2, Alm2
,FerSec,FerAlm, SecAlm) , data = datos)
summary(ej.rsm0)
```

Call:
rsm(formula = Calidad ~ FO(Fermentacion, Secado, Almacenamiento, Fer2, Sec2, Alm2, FerSec, FerAlm, SecAlm), data = datos)

	Estimate	Std. Error	t value	Pr(> t)	
(Intercept)	85.128010	0.920376	92.4927	2.084e-13	***
Fermentacion	0.044881	0.498805	0.0900	0.93052	
Secado	0.244614	0.498805	0.4904	0.63702	
Almacenamiento	-1.227207	0.498805	-2.4603	0.03930	*
Fer2	-1.111570	0.518231	-2.1449	0.06428	.
Sec2	-0.227904	0.518231	-0.4398	0.67174	
Alm2	-0.183721	0.518231	-0.3545	0.73212	
FerSec	1.062500	0.651753	1.6302	0.14170	
FerAlm	0.312500	0.651753	0.4795	0.64443	
SecAlm	0.812500	0.651753	1.2466	0.24779	

Signif. codes: 0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

Multiple R-squared: 0.6574, Adjusted R-squared: 0.2721
F-statistic: 1.706 on 9 and 8 DF, p-value: 0.2318

Analysis of Variance Table

Response: Calidad

	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)
FO(Fermentacion, Secado, Almacenamiento, Fer2, Sec2, Alm2, FerSec, FerAlm, SecAlm)	9	52.175	5.7972	1.7059	0.2317742
Residuals	8	27.186	3.3983		
Lack of fit	5	27.139	5.4278	347.3815	0.0002427
Pure error	3	0.047	0.0156		

Direction of steepest ascent (at radius 1):

	Fermentacion	Secado	Almacenamiento	Fer2	Sec2
Alm2					
FerSec	0.02053706	0.11193203	-0.56155304	-0.50863917	-0.10428594

5. Se procede a construir el modelo y se identifica que el parámetro con menor significancia es el cuadrado del almacenamiento, por lo cual se descarta y se parametriza el modelo

```
{r}
ej.rsm1 <- rsm(Calidad ~ FO(Secado,Almacenamiento, Fer2, Sec2, Alm2,FerSec,FerAlm,
SecAlm) , data = datos)
summary(ej.rsm1)
```

Call:

```
rsm(formula = Calidad ~ FO(Secado, Almacenamiento, Fer2, Sec2,
  Alm2, FerSec, FerAlm, SecAlm), data = datos)
```

	Estimate	Std. Error	t value	Pr(> t)	
(Intercept)	85.12801	0.86818	98.0537	6.054e-15	***
Secado	0.24461	0.47052	0.5199	0.61569	
Almacenamiento	-1.22721	0.47052	-2.6082	0.02835	*
Fer2	-1.11157	0.48884	-2.2739	0.04905	*
Sec2	-0.22790	0.48884	-0.4662	0.65214	
Alm2	-0.18372	0.48884	-0.3758	0.71575	
FerSec	1.06250	0.61479	1.7282	0.11801	
FerAlm	0.31250	0.61479	0.5083	0.62346	
SecAlm	0.81250	0.61479	1.3216	0.21891	

Signif. codes: 0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

Multiple R-squared: 0.6571, Adjusted R-squared: 0.3523

F-statistic: 2.156 on 8 and 9 DF, p-value: 0.1369

Analysis of Variance Table

Response: Calidad

Mean Sq	F value	Pr(>F)	Df	Sum Sq	
FO(Secado, Almacenamiento, Fer2, Sec2, Alm2, FerSec, FerAlm, SecAlm)	8	52.148	6.5184	2.1558	0.1369
Residuals	9	27.214	3.0237		
Lack of fit	5	21.042	4.2083	2.7274	0.1762
Pure error	4	6.172	1.5430		

Direction of steepest ascent (at radius 1):

	Secado	Almacenamiento	Fer2	Sec2	Alm2
FerSec					
	0.11195564	-0.56167150	-0.50874647	-0.10430794	-0.08408601

6. Se identifica el cuadrado del secado como el parámetro con menor significancia por lo cual es descartado y se parametriza el modelo

```
{r}
ej.rsm2 <- rsm(Calidad ~ FO(Secado,Almacenamiento, Fer2, Sec2,FerSec,FerAlm, SecAlm
), data = datos)
summary(ej.rsm2)
```

Call:
rsm(formula = Calidad ~ FO(Secado, Almacenamiento, Fer2, Sec2, FerSec, FerAlm, SecAlm), data = datos)

	Estimate	Std. Error	t value	Pr(> t)
(Intercept)	84.93018	0.66009	128.6640	< 2e-16 ***
Secado	0.24461	0.44986	0.5438	0.59852
Almacenamiento	-1.22721	0.44986	-2.7280	0.02127 *
Fer2	-1.07307	0.45700	-2.3481	0.04077 *
Sec2	-0.18941	0.45700	-0.4145	0.68729
FerSec	1.06250	0.58780	1.8076	0.10080
FerAlm	0.31250	0.58780	0.5316	0.60658
SecAlm	0.81250	0.58780	1.3823	0.19698

Signif. codes: 0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

Multiple R-squared: 0.6517, Adjusted R-squared: 0.4079
F-statistic: 2.673 on 7 and 10 DF, p-value: 0.07724

Analysis of Variance Table

Response: Calidad

	Df	Sum Sq	Mean Sq	F	Pr(>F)
FO(Secado, Almacenamiento, Fer2, Sec2, FerSec, FerAlm, SecAlm)	7	51.720	7.3886	2.6731	0.07724
Residuals	10	27.641	2.7641		
Lack of fit	6	21.469	3.5781	2.3190	0.21754
Pure error	4	6.172	1.5430		

Direction of steepest ascent (at radius 1):

	Secado	Almacenamiento	Fer2	Sec2	FerSec
FerAlm					
	0.11355985	-0.56971966	-0.49816384	-0.08793013	0.49325587
	0.14507525	0.37719566			

7. Se identifica la interacción de Fermentación - Almacenamiento como la de menor significancia por cual se descarta y se parametriza el modelo. Nótese que el R2 no presenta una variación considerable durante las parametrizaciones

```
{r}
ej.rsm3 <- rsm(Calidad ~ FO(Secado,Almacenamiento, Fer2,FerSec,FerAlm, SecAlm) ,
data = datos)
summary(ej.rsm3)
```

Call:

```
rsm(formula = Calidad ~ FO(Secado, Almacenamiento, Fer2, FerSec,
  FerAlm, SecAlm), data = datos)
```

	Estimate	Std. Error	t value	Pr(> t)	
(Intercept)	84.76156	0.49986	169.5723	< 2e-16	***
Secado	0.24461	0.43259	0.5655	0.58311	
Almacenamiento	-1.22721	0.43259	-2.8369	0.01617	*
Fer2	-1.04026	0.43282	-2.4035	0.03502	*
FerSec	1.06250	0.56524	1.8797	0.08687	.
FerAlm	0.31250	0.56524	0.5529	0.59141	
SecAlm	0.81250	0.56524	1.4374	0.17842	

Signif. codes: 0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

Multiple R-squared: 0.6457, Adjusted R-squared: 0.4525
F-statistic: 3.342 on 6 and 11 DF, p-value: 0.03988

Analysis of Variance Table

Response: Calidad

	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)
FO(Secado, Almacenamiento, Fer2, FerSec, FerAlm, SecAlm)	6	51.246	8.5409	3.3416	0.03988
Residuals	11	28.115	2.5560		
Lack of fit	7	21.944	3.1348	2.0317	0.25727
Pure error	4	6.172	1.5430		

Direction of steepest ascent (at radius 1):

	Secado	Almacenamiento	Fer2	FerSec	FerAlm
SecAlm	0.1148698	-0.5762914	-0.4885011	0.4989456	0.1467487
	0.3815467				

8. Se descarta el parámetro secado por su baja significancia. Posteriormente se parametriza el modelo con los factores restantes

```
{r}
ej.rsm4 <- rsm(Calidad ~ FO(Secado,Almacenamiento, Fer2,FerSec, SecAlm) , data =
datos)
summary(ej.rsm4)
```

```
Call:
rsm(formula = Calidad ~ FO(Secado, Almacenamiento, Fer2, FerSec,
  SecAlm), data = datos)

Estimate Std. Error t value Pr(>|t|)
(Intercept) 84.76156 0.48518 174.7019 < 2e-16 ***
Secado      0.24461 0.41989 0.5826 0.57097
Almacenamiento -1.22721 0.41989 -2.9227 0.01278 *
Fer2        -1.04026 0.42011 -2.4762 0.02916 *
FerSec      1.06250 0.54864 1.9366 0.07670 .
SecAlm      0.81250 0.54864 1.4809 0.16440
---
Signif. codes:  0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

Multiple R-squared: 0.6359, Adjusted R-squared: 0.4842
F-statistic: 4.191 on 5 and 12 DF, p-value: 0.01953

Analysis of Variance Table

Response: Calidad

              Df Sum Sq Mean Sq F value Pr(>F)
FO(Secado, Almacenamiento, Fer2, FerSec, SecAlm) 5 50.464 10.0929 4.1913 0.01953
Residuals                                         12 28.897 2.4081
Lack of fit                                       8 22.725 2.8406 1.8410 0.29075
Pure error                                        4 6.172 1.5430

Direction of steepest ascent (at radius 1):
      Secado Almacenamiento      Fer2      FerSec      SecAlm
0.1161270   -0.5825988   -0.4938476   0.5044064   0.3857226

Corresponding increment in original units:
      Secado Almacenamiento      Fer2      FerSec      SecAlm
0.1161270   -0.5825988   -0.4938476   0.5044064   0.3857226
```

9. Se descarta la interacción Secado - Almacenamiento por su baja significancia para posterior parametrización del modelo.

```
{r}
#Mejor Resultado
ej.rsm5 <- rsm(Calidad ~ FO(Almacenamiento, Fer2, FerSec, SecAlm) , data = datos)
summary(ej.rsm5)
```

Call:
rsm(formula = Calidad ~ FO(Almacenamiento, Fer2, FerSec, SecAlm),
data = datos)

	Estimate	Std. Error	t value	Pr(> t)
(Intercept)	84.76156	0.47269	179.3174	< 2e-16 ***
Almacenamiento	-1.22721	0.40908	-2.9999	0.01024 *
Fer2	-1.04026	0.40929	-2.5416	0.02458 *
FerSec	1.06250	0.53452	1.9878	0.06832 .
SecAlm	0.81250	0.53452	1.5201	0.15244

Signif. codes: 0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

Multiple R-squared: 0.6256, Adjusted R-squared: 0.5104
F-statistic: 5.43 on 4 and 13 DF, p-value: 0.008541

Analysis of Variance Table

Response: Calidad

	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)
FO(Almacenamiento, Fer2, FerSec, SecAlm)	4	49.647	12.4118	5.4302	0.008541
Residuals	13	29.714	2.2857		
Lack of fit	7	23.370	3.3386	3.1577	0.091238
Pure error	6	6.344	1.0573		

Direction of steepest ascent (at radius 1):

Almacenamiento	Fer2	FerSec	SecAlm
-0.5865673	-0.4972116	0.5078423	0.3883500

Corresponding increment in original units:

Almacenamiento	Fer2	FerSec	SecAlm
-0.5865673	-0.4972116	0.5078423	0.3883500

10. Se obtienen los parámetros para el modelo con p-valor del 10%

```
{r}
ej.rsm6 <- rsm(Calidad ~ FO(Almacenamiento, Fer2, FerSec) , data = datos)
summary(ej.rsm6)
```

Call:
rsm(formula = Calidad ~ FO(Almacenamiento, Fer2, FerSec), data = datos)

	Estimate	Std. Error	t value	Pr(> t)	
(Intercept)	84.76156	0.49432	171.4710	< 2e-16	***
Almacenamiento	-1.22721	0.42780	-2.8686	0.01239	*
Fer2	-1.04026	0.42802	-2.4304	0.02912	*
FerSec	1.06250	0.55898	1.9008	0.07812	.

Signif. codes: 0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

Multiple R-squared: 0.559, Adjusted R-squared: 0.4645
F-statistic: 5.916 on 3 and 14 DF, p-value: 0.007977

Analysis of Variance Table

Response: Calidad

	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)
FO(Almacenamiento, Fer2, FerSec)	3	44.366	14.7886	5.9163	0.007977
Residuals	14	34.995	2.4997		
Lack of fit	4	16.526	4.1316	2.2371	0.137608
Pure error	10	18.469	1.8469		

Direction of steepest ascent (at radius 1):

Almacenamiento	Fer2	FerSec
-0.6365270	-0.5395606	0.5510968

Corresponding increment in original units:

Almacenamiento	Fer2	FerSec
-0.6365270	-0.5395606	0.5510968

11. Creación del modelo a partir de los parámetros finales obtenidos, los cuales son Almacenamiento, cuadrado de fermentación y la interacción Fermentación - Secado

```
{r}
modelo.lm = lm (Calidad ~ Almacenamiento + Fer2 + FerSec)
summary(modelo.lm)
```

Call:
lm(formula = Calidad ~ Almacenamiento + Fer2 + FerSec)

Residuals:

Min	1Q	Median	3Q	Max
-3.5566	-0.8691	0.2384	0.6759	2.6815

Coefficients:

	Estimate	Std. Error	t value	Pr(> t)
(Intercept)	84.7616	0.4943	171.471	<2e-16 ***
Almacenamiento	-1.2272	0.4278	-2.869	0.0124 *
Fer2	-1.0403	0.4280	-2.430	0.0291 *
FerSec	1.0625	0.5590	1.901	0.0781 .

Signif. codes: 0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

Residual standard error: 1.581 on 14 degrees of freedom
Multiple R-squared: 0.559, Adjusted R-squared: 0.4645
F-statistic: 5.916 on 3 and 14 DF, p-value: 0.007977

12. Se calculan los F críticos a partir de los grados de libertad obtenidos del Análisis de Varianza y la probabilidad

```
{r}
f_crt1 <- qf(0.1,3, 14, lower.tail=F) # calculo F_critico
f_crt1

f_crt2 <- qf(0.1,4, 10, lower.tail=F) # calculo F_critico
f_crt2
```

[1] 2.522224
[1] 2.605336

13. Construcción de gráficos de contorno y superficies de respuesta de las diferentes interacciones obtenidas.

```
{r}

nAlmacenamiento <- 20
nFermentacionC <- 20
nFerSec <- 20

Almacenamiento = seq(-2,2,length = nAlmacenamiento)
FermentacionC = seq(-2,2,length = nFermentacionC)
FerSec = seq(-2,2,length = nFerSec)

b0=modelo.lm$coe[1]
b1=modelo.lm$coe[2]
b2=modelo.lm$coe[3]
b3=modelo.lm$coe[4]

# Almacenamiento - FermentacionC

f1=function(Almacenamiento,FermentacionC){z1<-(b0 + b1*Almacenamiento^2 + b2
*FermentacionC)}
z1= outer(Almacenamiento,FermentacionC,f1)

contour2D(x = Almacenamiento, y = FermentacionC, z = z1,xlab='Almacenamiento
(Codificado)',ylab='FermentacionC (Codificado)', clab = "Calidad")
image2D(x = Almacenamiento, y = FermentacionC, z = z1,xlab='Almacenamiento
(Codificado)',ylab='FermentacionC (Codificado)', clab = "Calidad")
persp3D(x=Almacenamiento, y = FermentacionC, z=z1, ticktype = "detailed", phi = 15,
theta = -45, xlab='Almacenamiento (Codificado)',ylab='FermentacionC (Codificado)',
zlab = "Calidad",clab = "Calidad", image=TRUE,cex.axis=0.75,cex.lab=0.75,border
="black", lwd=0.3)

# Almacenamiento - Fermentación - Secado

f1=function(Almacenamiento,FerSec){z1<-(b0 + b1*Almacenamiento^2 + b3*FerSec)}
z1= outer(Almacenamiento,FerSec,f1)

contour2D(x = Almacenamiento, y = FerSec, z = z1,xlab='Almacenamiento (Codificado)'
,ylab='Fermentación - Secado (Codificado)', clab = "Calidad")
image2D(x = Almacenamiento, y = FerSec, z = z1,xlab='Almacenamiento (Codificado)'
,ylab='Fermentación - Secado (Codificado)', clab = "Calidad")
persp3D(x=Almacenamiento, y = FerSec, z=z1, ticktype = "detailed", phi = 15, theta
= 130, xlab='Almacenamiento (Codificado)',ylab='Fermentación - Secado (Codificado)'
, zlab = "Calidad",clab = "Calidad", image=TRUE,cex.axis=0.75,cex.lab=0.75,border
="black", lwd=0.3)

# Fermentacion2 - Fermentación - Secado

f1=function(FermentacionC,FerSec){z1<-(b0 + b2*FermentacionC^2 + b3*FerSec)}
z1= outer(FermentacionC,FerSec,f1)

contour2D(x = FermentacionC, y = FerSec, z = z1,xlab='FermentacionC (Codificado)'
,ylab='Fermentación - Secado (Codificado)', clab = "Calidad")
image2D(x = FermentacionC, y = FerSec, z = z1,xlab='FermentacionC (Codificado)'
,ylab='Fermentación - Secado (Codificado)', clab = "Calidad")
persp3D(x=Almacenamiento, y = FerSec, z=z1, ticktype = "detailed", phi = 15, theta
= 130, xlab='FermentacionC (Codificado)',ylab='Fermentación - Secado (Codificado)'
, zlab = "Calidad",clab = "Calidad", image=TRUE,cex.axis=0.75,cex.lab=0.75,border
="black", lwd=0.3)
```

14. Análisis de comparaciones múltiples (Dunnett)

```

```{r}
data <- read_excel("cataciones.xlsx", sheet = "dunnet")

Referencia <- as.factor(data$Referencia)
Calidad <- as.numeric(data$Calidad)

d_data <- data.frame(Referencia,Calidad)
```

```{r}
anova_dunnet <- aov(Calidad ~ Referencia, data = d_data)
summary(anova_dunnet)
```

      Df Sum Sq Mean Sq F value Pr(>F)
Referencia 14  79.31   5.665   362.6 0.00021 ***
Residuals   3   0.05   0.016
---
Signif. codes:  0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

```{r}
library(DescTools)
```

```{r}
levels(Referencia)
Referencia <- relevel(Referencia, ref="S32F96A55") #~para tomar como tratamiento testigo la base de comparación
levels(Referencia) # el orden de los niveles es cambiado
DunnettTest(x=d_data$Calidad, Referencia,conf.level=0.9)
```

[1] "S32F96A55" "S0F96A55" "S13F110A34" "S13F110A76" "S13F82A34" "S13F82A76"
[1] "S32F96A55" "S0F96A55" "S13F110A34" "S13F110A76" "S13F82A34" "S13F82A76"

Dunnett's test for comparing several treatments with a control :
90% family-wise confidence level

$S32F96A55
      diff      lwr.ci      upr.ci      pval
S0F96A55-S32F96A55 -0.0625 -0.77031302  0.645313 0.99991
S13F110A34-S32F96A55 -0.0625 -0.77031302  0.645313 0.99991
S13F110A76-S32F96A55 -5.0625 -5.77031302 -4.354687 0.00031 ***
S13F82A34-S32F96A55  0.9375  0.22968698  1.645313 0.03823 *
S13F82A76-S32F96A55 -5.0625 -5.77031302 -4.354687 0.00027 ***
S32F120A55-S32F96A55 -4.0625 -4.77031302 -3.354687 0.00057 ***
S32F72A55-S32F96A55 -0.5625 -1.27031302  0.145313 0.14595
S32F96A20-S32F96A55  0.6875 -0.02031302  1.395313 0.08809 .
S32F96A90-S32F96A55 -0.0625 -0.77031302  0.645313 0.99990
S52F110A34-S32F96A55  0.9375  0.22968698  1.645313 0.03817 *
S52F110A76-S32F96A55 -0.5625 -1.27031302  0.145313 0.14574
S52F82A34-S32F96A55 -2.0625 -2.77031302 -1.354687 0.00394 **
S52F82A76-S32F96A55 -5.0625 -5.77031302 -4.354687 0.00023 ***
S65F96A55-S32F96A55  0.4375 -0.27031302  1.145313 0.25935

---
Signif. codes:  0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

```

C. Anexo: Gestión de datos sensores y calidad

Se presenta la gestión (limpieza, organización y estandarización) realizada a los datos de los termohigrómetros, estación meteorológica y resultados de las cataciones, mediante el uso del lenguaje de programación Python en el entorno de desarrollo VSCode.

Importar librerías

Acceso a carpetas y lectura de múltiples archivos (os y glob)

Gestión de datos (pandas)

```
import os
import glob
import pandas as pd
```

Rutas de archivos para lectura

```
# Paths
th_path = './TH/*.csv'
we_path = './WE/*.csv'

files_path = ['./TH/*.csv',
              './WE/*.csv']

cuppings = '../Fichas_catacion/cataciones.xlsx'
```

Lectura de archivos, categorización y unificación de la data de termohigrómetros y estación meteorológica

```
th_sensor_name = []
th_list = []
we_list = []

for i in range(len(files_path)):
    for files in glob.glob(files_path[i]):
        th_sensor_name.append(files.split('.')[0].split('\\')[1].split('.')[0].upper())
        df = pd.read_csv(files)
        for name in th_sensor_name:
            df['sensor_name'] = name
            if i == 0:
                th_list.append(df)
            elif i == 1:
                we_list.append(df)

th_df = pd.concat(th_list, axis = 0, ignore_index= True)
we_df = pd.concat(we_list, axis = 0, ignore_index= True)
```

Localización de la data con la zona horaria, cambio de los nombres de las variables

```
th_df.rename(columns={'Registro\xa0temporal\xa0para\xa0frecuencia\xa0de\xa0muestreo\xa0cada\xa01 min\xa0min': 'timestamp',
                    'Temperatura_Celsius': 'temperature',
                    'Humedad_relativa': 'humedad_relativa'}, inplace = True)
th_df['timestamp'] = pd.to_datetime(th_df['timestamp']).dt.tz_localize('UTC').dt.tz_convert(tz='America/Bogota')
th_df['hour'] = th_df['timestamp'].dt.hour

fecha_maxima = pd.to_datetime('1/25/2023 23:59:59').tz_localize('UTC').tz_convert(tz='America/Bogota')
th_df = th_df[th_df['timestamp'] <= fecha_maxima]
```

Organización de la información para presentación, resumen de data con mínimos, promedios y máximos

```
th_processed = th_df.groupby(['sensor_name', 'hour']).agg({'temperature': ['min', 'mean', 'max'],
                                                       'humedad_relativa': ['min', 'mean', 'max']})
th_processed.columns = ['temperature_min', 'temperature_avg', 'temperature_max', 'hr_min', 'hr_avg', 'hr_max']
th_processed = th_processed.reset_index()
```

```
th_chart = th_processed.melt(['hour', 'sensor_name'], var_name='data_type', value_name='reading')
```

Organización de la data de las cataciones para su posterior uso, incluye estandarización y categorización

```
quality = pd.read_excel(cupings, engine='openpyxl', sheet_name=1, skiprows=1)
quality = quality.iloc[:, 1:]
```

```
cleanQuality = quality[~quality['Referencia'].isnull()].copy()
```

```
cq_df = cleanQuality.drop(cleanQuality.iloc[:, 2:26], axis=1)
cq_df = cq_df.drop(['Descripción'], axis=1)
```

```
cq_df = cq_df.melt(['Referencia', 'Horas Fermentacion'], var_name='Posicion', value_name='Nota')
```

```
cq_df = cq_df.replace(['Nota 1 aroma', 'Nota 2 aroma', 'Nota 3 aroma', 'Nota 4 aroma', 'Aroma'],
                    ['Nota 1 sabor', 'Nota 2 sabor', 'Nota 3 sabor', 'Nota 4 sabor'], 'Sabor')
```

```
def quality_categorization(score):
    if score < 84:
        return "< 84"
    elif score >= 84 and score < 85:
        return "84 - 84.75"
    elif score >= 85 and score < 86:
        return "85 - 85.75"
    elif score >= 86:
        return ">= 86"
```

```
cleanQuality['qualityCategory'] = cleanQuality['Puntaje_total'].apply(quality_categorization)
```

```
cleanQuality[cleanQuality['qualityCategory'].isnull()]['Referencia', 'Puntaje_total', 'qualityCategory']
```

| Referencia | Puntaje_total | qualityCategory |
|------------|---------------|-----------------|
|------------|---------------|-----------------|

```
temp = pd.get_dummies(cleanQuality, prefix='nota', columns=['Nota 1 aroma', 'Nota 2 aroma', 'Nota 3 aroma',
                                                         'Nota 1 sabor', 'Nota 2 sabor', 'Nota 3 sabor'])
```

```
notesDf = temp.iloc[:, 29:].copy()
```

```
notesDf = pd.concat([notesDf, temp.iloc[:, 0]], axis=1)
```

Exportar la data para su uso y generación de gráficas

```
we_df.rename(columns={'Time': 'timestamp'}, inplace=True)
we_df['timestamp'] = pd.to_datetime(we_df['timestamp'])
```

```
cq_df.to_csv('../Fichas_catacion/notas.csv', index=False)
cleanQuality.to_csv('../Fichas_catacion/quality_score.csv', index=False)
#notesDf.to_csv('../Fichas_catacion/notas.csv', index=False)
#temp.to_csv('../Fichas_catacion/notas_ref.csv', index=False)
```

```
th_processed.to_csv('../th_processed_data.csv', index=False)
we_df.to_csv('../we_processed_data.csv', index=False)
th_chart.to_csv('../th_melted_data.csv', index=False)
th_df.to_csv('../th_first_data.csv', index=False)
```

Correlacion

Lectura de archivos

```
gross_data = pd.read_excel('../Fichas_catacion/cataciones.xlsx', sheet_name='Correlaciones', engine='openpyxl', usecols="B:O")  
✓ 0.4s
```

Estandarización y procesamiento de datos

```
gross_data.iloc[:,5:-1] = gross_data.iloc[:,5:-1].apply(lambda x:x.str.capitalize())  
✓ 0.0s
```

```
gross_data_categories = gross_data.iloc[:,5:-1]  
gross_data_number = gross_data.drop(gross_data.iloc[:,5:-1], axis = 1 )  
gross_dummy_full_data = pd.concat([gross_data_number, pd.get_dummies(gross_data.iloc[:,5]),], axis = 1)  
✓ 0.0s
```

```
temp_dummy = []  
  
for _ in range(5,13):  
    dummy = pd.get_dummies(gross_data.iloc[:,_])  
    temp_dummy.append(dummy)  
  
full_dummy = pd.concat(temp_dummy, axis = 1)  
gross_dummy_full_data = pd.concat([gross_data_number, full_dummy], axis = 1)  
gross_dummy_full_data.to_csv('./dummydata.csv', index = False)  
✓ 0.0s
```

```
gross_dummy_full_data = pd.read_csv('./dummydata.csv')  
✓ 0.0s
```

Importar librerías para graficar

```
import seaborn as sns
import matplotlib.pyplot as plt
import numpy as np
```

✓ 0.0s

Generación de librerías

```
sns.set_theme(style="white")
mask = np.triu(np.ones_like(gross_dummy_full_data.corr(), dtype=bool))
f, ax = plt.subplots(figsize=(11, 9), dpi = 100)
cmap = sns.color_palette("mako", as_cmap=True)
sns.set(font_scale=0.5)

sns.heatmap(gross_dummy_full_data.corr(), mask=mask, cmap= cmap, vmax=.3, center=0,
            square=True, linewidths=.5, cbar_kws={"shrink": .5}, annot=True, fmt='.1f')

plt.savefig("correlation_plot.png")
```

✓ 3.0s

D. Anexo: Metodología de procesamiento de cafés naturales propuesta

Se presenta la metodología propuesta a partir de los resultados del estudio. Esta metodología de fácil implementación tiene como objeto brindar conocimiento al usuario en la generación de café de especialidad, con notas cítricas y frutales.

METODOLOGÍA DE PROCESAMIENTO DE CAFÉ NATURAL



Porcentajes totales de las notas obtenidas a partir de las diferentes combinaciones de horas de fermentación, referencia de poluisombra y días de almacenamiento.

| Horas Fermentacion
Sombra
Nota | 72 | | 82 | | 96 | | 110 | | 120 | | | | | | | | |
|--------------------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|-------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| | 32 | 13 | 52 | 74 | 0 | 32 | 55 | 0 | 13 | 52 | 32 | | | | | | |
| | 55 | 34 | 74 | 34 | 74 | 55 | 20 | 55 | 90 | 65 | 55 | 20 | 34 | 74 | 34 | 74 | 55 |
| Naranja | | | | 16.67% | | 8.33% | | 18.75% | | 8.33% | 12.50% | | | | | | |
| Melaza | 8.33% | | 12.50% | 4.17% | 25.00% | 8.33% | | 3.13% | | 4.17% | 8.33% | | 4.17% | | | | 25.00% |
| Aromatico | | 16.67% | | | | | 16.67% | 6.25% | 16.67% | 8.33% | | 4.17% | | | | | |
| Fresa | | 8.33% | | 16.67% | | | | 6.25% | 8.33% | 20.83% | | 8.33% | 4.17% | | | 12.50% | |
| Chocolate negro | 16.67% | | | 8.33% | | 8.33% | | 9.38% | | | | 8.33% | 4.17% | | | | 12.50% |
| Vino | | 16.67% | | | | | 4.17% | | 20.83% | | 12.50% | | | 12.50% | | | 16.67% |
| Miel maple | | 8.33% | | 8.33% | | | 8.33% | 4.69% | 8.33% | 8.33% | 4.17% | | | | | | 12.50% |
| Fermentado | 8.33% | 8.33% | | 8.33% | | | | | 8.33% | | | 4.17% | 25.00% | | | | 8.33% |
| Miel | | | | | | 8.33% | 8.33% | 3.13% | 8.33% | 8.33% | | | | | | | 12.50% |
| Ciruela pasa | | | | | | 8.33% | 8.33% | 3.13% | | | | 4.17% | 16.67% | | | | |
| Almendra | | 8.33% | | 8.33% | | | | 6.25% | | | | | 4.17% | | | | |
| Azucar Morena | | | | | | 8.33% | | | | | | 8.33% | 12.50% | | | | 8.33% |
| Cereza | | | | | | 8.33% | 8.33% | 3.13% | | | | | | | | | 12.50% |
| Mora | | | | | | 8.33% | | | | 8.33% | 4.17% | 16.67% | | | | | |
| Panela | 8.33% | | 12.50% | | | | | 1.56% | | 8.33% | 4.17% | | | | | | 8.33% |
| Cacao | 8.33% | | | 8.33% | | 8.33% | | | | | | 8.33% | | | | | |
| Vainilla | | 8.33% | | 4.17% | | | | 3.13% | | | | | | | | | 8.33% |
| Nuez | 4.17% | | | | 25.00% | | | 4.69% | | | | | | | | | |
| Papel | 8.33% | | | | | | | | | | | | | 25.00% | | | 8.33% |
| Caramelo | | | | 8.33% | | | | 3.13% | | | | | 4.17% | | | | |
| Chocolate | | | | | | | | 3.13% | 4.17% | | | | 4.17% | | | | 12.50% |
| Mandarina | | | | 8.33% | | 8.33% | | | | | | | | | | | 4.17% |
| Maní | | | 25.00% | | 25.00% | | | | | | | | | 4.17% | | | |
| Afrutado | | | | | | | 4.17% | | | | | 8.33% | 4.17% | | | | |
| Canela | | | | | | | | | | | | | | 8.33% | 25.00% | | |
| Cereales | 8.33% | | | | | | | | | | | | | | | | 8.33% |
| Tabaco | 4.17% | | 25.00% | | | | | | | | | | | 12.50% | | | |
| Vegetal | | | | | | | | 3.13% | | | | | | 12.50% | | | 8.33% |
| Limón | | | | | | | | 4.17% | 3.13% | | | | | | | | |
| Reposo | | | | | 12.50% | | | | | | | | | 25.00% | | | |
| Uva | | | | | | | | 8.33% | | | | | | | | | 12.50% |
| Banano | | | | | | | | | | | | | | | | | 8.33% |
| Cacao, Caña | | | | | | | | 3.13% | | | | | | | | | |
| Caña | | | | | | | | 3.13% | | | | | | | | | |
| Cardamomo, Licor de Cacao | | 8.33% | | | | | | | | | | | | | | | |
| Cascara de Naranja, Caña | | | | | | | | 3.13% | | | | | | | | | |
| Clavo | | | | | | | | | | | | | | | | | 8.33% |
| Frutos Rojos, Caña | | | | | | | | 3.13% | | | | | | | | | |
| Guayaba, Caña | | | | | | | | | | | | | | | | | 8.33% |
| Guayaba, Chocolate Blanco | | 8.33% | | | | | | | | | | | | | | | |
| Guayaba, Mandarina | | | | | | | | | | | | | | | | | 8.33% |
| Herbal | | | | | | | | | 3.13% | | | | | | | | |
| Licor de Cacao | | 8.33% | | | | | | | | | | | | | | | |
| Lima | 8.33% | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Madera | 8.33% | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Mandarina, Almibar | | | | | | | | | | 8.33% | | | | | | | |
| Mandarina, tamarindo | | | | | | | | 3.13% | | | | | | | | | |
| Manzana | | | | | | 8.33% | | | | | | | | | | | |
| Menta, Yerbabuena | | | | | | | | | 8.33% | | | | | | | | |
| Miel de Caña | | | | | | | | | | 8.33% | | | | | | | |

Bibliografía

- ACNUR. (2019). *Los 10 países más poblados del mundo*. Recuperado el Mayo de 2020, de https://eacnur.org/blog/los-10-paises-mas-poblados-del-mundo-tc_alt45664n_o_pstn_o_pst/
- Alfonso, K. (23 de Enero de 2018). *Agronegocios*. Obtenido de Agronegocios: <https://www.agronegocios.co/aprenda/mas-agronomia-mas-productividad-2623175>
- Borém, F. M., Isquierdo, E. P., Alves, G. E., Ribeiro, D. E., Siqueira, V. C., & Taveira, J. H. (2018). Quality of natural coffee dried under different temperatures and drying rates.
- Buratti, S., Benedetti, S., & Giovanelli, G. (2017). Application of electronic senses to characterize espresso coffees brewed with different thermal profiles. *Eur Food Res Technol*, 511-520. Obtenido de DOI 10.1007/s00217-016-2769-y
- Burmester, K., & Eggers, R. (2010). Heat and mass transfer during the coffee drying process. *Journal of Food Engineering*, 99, 430-436.
- Cadena, A. (8 de Marzo de 2014). Challenges in Coffee Processing: An Opportunity in Disguise to Foster a New Breed of Coffee Growers.
- Carvalho, L. J., de Souza, M., de Oliveira, L., & Santos, L. (2023). Coffee fermentation: A review. *Food Research International*.
- CBI. (23 de Diciembre de 2022). *Centre for the Promotion of Imports from developing countries*. Obtenido de Centre for the Promotion of Imports from developing countries: <https://www.cbi.eu/market-information/coffee/trends>
- Cenicafé. (2015). *Cenicafe*. (G. I. Puerta Quintero, Editor) Obtenido de Cenicafe: <https://biblioteca.cenicafe.org/bitstream/10778/600/1/38911.pdf>
- Clayton, L. (23 de Mayo de 2022). *Sprudge*. Obtenido de Sprudge: <https://sprudge.com/what-is-natural-process-coffee-185926.html>

- CoffeeChemistry. (18 de Abril de 2017). Cupping Fundamentals. Recuperado el Mayo de 2020, de <https://www.coffeechemistry.com/quality/cupping/cupping-fundamentals>
- CoffeeResearch. (2006). Brazilian Coffee Beans . Recuperado el Mayo de 2020, de <http://www.coffeeresearch.org/coffee/brazil.htm>
- CQI. (2020). WHAT IS A Q GRADER? Recuperado el Mayo de 2020, de https://www.coffeeinstitute.org/our-work/a_common_language/what-is-a-q-grader/
- De Bruyn, F., Jiyuan Zhang, S., Pothakos, V., Torres, J., Lambot, C., Moroni, A. V., . . . De Vuyst, L. (2016). Exploring the Impacts of Postharvest Processing on the Microbiota and Metabolite Profiles during Green Coffee Bean Production. *Applied and Environmental Microbiology*. doi:10.1128/AEM.02398-16
- de Jesus Cassimiro, D. M., Nara Batista, N., Fonseca, H. C., Oliveira Naves, J. A., Moreira Coelho, J., Campos Bernardes, P., . . . Freitas Schwan, R. (2023). Wet fermentation of *Coffea canephora* by lactic acid bacteria and yeasts using the self-induced anaerobic fermentation (SIAF) method enhances the coffee quality. *Food Microbiology*, *110*, 104-161. doi:<https://doi.org/10.1016/j.fm.2022.104161>
- de Melo Pereira, G. V., de Carvalho Neto, D. P., Magalhães Júnior, A. I., Vásquez, Z. S., Medeiros, A. B., Vandenberghe, L. P., & Soccol, C. R. (2019). Exploring the impacts of postharvest processing on the aroma formation of coffee beans – A review. *Food Chemistry*, 441-452.
- Delagua Coffee Paradise. (2023). About us. Obtenido de <https://delaguacoffee.com/>
- do Livramento, K. G., Borém, F. M., José, A. C., Santos, A. V., do Livramento, D. E., Alves, J. D., & Paiva, L. V. (2017). Proteomic analysis of coffee grains exposed to different drying process. *Food Chemistry*, *221*, 1874-1882. doi:<https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2016.10.069>
- Dong, W., Hu, R., Long, Y., Li, H., Zhang, Y., Zhu, K., & Chu, Z. (2019). Comparative evaluation of the volatile profiles and taste properties of roasted coffee beans as affected by drying method and detected by electronic nose, electronic tongue, and HS-SPME-GC-MS. *Food Chemistry*(272), 723-731.

- Gomez Posada, S. (17 de Junio de 2019). Fermentación del café: El secreto de la calidad en taza. Recuperado el Mayo de 2020, de <https://quecafe.info/fermentacion-del-cafe-calidad-en-taza/>
- Grainpro. (2022). *GrainPro*. Obtenido de GrainPro: <https://www.grainpro.com/es/grainpro-twist-tie-es>
- Grant, T. (11 de Febrero de 2020). *Perfect Daily Grind*. Obtenido de Perfect Daily Grind: <https://perfectdailygrind.com/es/2020/02/11/explorando-las-tendencias-en-cafe-especial-de-los-millennials/>
- Harvard. (2021). *Harvard School of Public Health*. Obtenido de Harvard School of Public Health: <https://www.hsph.harvard.edu/news/hsph-in-the-news/is-coffee-good-or-bad-for-your-health/#:~:text=Hu%20said%20that%20moderate%20coffee,their%20risk%20of%20early%20death.>
- ICAFFE. (2011). *Guía Técnica para el Cultivo del Café*. Barva: CICAFFE. Obtenido de <http://www.icafe.cr/wp-content/uploads/cicafe/documentos/GUIA-TECNICA-V10.pdf>
- ICO. (2020a). *Coffee Market Report March 2020*. Recuperado el Mayo de 2020, de <http://www.ico.org/documents/cy2019-20/cmr-0320-e.pdf>
- ICO. (2020b). *Total Production*. Recuperado el Mayo de 2020, de [www.ico.org/historical/1990 onwards/PDF/1a-total-production.pdf](http://www.ico.org/historical/1990%20onwards/PDF/1a-total-production.pdf)
- ICO. (2020c). *World Coffee Consumption*. Londres, Inglaterra. Obtenido de <http://www.ico.org/prices/new-consumption-table.pdf>
- ICO. (2021). *COFFEE DEVELOPMENT REPORT*. Londres: International Coffee Organization.
- IDEAM. (2023). Obtenido de <http://www.ideam.gov.co/documents/21021/418894/Caracter%C3%ADsticas+de+Ciudades+Principales+y+Municipios+Tur%C3%ADsticos.pdf/c3ca90c8-1072-434a-a235-91baee8c73fc>

- INTERNATION COFFEE DAY. (2019). *WHAT DOES IT TAKE TO MAKE A CUP OF COFFEE?* Recuperado el Mayo de 2020, de <https://www.internationalcoffeeday.org/copy-of-stories>
- Jagelman, J. (7 de Marzo de 2019). China Specialty Coffee – Awakening the Dragon. Recuperado el Mayo de 2020, de <https://yunnancoffeetraders.com/china-specialty-coffee/>
- Kulapichitr, F., Borompichaichartkul, C., Suppavorasatit, I., & Cadwallader, K. (2019). Impact of drying process on chemical composition and key aroma components of Arabica coffee. *Food Chemistry*, 49-58.
- Kumar, A. S., Thapa, A., & Gautam, H. (2019). Solar Radiation, Air Temperature, Relative Humidity, and Dew Point Study: Damak, Jhapa, Nepal. *International Journal of Photoenergy*. doi:<https://doi.org/10.1155/2019/8369231>
- Latha, R. S., & Lakshmi, P. K. (2012). Electronic tongue: An analytical gustatory tool. *Journal of Advanced Pharmaceutical Technology & Research*, 3-8. doi:10.4103/2231-4040.93556
- Liu, X., Qi, Y., Li, F., Yang, Q., & Liming, Y. (2018). Impacts of regulated deficit irrigation on yield, quality and water use efficiency of Arabica coffee under different shading levels in dry and hot regions of southwest China. *Agricultural Water Management*, 292-300. doi:<https://doi.org/10.1016/j.agwat.2018.04.024>
- Louzada Pereira, L., Polonini Moreli, A., Rizzo Moreira, T., Schwengber Ten Caten, C., Pereira Marcate, J. P., Grancieri Debona, D., . . . Rogério. (2019). Improvement of the Quality of Brazilian Conilon through Wet Processing: A Sensorial Perspective. *Agricultural Sciences*, 395-411. doi:<https://doi.org/10.4236/as.2019.103032>
- Ma, Y. (29 de Abril de 2022). *Statista*. Obtenido de Statista: <https://www.statista.com/topics/7311/coffee-market-in-china/#topicOverview>
- MacDonnell, K. (2 de Febrero de 2023). *CoffeeAffection*. Obtenido de CoffeeAffection: <https://coffeeaffection.com/coffee-shop-industry-statistics/#:~:text=In%20the%20last%20five%20years,the%20most%20in%20the%20US.>

- Machado Martins, P. M., Batista, N. N., da Cruz Pedrozo Miguel, M. G., Pavesi Simão, J. B., Ribeiro Soares, J., & Schwan, R. F. (2020). Coffee growing altitude influences the microbiota, chemical compounds and the quality of fermented coffees. *Food Research International*(129).
- Martinez Jimenez, E. J., Machado Martins, P. M., de Oliveira Vilela, A. L., Batista, N. N., Veiga Franco da Rosa, S. D., Ribeiro Dias, D., & Schwan, R. F. (2022). Influence of anaerobic fermentation and yeast inoculation on the viability, chemical composition, and quality of coffee. *Food Bioscience*. doi:<https://doi.org/10.1016/j.fbio.2022.102218>
- MordorIntelligence. (2023). COFFEE MARKET SIZE & SHARE ANALYSIS - GROWTH TRENDS & FORECASTS (2023 - 2028). Obtenido de <https://www.mordorintelligence.com/industry-reports/coffee-market>
- Pate, A. (15 de Marzo de 2019). *Perferct Daily Grind*. Obtenido de Perferct Daily Grind: <https://perfectdailygrind.com/es/2019/03/15/rayos-uv-ayudan-a-controlar-la-calidad-durante-el-tueste/>
- Peñuela, A. E., Gonzalo, C. M., Molina, D., Puerta, G. I., Botero, J. E., & Rodríguez, N. (2013). *Manual del cafetero colombiano* (Vol. I).
- Perfect Daily Grind. (8 de Diciembre de 2021). *Perfect Daily Grind*. Obtenido de Perfect Daily Grind: <https://perfectdailygrind.com/es/2021/12/08/como-almacenar-el-cafe-pergamino/>
- PerfectDailyGrind. (2019). Tracing Coffee's Roots Back to Al-Mokha, Yemen. Recuperado el Mayo de 2020, de <https://perfectdailygrind.com/2019/06/tracing-coffees-roots-back-to-al-mokha-yemen/>
- PerfectDailyGrind. (2020). *Entering China's Emerging Coffee Market*. Recuperado el Mayo de 2020, de <https://perfectdailygrind.com/2020/02/entering-chinas-emerging-coffee-market/>
- Puerta Quintero, G. I. (2015). Buenas prácticas: estrategia para asegurar la calidad del café. Tebaida, Quindío, Colombia. Obtenido de Cenicafe: <https://biblioteca.cenicafe.org/bitstream/10778/600/1/38911.pdf>

- Puerta Quintero, G. I., & Echeverry Molina, J. G. (Abril de 2015). *Fermentación controlada del café: Tecnología para agregar valor a la calidad*. FNC - Cenicafé.
- Puerta, G. I. (Octubre de 2006). La humedad controlada del grano preserva la calidad del café. *Avances Técnicos Cenicafé*.
- Puerta, G. I. (Agosto de 2012). Factores, procesos y controles en la fermentación del café.
- Puerta-Quintero, G. I., & Rios-Arias, S. (2011). COMPOSICIÓN QUÍMICA DEL MUCÍLAGO DE CAFÉ, SEGÚN EL TIEMPO DE FERMENTACIÓN Y REFRIGERACIÓN. *Cenicafé*, 23-40. Obtenido de <https://www.cenicafe.org/es/documents/2.pdf>
- Rodríguez, N. V., Sanz, J. U., Oliveros, C. T., & Ramírez, C. G. (2015). *Beneficio del café en Colombia*. Chinchiná: FNC - Cenicafé.
- Samsonowicz, M., Regulska, E., Karpowicz, D., & Leśniewska, B. (2019). Antioxidant properties of coffee substitutes rich in polyphenols and minerals. *Food Chemistry*, 278, 101-109.
- SCA. (16 de Diciembre de 2015). SCAA Protocols | Cupping Specialty Coffee. Recuperado el Mayo de 2020, de <https://www.scaa.org/PDF/resources/cupping-protocols.pdf>
- Severini, C., Derossi, A., Fiore, A. G., Ricci, I., & Marone, M. (2016). The electronic nose system: study on the global aromatic profile of espresso coffee prepared with two types of coffee filter holders. *Eur Food Res Technol*, 2083-2091. doi:DOI 10.1007/s00217-016-2705-1
- Smrke, S., Adam, J., Muhlemann, S., Lantz, I., & Yeretizian, C. (2022). Effects of different coffee storage methods on coffee freshness after opening of packages. *Food Packaging and Shelf Life*. doi:<https://doi.org/10.1016/j.fpsl.2022.100893>
- Specialty Coffee Association. (2019). El café Arábica lavado Guía de defectos del café verde. Obtenido de https://bootcoffee.com/wp-content/uploads/2019/09/SCA_The-Arabica-Green-Coffee-Defect-Guide_Spanish_updated.pdf
- Statista. (2022). *Statista*. Obtenido de Statista: <https://www.statista.com/outlook/cmo/hot-drinks/coffee/worldwide#revenue>

- SweetMarias. (2015). Yemen. Recuperado el Mayo de 2020, de <https://legacy.sweetmarias.com/library/yemen/>
- TheSpecialtyCoffeeCompany. (Agosto de 2022). *TheSpecialtyCoffeeCompany*. Obtenido de TheSpecialtyCoffeeCompany: <https://www.thespecialtycoffee.com/resources/specialty-coffee/>
- TrianonCoffee. (2019). *TrianonCoffee*. Obtenido de TrianonCoffee: <https://www.trianoncoffee.com/blogs/news/how-is-honey-processed-coffee-different-from-washed-or-natural>
- Tripetch, P., & Borompichaichartkul, C. (2019). Effect of packaging materials and storage time on changes of colour, phenolic content, chlorogenic acid and antioxidant activity in arabica green coffee beans (*Coffea arabica* L. cv. Catimor). *Journal of Stored Products Research*.
- Tucker, C. M. (2011). *Coffee Culture: Local Experiences, Global Connections*. New York. Obtenido de <http://www.routledge.com/books/details/9780415800259/>
- UNCTAD. (2018). *COMMODITIES AT A GLANCE - Special issue on coffee in East Africa*. Geneva. Obtenido de https://unctad.org/en/PublicationsLibrary/ditccom2018d1_en.pdf
- Vlasov, Y., & Legin, A. (1998). Non-selective chemical sensors in analytical chemistry: from “electronic nose” to “electronic tongue”. *Fresenius J Anal Chem*, 255-260.
- Wenjiang, D., Rongsuo, H., Yuzhou, L., Hehe, L., Yanjun, Z., Kexue, Z., & Zhong, C. (2019). Comparative evaluation of the volatile profiles and taste properties of roasted coffee beans as affected by drying method and detected by electronic nose, electronic tongue, and HS-SPME-GC-MS. *Food Chemistry*, 723-731.
- Williams, P. (2003). Near-infrared technology: getting the best out of light. *PDK Grain*.
- Worku, M., de Meulenaer, B., Duchateau, L., & Boeckx, P. (2018). Effect of altitude on biochemical composition and quality of green arabica coffee beans can be affected by shade and postharvest processing method. *Food Research International*, 278-285. doi:<https://doi.org/10.1016/j.foodres.2017.11.016>
- Zhang, S. J., De Bruyn1†, . F., Pothakos, V., Contreras, G. F., Cai, Z., Moccand, C., . . . De Vuyst, L. (2019). Influence of Various Processing PArameters on the Microbial

Community Dynamics, Metabolomic Profiles, and Cup Quality During Wet Coffee Processing . *Frontiers in Microbiology*(10). doi:10.3389/fmicb.2019.02621