



CARTA DE AUTORIZACIÓN

CÓDIGO

AP-BIB-FO-06

VERSIÓN

1

VIGENCIA

2014

PÁGINA

1 de 1

Neiva, julio 19 de 2022

Señores

CENTRO DE INFORMACIÓN Y DOCUMENTACIÓN

UNIVERSIDAD SURCOLOMBIANA

Ciudad

El (Los) suscrito(s):

Magda Larissa Aragón Barrera, con C.C. No. 52.354.636,

Autor(es) de la tesis y/o trabajo de grado o artículo titulado

Efecto del material de cubierta de secadores solares tipo gabinete en la calidad y perfil sensorial de café de procesamiento natural

presentado y aprobado en el año 2022 como requisito para optar al título de Magister en Ciencia y Tecnología del Café;

Autorizo (amos) al CENTRO DE INFORMACIÓN Y DOCUMENTACIÓN de la Universidad Surcolombiana para que, con fines académicos, muestre al país y el exterior la producción intelectual de la Universidad Surcolombiana, a través de la visibilidad de su contenido de la siguiente manera:

- Los usuarios puedan consultar el contenido de este trabajo de grado en los sitios web que administra la Universidad, en bases de datos, repositorio digital, catálogos y en otros sitios web, redes y sistemas de información nacionales e internacionales “open access” y en las redes de información con las cuales tenga convenio la Institución.
- Permita la consulta, la reproducción y préstamo a los usuarios interesados en el contenido de este trabajo, para todos los usos que tengan finalidad académica, ya sea en formato Cd-Rom o digital desde internet, intranet, etc., y en general para cualquier formato conocido o por conocer, dentro de los términos establecidos en la Ley 23 de 1982, Ley 44 de 1993, Decisión Andina 351 de 1993, Decreto 460 de 1995 y demás normas generales sobre la materia.
- Continúo conservando los correspondientes derechos sin modificación o restricción alguna; puesto que, de acuerdo con la legislación colombiana aplicable, el presente es un acuerdo jurídico que en ningún caso conlleva la enajenación del derecho de autor y sus conexos.

De conformidad con lo establecido en el artículo 30 de la Ley 23 de 1982 y el artículo 11 de la Decisión Andina 351 de 1993, “Los derechos morales sobre el trabajo son propiedad de los autores”, los cuales son irrenunciables, imprescriptibles, inembargables e inalienables.

EL AUTOR/ESTUDIANTE:

Firma:

Vigilada Mineducación



**TÍTULO COMPLETO DEL TRABAJO:** Efecto del material de cubierta de secadores solares tipo gabinete en la calidad y perfil sensorial de café de procesamiento natural.

**AUTOR O AUTORES:**

Primero y Segundo Apellido	Primero y Segundo Nombre
Aragón Barrera	Magda Larissa

**DIRECTOR Y CODIRECTOR TESIS:**

Primero y Segundo Apellido	Primero y Segundo Nombre
Bustos Vanegas Córdoba Castro	Jaime Daniel Nancy Marleny

**ASESOR (ES):**

Primero y Segundo Apellido	Primero y Segundo Nombre
N/A	N/A

**PARA OPTAR AL TÍTULO DE:** Magister en Ciencia y Tecnología del Café

**FACULTAD:** Ingeniería

**PROGRAMA O POSGRADO:** Maestría en ciencia y tecnología del café

**CIUDAD:** Neiva      **AÑO DE PRESENTACIÓN:** 2022      **NÚMERO DE PÁGINAS:** 29

**TIPO DE ILUSTRACIONES** (Marcar con una X):

Diagramas  Fotografías  Grabaciones en discos \_\_\_ Ilustraciones en general \_\_\_ Grabados \_\_\_ Láminas \_\_\_  
Litografías \_\_\_ Mapas \_\_\_ Música impresa \_\_\_ Planos \_\_\_ Retratos \_\_\_ Sin ilustraciones \_\_\_ Tablas o Cuadros

**SOFTWARE** requerido y/o especializado para la lectura del documento: lector de PDF

**MATERIAL ANEXO:** ninguno

**PREMIO O DISTINCIÓN** (En caso de ser LAUREADAS o Meritoria):

Meritoria



**PALABRAS CLAVES EN ESPAÑOL E INGLÉS:**

<u>Español</u>	<u>Inglés</u>	<u>Español</u>	<u>Inglés</u>
1. <u>secado solar</u>	<u>solar drying</u>	6. _____	_____
2. <u>poscosecha</u>	<u>post-harvest</u>	7. _____	_____
3. <u>Cromacafé</u>	<u>Cromacafé</u>	8. _____	_____
4. <u>Mediverdes</u>	<u>Mediverdes</u>	9. _____	_____
5. <u>OTA</u>	<u>OTA</u>	10. _____	_____

**RESUMEN DEL CONTENIDO:** (Máximo 250 palabras)

Se evaluó el efecto de secadores solares tipo gabinete con tres materiales de cubierta distintos (policarbonato, tela prosolar y polietileno) sobre la calidad del café (Var. Castillo y Tabi de *Coffea Arabica*) procesado por vía seca, en una finca con producción a pequeña escala. Un secador parabólico se usó como tratamiento control (cubierta de polietileno). Durante el secado el comportamiento de la temperatura (T) y la humedad relativa (HR) fue evaluado. Las muestras de café secadas en los diferentes tratamientos fueron analizadas en su calidad física y sensorial. Se evaluó la concentración de Ocratoxina A (OTA) en muestras de café tostado molido. El tiempo de secado osciló entre 38 y 42 días (secadores tipo gabinete); el tratamiento control tardó 31 días. El secador tipo gabinete con cubierta de policarbonato presentó la menor variación de T y HR en su interior. Las T más altas se presentaron en el tratamiento control. Se obtuvo 49,6% (promedio) de merma en trilla y actividad acuosa ( $A_w$ ) <0,6 para el café verde de los tratamientos analizados. El puntaje global SCA de la muestra del café secado en el secador solar tipo gabinete con cubierta de polietileno fue >82 en todas las sesiones de catación, presentado una correlación positiva (análisis PCA) con los atributos SCA correspondientes a sabor, sabor residual, acidez, cuerpo, uniformidad e impresión global. Algunas muestras de los demás tratamientos analizados presentaron atributos sensoriales considerados defectos en taza, tales como fenol, moho y terroso. La concentración de OTA fue <5µg/kg en todos los tratamientos.



**ABSTRACT:** (Máximo 250 palabras)

The effect of cabinet-type solar dryers with three different cover materials (polycarbonate, prosolar fabric and polyethylene) on the quality of dry-processed coffee (*Coffea Arabica* Var. Castillo and Tabi) on a small-scale production farm was evaluated. A parabolic dryer was used as a control treatment (polyethylene cover). During drying, the behavior of temperature (T) and relative humidity (RH) was evaluated. The coffee samples dried in the different treatments were analyzed for physical and sensory quality. The concentration of Ochratoxin A (OTA) in ground roasted coffee samples was evaluated. Drying time ranged from 38 to 42 days (cabinet dryers); the control treatment took 31 days. The cabinet type dryer with polycarbonate cover presented the lowest variation of T and RH inside. The highest T was in the control treatment. The average threshing loss was 49.6% (average) and water activity ( $A_w$ )  $<0.6$  for the green coffee of the treatments analyzed. The overall SCA score of the coffee sample dried in the cabinet-type solar dryer with polyethylene cover was  $>82$  in all cupping sessions, showing a positive correlation (PCA analysis) with the SCA attributes corresponding to flavor, aftertaste, acidity, body, uniformity and overall. Some samples of the other treatments analyzed presented sensory attributes considered cup defects, such as phenol, mold and earthy. OTA concentration was  $<5\mu\text{g}/\text{kg}$  in all treatments.

**APROBACION DE LA TESIS**

Nombre Presidente Jurado:

Firma:

Nombre Jurado: Claudia Milena Amorocho Cruz

Firma:

Nombre Jurado: José Dubán Henao Cuéllar

Firma:

Vigilada Mineducación

# Efecto del material de cubierta de secadores solares tipo gabinete en la calidad y perfil sensorial de café de procesamiento natural.

Larissa Aragón Barrera<sup>1</sup>, Jaime Daniel Bustos Vanegas<sup>1</sup> Nancy Córdoba <sup>1</sup>  
<sup>1</sup>Universidad Surcolombiana, Neiva, Huila, Colombia

## RESUMEN

El procesamiento natural enfocado en la producción de café de alta calidad ha venido tomando importancia en el mercado del café de especialidad. El secado solar sumado a un procesamiento por vía seca o natural, son alternativas ambientalmente sostenibles durante la etapa de poscosecha del café. Por lo tanto, esta investigación se enfocó en evaluar el efecto de secadores solares tipo gabinete con tres diferentes tipos de cubiertas (policarbonato, tela prosolar y polietileno) sobre la calidad del café (Var. Castillo y Tabi de *Coffea Arabica*) de procesamiento natural en una finca con producción de café a pequeña escala. Además, un secador parabólico con cubierta de polietileno se usó como tratamiento control. Durante el secado el comportamiento de la temperatura (T) y la humedad relativa (HR) y fue evaluado. Asimismo, cada una de las muestras de café secadas en los diferentes sistemas fueron analizadas en su calidad física y sensorial. Adicionalmente, se evaluó la concentración de Ocratoxina A (OTA) en muestras de café tostado molido. El tiempo de secado en los secadores tipo gabinete osciló entre 38 y 42 días mientras que el tratamiento control tardó 31 días. El secador tipo gabinete con cubierta de policarbonato presentó la menor variación de T y HR en su interior. Las temperaturas más altas y el tiempo de secado más corto se presentaron en el tratamiento control TD (secador parabólico con cubierta de polietileno). El café verde (almendra) presentó un promedio de 49,6% de merma en trilla y una actividad de agua ( $A_w$ )  $<0,6$  en todos los tratamientos. El puntaje global SCA de calidad sensorial de la muestra del tratamiento TC (secador solar tipo gabinete con cubierta de polietileno) arrojó puntajes mayores a 82 puntos en todas las sesiones de catación presentado una correlación positiva (análisis PCA) con los atributos generales de SCA correspondientes a sabor, sabor residual, acidez, cuerpo, uniformidad e impresión global. En algunas muestras de los demás tratamientos analizados se identificaron algunos atributos sensoriales considerados defectos en taza, tales como fenol, moho y terroso. Los niveles de OTA en café tostado molido fueron menores a  $5\mu\text{g}/\text{kg}$  en todos los tratamientos. No se presentaron diferencias estadísticamente significativas ( $p>0.05$ ) en la valoración de los atributos SCA relacionados con fragancia/aroma, sabor, acidez y cuerpo de los tratamientos analizados. Por lo tanto, es importante continuar la investigación aplicada en fincas productoras durante diferentes épocas de cosecha para comprender las variables agroclimáticas que influyen en el secado solar del café con el fin de incorporar

nuevas metodologías y tecnologías que permitan minimizar defectos en taza, así como una mayor comprensión y eficiencia de este tipo de secado.

## **ABSTRACT**

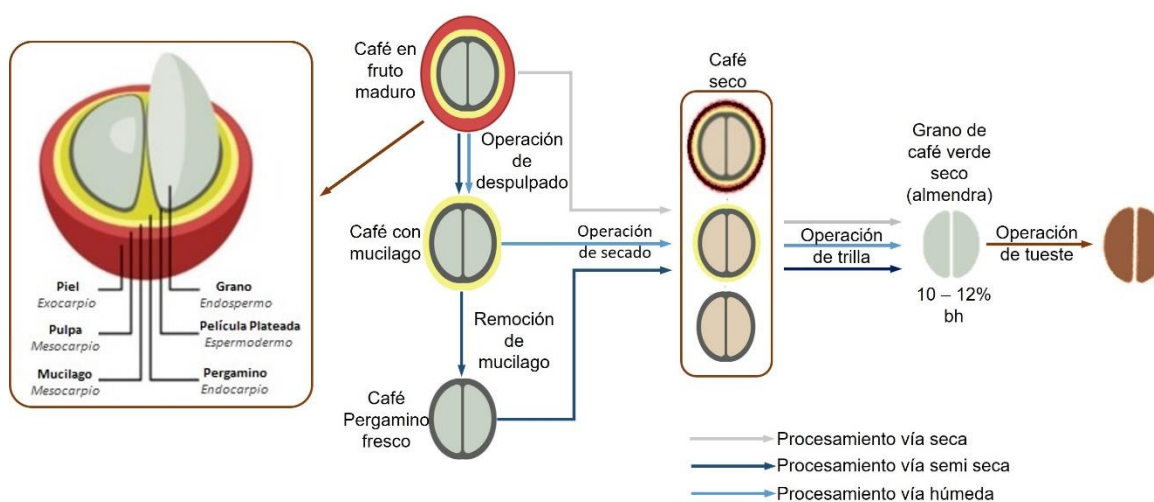
Natural processing focused on the production of high quality coffee has been gaining importance in the specialty coffee market. Solar drying coupled with dry or natural processing are environmentally sustainable alternatives during the post-harvest stage of coffee production. Therefore, this research focused on evaluating the effect of cabinet-type solar dryers with three different types of covers (polycarbonate, prosolar fabric and polyethylene) on the quality of naturally processed coffee (Var. Castillo and Tabi of *Coffea Arabica*) in a small-scale coffee production farm. In addition, a parabolic dryer with a polyethylene cover was used as a control treatment. During drying, the behavior of temperature (T) and relative humidity (RH) was evaluated. Likewise, each of the coffee samples dried in the different systems were analyzed for their physical and sensory quality. Additionally, the concentration of Ochratoxin A (OTA) in ground roasted coffee samples was evaluated. Drying time in the cabinet dryers ranged between 38 and 42 days while the control treatment took 31 days. The cabinet type dryer with polycarbonate cover presented the lowest variation of T and RH inside. The highest temperatures and the shortest drying time occurred in the control treatment TD (parabolic dryer with polyethylene cover). Green coffee (kernels) showed an average threshing loss of 49.6% and water activity ( $A_w$ )  $<0.6$  in all treatments. The overall SCA sensory quality score of the TC treatment sample (cabinet type solar dryer with polyethylene cover) yielded scores greater than 82 points in all cupping sessions showing a positive correlation (PCA analysis) with the overall SCA attributes of flavor, aftertaste, acidity, body, uniformity and overall. In some samples of the other treatments analyzed, some sensory attributes considered cup defects, such as phenol, mold and earthy, were identified. OTA levels in roasted ground coffee were less than  $5\mu\text{g}/\text{kg}$  in all treatments. There were no statistically significant differences ( $p>0.05$ ) in the assessment of SCA attributes related to fragrance/aroma, flavor, acidity and body of the treatments analyzed. Therefore, it is important to continue the research applied in producing farms during different harvesting seasons to understand the agro-climatic variables that influence the solar drying of coffee to incorporate new methodologies and technologies that allow minimizing cup defects, as well as a greater understanding and efficiency of this type of drying.

**Palabras clave:** secado solar, poscosecha. Cromacafé, Mediverdes, OTA.

## 1. Introducción

El café es una de las bebidas más consumidas en el mundo, la Organización Internacional del Café (ICO, por sus siglas en inglés) indicó que para el año cafetero 2020/21 el consumo mundial fue de 164,1 millones de sacos de café verde de 60 kg y se prevé que este consumo incremente hasta 170,3 millones de sacos para 2021/22 (ICO, 2022). De acuerdo con la Federación Nacional de Cafeteros de Colombia (FNC), el café es un cultivo considerado como principal medio de vida para más de 560 mil familias en alrededor de 660 mil fincas que tienen un tamaño promedio que no excede 1.6 ha. Lo anterior, confirma que la caficultura colombiana sigue siendo predominantemente de productores a pequeña escala (FNC, 2018).

Existen diferentes métodos de procesamiento para la poscosecha del café, teniendo en cuenta la remoción de capas que conforman el fruto o cereza de café, estos procesos se pueden clasificar en vía seca o natural, vía semi seca o honey, vía húmeda o lavado (Figura 1). Una de las operaciones consideradas relevantes en cualquiera de los tipos de procesamiento mencionados, es el secado. Esta etapa puede presentar algunas diferencias dependiendo del tipo de procesamiento, específicamente para los procesos de vía seca o naturales el café es sometido a secado directamente en el fruto. Para los procesos de vía semi seca o honey, el café es secado retirando el endocarpio y parte del mesocarpio (secado en mucílago) y para procesamientos de vía húmeda o lavados, el café es secado retirando el exocarpio y el mesocarpio en su totalidad (secado en pergamino fresco)(CQI Coffee Quality Institute, 2017).



**Figura 1.** Esquema de los métodos de procesamiento poscosecha considerando las capas del fruto del café. Figura adaptada de (de Melo Pereira et al., 2019; Rotta et al., 2021) .

En la operación de secado de café de procesamiento natural, el fruto puede contener una humedad inicial que oscila entre 66-77%<sub>bh</sub> (base húmeda) (Henao et al., 2017). Por lo tanto, se requiere que este sea sometido a secado con la finalidad de obtener un grano de café verde (o almendra) exportable con un contenido de humedad entre un 10 a 12%<sub>bh</sub> (Rotta et al., 2021). Con el secado del fruto se busca disminuir la actividad de agua ( $A_w$ ) del grano por debajo del límite crítico (0,76) con el fin de evitar el crecimiento de hongos y levaduras (Henao et al., 2017) sin afectar la matriz sólida que contiene los compuestos precursores del sabor y aroma de la bebida de café. Considerando estas variables, se garantiza la inocuidad del café durante el periodo de almacenamiento y se prepara el endospermo para la operación de tueste.

Con una disminución óptima tanto del contenido de humedad y como de la  $A_w$  en la operación de secado del café, también se puede reducir el riesgo de encontrar en el café tostado molido concentraciones de Ocratoxina A (OTA) superiores al límite permitido de 5 $\mu$ g/kg según lo dispuesto para Colombia por el Ministerio de Salud en la Resolución 4506 (Minsalud, 2013). La OTA es una micotoxina con propiedades cancerígenas, nefrotóxicas, teratogénicas e inmunotóxicas (Benites et al., 2017; Codex Alimentarius, 2009), la cual es producida principalmente por una especie de moho denominada *Aspergillus ochraceus* (Díaz et al., 2018). Es importante resaltar que la OTA es una sustancia que se encuentra en el café verde y algunas veces no se elimina del todo en la operación de tueste del café (FAO, 2006; Rhouati et al., 2013).

Durante el secado, la remoción de humedad del fruto se produce cuando la presión de vapor en el aire de secado es menor a la presión de vapor en la superficie del fruto. La humedad superficial es removida por convección mientras que la humedad al interior del fruto se impulsa principalmente por mecanismos difusivos desde el centro hacia la superficie. En el secado del fruto entero (vía seca-natural) la difusión de humedad enfrenta la resistencia ejercida por todas las capas de tejido para finalmente ser retirada por el aire desde su superficie (Borém et al., 2014). Por lo tanto, el tiempo de secado por esta vía es considerado más largo que los tiempos de secado empleados en cafés procesados por métodos como lavado y semiseco. Además, se debe considerar que el tiempo de secado depende en gran medida de las condiciones del aire utilizado. El movimiento del aire y su temperatura pueden ser modificados por dispositivos mecánicos (secado artificial) (Alves et al., 2020) o por efectos naturales sobre estructuras como secadores parabólicos (secado solar) relacionados con vientos y radiación solar presentes en el lugar donde se realiza el secado (Henao et al., 2017).



La cantidad de energía requerida para eliminar agua de granos mediante evaporación supera los 4500 kJ/kg (Kjær et al., 2018). Para evitar el costo asociado a esta demanda energética, los caficultores con producción de hasta 2500 kg de café pergamino seco, hacen uso de los secadores solares parabólicos o tipo túnel diseñados por el Centro Nacional de Investigaciones de Café - Cenicafé cuyo material de cubierta es usualmente polietileno traslúcido (Oliveros et al., 2008, 2017). Estas estructuras, además de contener el café, también cumplen la función de colector recibiendo la radiación solar directa sobre el material de cubierta, lo que hace que en su interior se produzca un efecto de invernadero para que el calor atrapado junto con el movimiento del aire contribuya a la liberación de la humedad contenida en la masa de café. Por esta razón, la cantidad de agua que se puede evaporar dependerá de la temperatura que alcance el aire dentro del secador (y consecuentemente su humedad relativa), por medio de la transformación de la energía solar y de la velocidad a la que circule el viento (Cruz et al., 2010).

La selección de materiales de cubierta para los secadores solares debe tener en cuenta la fracción de radiación solar transmitida, absorbida y reflejada por la superficie. Estas propiedades definen el desempeño térmico del material (Santos et al., 2018). Entre las investigaciones disponibles en secado solar de café usando estructuras con diferentes tipos de cubierta, se encontraron, por ejemplo, que en la República Democrática Popular Lao (Janjai et al., 2011) se modeló y probó un secador solar tipo invernadero a gran escala con cubierta de policarbonato para secado de café lavado, banano y chile. En este caso, se utilizaron 200 kg de café con un contenido de humedad inicial de 52%<sub>bh</sub> los cuales fueron secados en 2 días hasta alcanzar una humedad de 13%<sub>bh</sub>, en comparación con los 4 días que requiere el secado natural al sol para llegar al valor de humedad anteriormente mencionado. En Colombia, Cenicafé realizó un estudio comparativo para secado de café de procesamiento lavado usando secadores solares tipo túnel con dos tipos de cubierta polietileno (plástico tradicional) y tela prosolar (plástico reforzado) (Oliveros et al., 2017). En este caso, los investigadores concluyeron que los plásticos reforzados presentan mayor duración y resistencia al rasgado que los plásticos tradicionales, en cuanto al tiempo de secado, este osciló entre 7 y 10 días para ambos tipos de cubierta. En Brasil, se realizó una investigación en la cual uno de sus fines fue estudiar el efecto tanto del secado solar como del secado mecánico en la calidad sensorial de café de procesamiento natural, los resultados mostraron que los puntajes de calidad, evaluados usando el protocolo SCA (Specialty Coffee Association), fueron más altos en los cafés sometidos a secado solar (Taveira et al., 2015).

Las anteriores investigaciones han brindado herramientas para la comprensión del secado solar tanto para café de procesamiento lavado como para el natural. Sin embargo, aún se desconoce el impacto sobre la calidad física y sensorial que podría tener el uso de secadores solares con estructura tipo gabinete

con diferentes materiales de cubierta en la operación de secado de café de procesamiento natural, bajo condiciones climáticas propias de las fincas productoras. Dado lo anterior, la presente investigación se enfocó en estudiar el efecto de tres (3) materiales de cubierta distintos en secadores solares tipo gabinete sobre la calidad física y sensorial de café procesado por vía seca o natural en una finca colombiana con producción de café a pequeña escala, así como, el comportamiento de la humedad relativa y la temperatura al interior de los secadores. Además, se analizó la concentración de OTA en muestras de café tostado molido resultantes de la investigación.

## **2. Metodología**

### **2.1 Construcción y adecuación del sistema de secado.**

Tres (3) secadores tipo gabinete de 2,0 m de alto, 1,30 m de ancho y 1,20 m de fondo fueron construidos en la finca Buenos Aires, localizada en el municipio de Guayatá, Boyacá, Colombia (Latitud: 4° 58' 19" N, Longitud: 3° 29' 20" W, Altitud: 1680 m.s.n.m.).

Cada estructura fue cubierta con un material diferente de la siguiente manera: policarbonato alveolar (tratamiento TA), tela Prosolar (tratamiento TB) y polietileno para invernadero (tratamiento TC) (Tabla 1). Estos materiales fueron seleccionados por ser superficies traslúcidas, en que la radiación solar se difunde y pasa como radiación difusa, no directa, sin generar temperaturas elevadas (encima de 50°C) que pueden afectar la calidad del grano.

El polietileno para invernadero es de uso común por los productores, la tela Prosolar presenta una tendencia de implementación y el policarbonato alveolar es usado en secadores solares de otros productos agrícolas. Los policarbonatos traslúcidos son polímeros termoplásticos reciclables de baja densidad y alta resistencia al impacto. El policarbonato alveolar es un tipo de policarbonato constituido por placas finas unidas por aletas que le dan rigidez, creando una cámara de aire interna que actúa como aislante. Procurando evitar altos picos de temperatura, el color cobre se seleccionó por su menor valor de transmitancia (0.58) comparado con incoloro (0.95) y verde (0.99) (Bálsamo et al., 2019; Santos et al., 2018).

**Tabla 1.** Especificaciones de los materiales de cubierta de los secadores solares tipo gabinete

<b>Característica</b>	<b>TA</b>	<b>TB</b>	<b>TC</b>
Material	Policarbonato alveolar	Tela Prosolar 140	Polietileno
Espesor (mm)*	4,05	0,18	0,15
Color	Cobre	Claro	Traslúcido
Filtro UV	Si	Si	Si
Marca	Makrolux®	Proplacol®	Monplast®
Precio (COP/m <sup>2</sup> )	36.150	5.200	3.500

(\*) Medidas tomadas en campo de manera directa sobre cada material de cubierta con un pie de metro digital (RM813 Ubermann®, Chile) (TA: Tratamiento A, policarbonato alveolar. TB: Tratamiento B, tela Prosolar. TC: Tratamiento C, polietileno para invernadero).

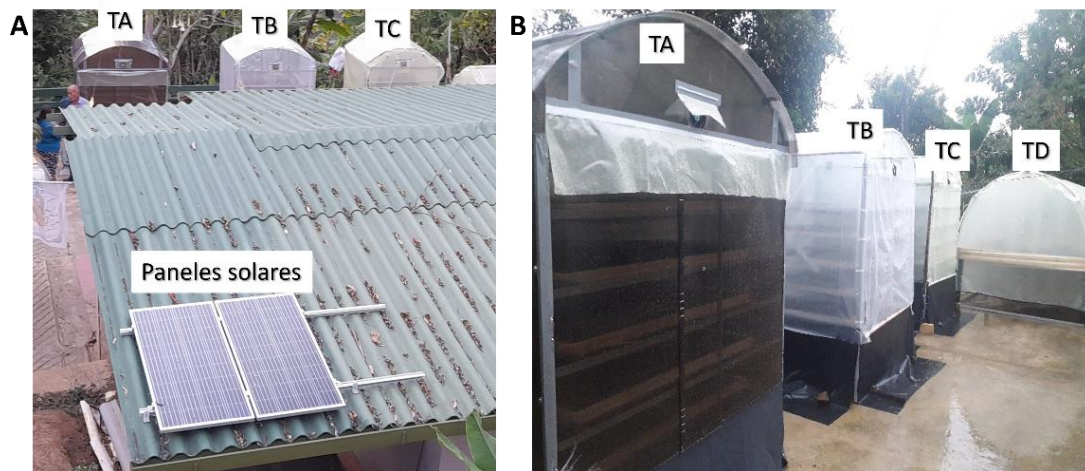
Cada secador estaba compuesto de cinco (5) paseras internas de 1,10 m x 0,90 m elaboradas con listones de madera (Pino cepillado), los cuales fueron encordados con cuerda de nylon encauchetada para disponer sobre ella una malla de polietileno de alta densidad (Malla cafetera 4x4, Colombia) con forma de canastilla con el fin de minimizar el contacto directo de los frutos del café con la madera. En la figura 2 se observan los secadores solares tipo gabinete y paseras usadas en la presente investigación.

En cada secador, se instalaron cuatro (4) ventiladores (Sunon®, China) con una potencia de 3,6 W (watts) cada uno, dos de ellos se ubicaron en la parte inferior para generar un flujo de aire continuo dentro del secador y los otros dos adicionales en la parte superior de las paredes delantera y trasera para que actuaran como extractores. Un sistema fotovoltaico equipado con dos (2) paneles solares de 150W (Figura 3A) generando una corriente continua (DC) de 12V (voltios) cada uno, fue instalado con el fin de garantizar la operación continua de los ventiladores durante el periodo de secado.

El sistema fotovoltaico fue provisto de un controlador de 30A (amperios) a 12V, respaldado por una batería de gel con capacidad de 90Ah (amperios/hora). Se optó por utilizar este sistema fotovoltaico para garantizar un flujo constante de energía eléctrica, dado que en zonas rurales es común el fallo de la red eléctrica municipal. Adicionalmente, un secador solar parabólico tipo túnel con cubierta de polietileno (tratamiento TD), fabricado por la empresa Innovakit® (Colombia) fue usado como el tratamiento control (Figura 3B).



**Figura 2.** Secadores solares tipo gabinete y paseras con café tendido en fruto maduro. TA: Tratamiento A, policarbonato alveolar. TB: Tratamiento B, tela Prosolar. TC: Tratamiento C, polietileno para invernadero.



**Figura 3.** (A) Paneles solares implementados y (B) secadores tipo gabinete y secador parabólico (tratamiento control). TA: Tratamiento A, policarbonato alveolar. TB: Tratamiento B, tela prosolar. TC: Tratamiento C, polietileno para invernadero. TD: Tratamiento D (control), polietileno para invernadero.

## 2.2 Selección de los frutos de café para la operación de secado.

Frutos de café (*Coffea arabica*, variedades Castillo y Tabi rojo) fueron utilizados. Los frutos fueron recolectados mediante cosecha manual selectiva. La herramienta Mediverdes fue empleada para evaluar y monitorear la calidad de los frutos cosechados (Guerrero et al., 2022). El alistamiento del café

se llevó a cabo mediante separación hidráulica de los frutos flotantes y pre-limpieza de la masa de café. Posteriormente, los frutos fueron clasificados manualmente considerando su grado de madurez. El rango de maduración seleccionado correspondió a los niveles 4 (maduro 1), 5 (maduro 2) y 6 (sobremaduro 1) establecido por medio de la escala de color de la herramienta Cromacafé (Peñuela et al., 2022).

Posteriormente, los frutos de café fueron dispuestos en monocapas sobre las paseras, las cuales después fueron ubicadas dentro de cada uno de los secadores, numeradas de forma ascendente de 1 a 5. Como tratamiento control se extendieron tres (3) monocapas de los frutos de café en el secador D (tratamiento TD). De manera adicional, se realizó una medición de sólidos solubles (expresados en porcentaje de grados Brix ( $^{\circ}$ Bx) a una muestra de 30 frutos extraídos del café tendido en cada uno de los tratamientos TA, TB, TC y TD, utilizando un refractómetro (Marca genérica, China).

Con el fin de determinar el contenido de humedad inicial (en base húmeda) del fruto utilizado en la operación de secado, se reservaron muestras de cada uno de los tratamientos TA, TB, TC y TD, las cuales fueron transportadas desde la finca al laboratorio de poscosecha de la Universidad del Tolima (Ibagué, Tolima, Colombia). La humedad inicial del café se determinó según la Norma Técnica Colombiana NTC 2325. Las muestras de café fueron sometidas a secado durante 24 horas a una temperatura de 105  $^{\circ}$ C hasta obtener una masa constante (Icontec, 2005).

### **2.3 Seguimiento de la operación de secado.**

Durante el tiempo de secado se realizó el monitoreo de temperatura y humedad relativa al interior de los cuatro secadores solares. Para tal fin, se instaló en los tres (3) secadores tipo gabinete un dispositivo Datalogger (CEM referencia DT-170, China) y un termohigrómetro digital (Goove referencia H5075, China) en el secador parabólico con cubierta polietileno (tratamiento control). La temperatura y humedad relativa del ambiente exterior en la finca también fue monitoreado (Datalogger CEM referencia DT-170, China).

La pérdida de humedad del fruto en finca se determinó directamente utilizando un medidor portátil (Kett PM 450, Japón). Asimismo, se realizó el seguimiento de la pérdida de peso del café a través de gravimetría, utilizando una canastilla de control cargada con una monocapa de fruto de café sobre la pasera número tres (3) dentro de cada uno de los secadores evaluados. El mismo sistema también fue usado en el tratamiento control (secador parabólico). Adicionalmente, la pérdida de humedad en el fruto fue calculada teóricamente utilizando los datos del peso del café (peso total) de las canastillas testigo y el contenido de humedad inicial del fruto (obtenido en laboratorio), de acuerdo con lo indicado por Henao

et al (2017). Por lo tanto, la humedad expresada en base húmeda ( $H_{bh}$ ) de los frutos de café fue encontrada a partir de la Ecuación 1.

$$H_{bh} = \frac{W_{ag}}{W_t} = \frac{W_t - W_{ms}}{W_t} \text{ (Ecuacion. 1)}$$

Donde:  $H_{bh}$ : contenido de humedad en base húmeda (decimal)

$W_{ag}$ : Peso del agua en el fruto (g)

$W_{ms}$ : Peso de la masa seca en el fruto (g)

$W_t$ : Peso total del fruto contenido en la canastilla (g)

Se aplicaron de 3 a 5 movimientos de la masa de café por día, usando para ello un rastrillo plástico de ocho (8) dientes. Esta operación se mantuvo hasta finalizar el secado con el fin de obtener un secado más homogéneo. Adicionalmente, se realizaron rotaciones de las paseras al interior de los gabinetes garantizando que la canasta de control de pérdida de peso siempre estuviese localizada en la posición número tres (3). Durante toda la operación de secado se realizó frecuentemente una inspección visual de los frutos del café. Los frutos que presentaron moho o algún tipo de deterioro físico fueron extraídos. Estos frutos culminaron su proceso de secado al aire libre en una pasera ubicada bajo sombra. La masa de café correspondiente a los frutos extraídos se identificó como tratamiento TE. Una vez culminada la operación de secado, la masa obtenida en cada tratamiento fue homogeneizada y almacenada en bolsas de polietileno de alta resistencia (GrainPro®, EE. UU) para ser sometidas posteriormente a análisis físico, sensorial, así como, a análisis de OTA (en muestras de café tostado molido).

#### **2.4. Análisis físico, sensorial y de Ocratoxina A, al final del proceso del secado.**

Se realizaron pruebas de análisis a los cafés de los tres (3) tratamientos de los secadores tipo gabinete (TA, TB, TC), al café secado en el secador parabólico (TD) y a la masa conformada por los frutos de café que fueron retirados de los demás tratamientos (TE) por presentar moho o algún grado de deterioro físico.

##### **2.4.1 Análisis físicos de las muestras de café**

El análisis físico fue realizado a partir de 320 g de fruto seco y se evaluó: porcentaje de humedad del fruto seco, porcentaje de humedad de la almendra, porcentaje de merma de fruto seco a almendra

verde, factor de rendimiento, granulometría y clasificación de defectos físicos (negro total, negro parcial, vinagre total, vinagre parcial, daño por hongos (cardenillo), dañado gravemente por insectos (broca severa), dañado ligeramente por insectos (broca de punto), materia extraña y otros. El análisis físico de los defectos se realizó tomando como base la Guía de defectos de café verde Arábica para cafés lavados de la Specialty Coffee Association (SCA, 2018), debido a que, en la actualidad, no existen guías ni protocolos establecidos para el análisis de defectos de la almendra derivada de café procesado por vía seca o natural.

La actividad de agua ( $A_w$ ) y humedad final en base húmeda ( $H_{bh}$ ) del café verde (almendra) de cada uno de los tratamientos (TA, TB, TC, TD y TE) fueron determinadas de manera directa en las muestras utilizando un analizador portátil (HP23-AW, Rotronic®, Ucrania) para la determinación de  $A_w$  y un medidor de humedad (Kett PM 450, Japón) con certificado de calibración del 23 de febrero de 2022 para la determinación del contenido de humedad de la almendra.

#### **2.4.2 Análisis sensorial de las muestras de café**

El análisis sensorial fue realizado según lo establecido en el protocolo de catación de la SCA (SCA, 2015). Para esto, muestras de café verde retenido sobre malla 15 y sin defectos físicos de cada uno de los tratamientos fueron tostadas. Un panel sensorial compuesto por cuatro (4) analistas certificados con licencia Q grader vigente, de las empresas colombianas Café y Procesos S.A.S (Pereira, Risaralda) y Stravaganza Café (Bogotá D.C) realizaron la evaluación de calidad de las muestras. Durante el análisis sensorial los evaluadores también incluyeron descriptores sensoriales libres en cada una de las categorías del formato SCA (fragancia, aroma, sabor, sabor residual acidez y cuerpo). Cada una de las muestras de café fue analizada por duplicado obteniendo 8 puntajes globales SCA para cada tratamiento.

#### **2.4.3 Análisis de Ocratoxina A (OTA), para muestras de café tostado molido.**

Un análisis de OTA fue llevado a cabo en café tostado molido (tueste medio, escala Agtron 55) (Schwartzberg, 2011) de cada uno de los tratamientos evaluados. Para tal fin, 200 g de café tostado molido fueron analizados mediante la aplicación del ensayo inmunoabsorbente ligado a enzimas (ELISA) (Monsalve-Atencio et al., 2021). Los resultados fueron expresados en  $\mu\text{g}/\text{kg}$  (Laboratorio Oaxlab, Medellín, Colombia).

## **2.5 Análisis estadístico.**

Dado que los datos del análisis sensorial no presentaron una distribución normal (prueba de normalidad de Shapiro-Wilk), el análisis de varianza se realizó usando una prueba de Kruskal-Wallis para datos no paramétricos (nivel de confianza del 95%). Una prueba Dunn de comparación múltiple *post hoc* (nivel de confianza del 95%) para comprobar si existían diferencias significativas ( $p < 0.05$ ) en los atributos generales contemplados de la evaluación SCA fue usada. Un análisis multivariado no supervisado por componentes principales (Principal Component Analysis-PCA) fue usado con el fin de visibilizar la agrupación de las variables (tratamientos) en función de los atributos generales de la evaluación sensorial de calidad (SCA) y de los descriptores sensoriales generados libremente por los evaluadores.

## **3. Resultados y Discusión**

### **3.1 Características iniciales de la materia prima.**

Un total de 253,73 kg de café cereza (frutos variedad Castillo y Tabi) fueron recolectados en tres diferentes días de cosecha comprendidos entre el 22 y el 24 de octubre de 2021. Los frutos cosechados y seleccionados el 24 de octubre fueron utilizados para los tratamientos TC y TD teniendo en cuenta que los secadores tenían el mismo material de cubierta. En cada uno de los días, una vez terminada la cosecha se realizó el proceso de selección y alistamiento de las muestras. Los recolectores de café fueron instruidos para realizar una cosecha manual selectiva; sin embargo, en la primera recolección cerca del 25% de los frutos fueron retirados de la masa de café por no encontrarse dentro del rango de madurez objetivo, esta tendencia decreció para los lotes de cosecha de los dos días siguientes (día 2: 12%; día 3: 8%), la misma tendencia fue evidenciada en la cantidad de café retirada por selección hidráulica (Tabla 2). La disminución de los porcentajes con el paso de los días de cosecha, evidencian los resultados de las actividades de capacitación en el tema de cosecha selectiva.

Después del proceso de selección y alistamiento, los frutos fueron dispuestos en cada uno de los secadores bajo estudio. En la Tabla 2 se presentan las cantidades de café antes y después del proceso de selección y alistamiento, la cantidad de café tendido para cada uno de los tres secadores tipo gabinete (TA, TB y TC) y para el tratamiento control (secador parabólico con cubierta de polietileno, tratamiento TD), así como los valores del porcentaje de sólidos solubles promedio y el contenido de humedad inicial del fruto de cada una de las masas de café tendidas.



**Tabla 2.** Cantidades de café en fruto durante las actividades de recolección, alistamiento y tendido y medición de sólidos solubles.

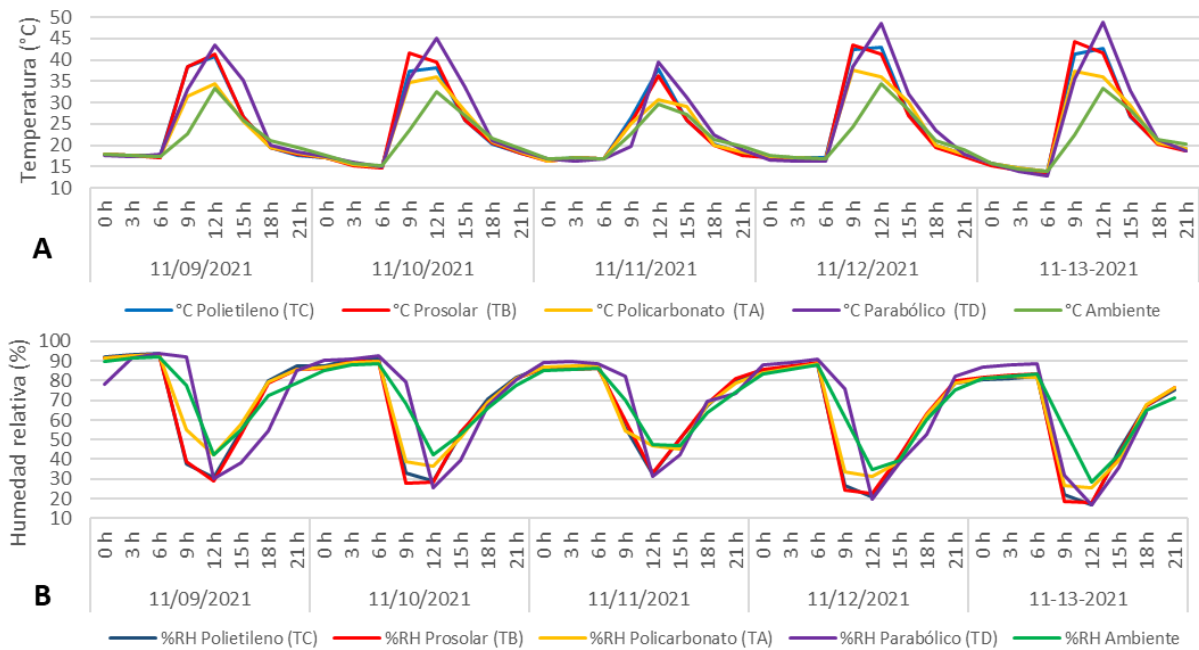
	<b>TA</b>	<b>TB</b>	<b>TC</b>	<b>TD</b>
Fecha alistamiento y cargue de los secadores	22/10/2021	23/10/2021	24/10/2021	24/10/2021
Fruto de café (FC) cosechado (kg)	98,07	75,09	80,57	N/A*
FC retirado por hidráulica de flotes (kg)	21,31	8,42	4,30	N/A*
FC fuera de rango objetivo de maduración (kg)	24,54	11,95	7,84	N/A*
FC disponibles para tendido (kg)	52,22	54,72	68,43	N/A*
Fruto Tendido (FT) por secador (kg)	43,92	42,86	42,67	25,76
FT Promedio por m <sup>2</sup> (kg)	8,54	8,55	8,52	8,59
Sólidos solubles promedio del fruto tendido (% °Bx)	18,43 ± 2,98	18,10 ± 2,40	20,67 ± 2,02	19,07 ± 2,71
Humedad inicial del fruto tendido (% H <sub>bh</sub> )	70	73	70	73

\*No se relacionan valores para estos ítems debido a que el fruto tendido para el tratamiento TD fue tomado del café cosechado y seleccionado el 24/10/2021 una vez se tendió el café de las 5 paseras del tratamiento TC. (TA: Tratamiento A, policarbonato alveolar. TB: Tratamiento B, tela prosolar. TC: Tratamiento C, polietileno para invernadero. TD: Tratamiento D (control), polietileno para invernadero).

De acuerdo con una guía para la producción de café de procesamiento natural y honey (Soto L, 2017) se requiere, entre otras, la implementación de prácticas como: recolección óptima de frutos maduros preferiblemente con medición de sólidos solubles entre 18 y 24% °Bx (cada unidad productiva debe validar el punto óptimo de maduración de acuerdo con la variedad cultivada y sus condiciones agroclimáticas) para contar con azúcares disponibles en la operación de fermentación, así como, la clasificación manual por observación para separar los frutos inmaduros, sobre-maduros y secos con el fin contar con una masa de café uniforme, sin imperfecciones que puedan afectar la calidad de la taza.

### 3.2 Condiciones y análisis de la operación de secado.

Durante el periodo de secado, en la finca donde se localizó el experimento, se presentaron lluvias que mantuvieron la humedad relativa exterior por encima de 30% con picos máximos entre 70 y 90% en el periodo comprendido entre las 6 de la tarde y las 9 de la mañana. Estas condiciones repercutieron en largos tiempos de secado para todos los tratamientos (entre 30 y 42 días). En la figura 4 se presentan los datos de temperatura y humedad relativa registrados al interior de los secadores y en el ambiente externo durante 5 días de proceso.



**Figura 4.** (A) Temperatura (°C) y (B) humedad relativa (%) al interior de los secadores y en el ambiente externo durante cinco (5) días de secado. (TA: Tratamiento A, policarbonato alveolar. TB: Tratamiento B, tela prosolar. TC: Tratamiento C, polietileno para invernadero. TD: Tratamiento D (control), polietileno para invernadero).

En los cuatro (4) tratamientos se registraron temperaturas entre 10 a 20°C por encima de la temperatura ambiente entre las 6 am y 3 pm, evidenciando el efecto invernadero generado por las cubiertas. Asociado a este incremento de temperatura, una reducción de hasta 12 puntos porcentuales en la humedad relativa se registró en el mismo intervalo horario. El hecho de que las temperaturas en el secador parabólico fueron superiores a las temperaturas de los secadores tipo gabinetes se podría atribuir al mayor valor de transmitancia del polietileno de alta densidad (0,605) y a la menor saturación del aire en su interior. Resultados similares fueron reportados por Ángel et al., (2017) al comparar la radiación solar incidente y la transmitida a través de cubiertas de policarbonato color claro, azul, rojo y polietileno de alta densidad en cultivos de calabaza en invernadero.

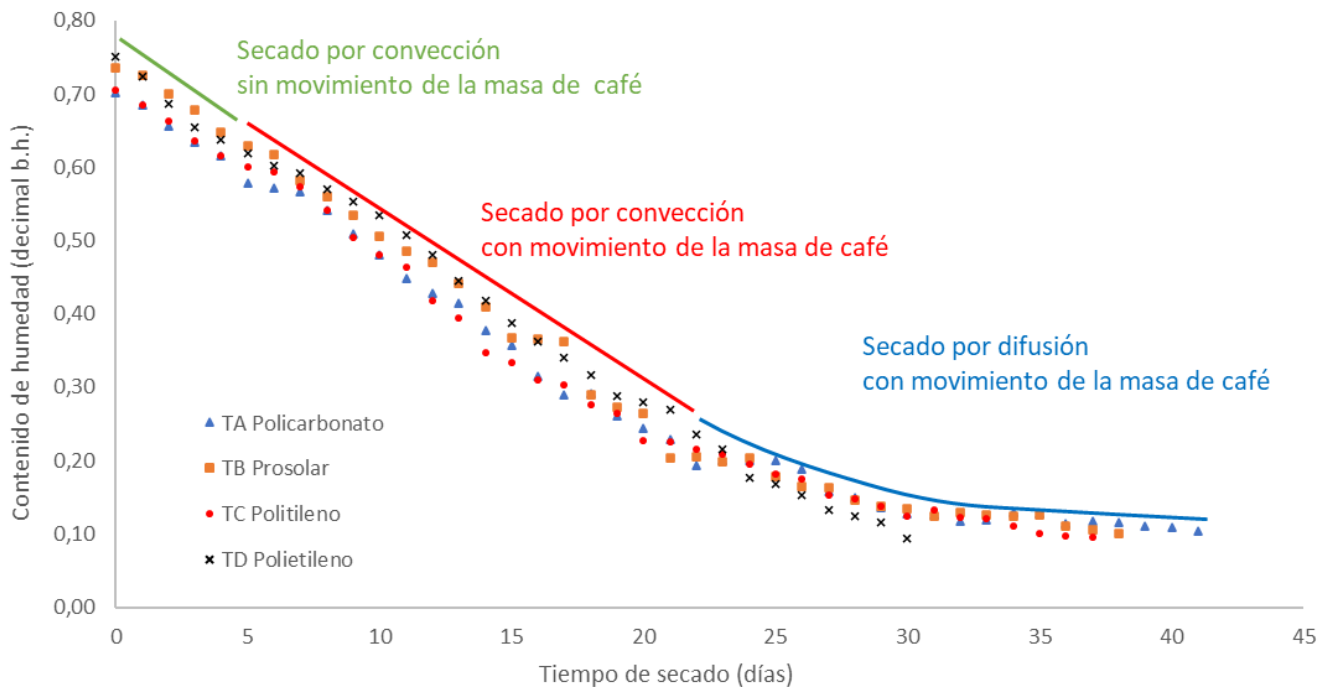
La temperatura promedio al interior de los secadores en estudio presentó pequeñas diferencias:  $22,16 \pm 6,7^{\circ}\text{C}$ ,  $22,59 \pm 8,03^{\circ}\text{C}$ ,  $22,65 \pm 7,87^{\circ}\text{C}$  y  $23,67 \pm 9,31^{\circ}\text{C}$  para TA, TB, TC y TD respectivamente. La menor desviación estándar registrada para el tratamiento TA (cubierta de policarbonato) puede deberse a sus mejores propiedades aislantes ( $k=0.21 \text{ W/mK}$ ) (Santos et al., 2018).

Durante los cinco (5) primeros días de evolución del secado se observó que el café aún estaba muy fresco, por esta razón, no se realizó movimiento a la masa de café en ninguno de los tratamientos con el fin de evitar el daño mecánico del fruto con los dientes del rastrillo. A partir del sexto día se

observó deshidratación del exocarpio y se iniciaron los movimientos del fruto para los tratamientos TA, TB, TC y TD (de 3 a 5 veces/día). También, se realizó rotación de las paseras en los secadores tipo gabinete (cada tercer día, de forma ascendente), iniciando el décimo día de secado para TA, noveno para TB y octavo para TC. La rotación finalizó cuando cada una de las paseras volvió a su posición original.

En la figura 5 se presentan las curvas de secado para los 4 tratamientos. Inicialmente, cuando los frutos presentan un alto contenido de humedad, la tasa de remoción de agua de la superficie es igualada por la tasa de difusión de humedad desde el interior del fruto. Este equilibrio resulta en un periodo de secado a velocidad constante que puede ser observado desde el inicio hasta el día 22 del proceso para los cuatro (4) tratamientos, este periodo es gobernado por la convección.

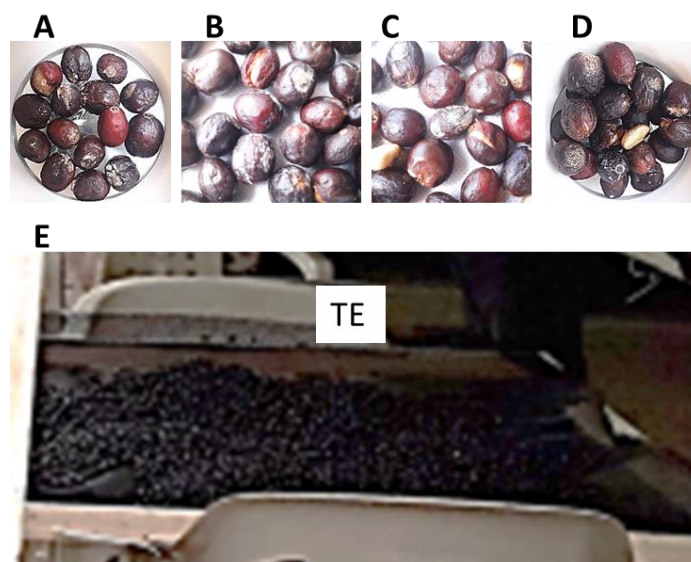
En la operación de secado de productos agrícolas, la difusión líquida es aceptada como el mecanismo que gobierna el movimiento de agua al interior de la matriz. Este mecanismo obedece al segundo principio de la termodinámica (el flujo irá de una mayor concentración hacia regiones de menor concentración) y puede ser descrito a través de la ley de Fick de difusión: la tasa de difusión de humedad es proporcional al gradiente de concentración y al coeficiente de difusión. Después del día 23 la humedad del grano cayó por debajo de 22%  $_{bh}$ , el gradiente de concentración disminuye y el encogimiento de la matriz sólida dificulta el paso de la humedad a través de los poros. Esto hace que la tasa de difusión de humedad al interior del grano caiga por debajo de la tasa de evaporación en la superficie, dando inicio al periodo de secado a velocidad decreciente. Este periodo es gobernado por la difusión y su inicio se puede identificar con la humedad crítica (aproximadamente 22%  $_{bh}$  o 28.2%  $_{bs}$ ). El secado continuó hasta que los granos alcanzaron el contenido de humedad de equilibrio (entre 10% y 12%  $_{bh}$ ). Goneli et al., (2013) determinaron isotermas de sorción para granos de café a diferentes temperaturas. A 20 °C los valores de humedad del grano por encima de 24,83%  $_{bs}$  (19,89%  $_{bh}$ ) corresponden a valores de actividad de agua por encima de 0,8. En este rango de actividad de agua los hongos pueden proliferar con rapidez y afectar negativamente la calidad del grano (Burmester y Eggers, 2010). Durante el secado en este experimento los granos estuvieron expuestos al menos durante 24 días a estas condiciones de actividad de agua, lo que generó algunos problemas por mohos.



**Figura 5.** Curvas de secado solar del café de procesamiento natural en las estructuras con diferentes los materiales de cubierta evaluados. (TA: Tratamiento A, policarbonato alveolar. TB: Tratamiento B, tela prosolar. TC: Tratamiento C, polietileno para invernadero. TD: Tratamiento D (control), polietileno para invernadero).

El tiempo de la operación de secado para los secadores solares tipo gabinete fue de 42, 39 y 38 días para TA, TB y TC, respectivamente; y de 31 días para el tratamiento control TD (secador solar parabólico). Osorio et al., (2022) reportaron tiempos promedio de secado de café de procesamiento natural correspondiente a 14 días para café sometido 100% a secado solar (empleando una pasera solar con 2 cm de capa y una frecuencia de cuatro volteos al día), de 8 días para el secado mecánico y de 12 días para los tratamientos asociados a combinaciones de secado solar más mecánico (año 2020: sede de Cenicafe – Planalto, altitud 1.413 m, temperatura mínima 17,3°C, temperatura máxima 26,8°C, temperatura media 21,4°C y humedad relativa de 79,4%).

Por otro lado, es importante resaltar que durante el proceso de secado después de la inspección visual, se retiraron de los tratamientos TA, TB, TC y TD (entre el 29 de octubre y el 3 de noviembre de 2021) un total de 5,16 kg de frutos que presentaron moho o deterioro físico (TA:1,48kg TB:1,72kg, TC:1,29kg y TD:0,67kg). Para los frutos retirados se culminó el secado bajo sombra al aire libre (tratamiento TE). El tiempo de secado de esta masa de café fue de 21 días (a partir del 3 de noviembre de 2021) y alcanzó un contenido de humedad final en finca 11,0%bh.



**Figura 6.** (A, B, C, D) Frutos retirados de los tratamientos TA, TB, TC y TD por moho o deterioro físico durante la operación de secado. (E) Pasera para el secado bajo sombra al aire libre de la mezcla de frutos retirados de los tratamientos TA, TB, TC y TD que conformaron el tratamiento TE. (TA: Tratamiento A, policarbonato alveolar. TB: Tratamiento B, tela prosolar. TC: Tratamiento C, polietileno para invernadero. TD: Tratamiento D (control), polietileno para invernadero. TE: Tratamiento E: Secado de los frutos retirados por moho o deterioro físico).

Al terminar la operación de secado se obtuvo un peso final del fruto seco de 12,17 kg (TA), 12,07 kg (TB), 12,19 kg (TC), 7,12 kg (TD) y 3,82 kg (TE). Asimismo, la humedad final del fruto seco registrada en finca fue de 10,6%bh (TA), 10,5%bh (TB), 10,6%bh (TC) y 10,7%bh (TD). Resultados similares respecto a la humedad final del fruto fueron encontrados en los cálculos realizados usando la ecuación 1.

### 3.3 Calidad física.

Todas las muestras analizadas presentaron una  $A_w < 0,6$  razón por la cual, se pueden considerar estables al deterioro por microorganismos (Henaó et al., 2017). Los cinco (5) tratamientos presentaron en promedio una merma en trilla del 49,37%. En una investigación de Cenicafé (Osorio et al., 2022) relacionada con secado de café natural (secado solar, combinación de secado solar y mecánico y secado mecánico) se reportaron resultados similares para similares para  $A_w$  y una merma en trilla promedio del  $54,6 \pm 3,4\%$  en las muestras sometidas a secado solar. En la tabla 3, se indican los resultados del análisis físico correspondiente al contenido de humedad del fruto seco, contenido de humedad en almendra (verificado con Kett PM 450 calibrado), actividad de agua ( $A_w$ ) de la almendra, merma en trilla y factor de rendimiento sobre malla 15.

**Tabla 3.** Resultados análisis físico: humedad del fruto seco, contenidos de humedad y actividad de agua en almendra, merma en trilla factor de rendimiento.

Parámetro	Muestra TA	Muestra TB	Muestra TC	Muestra TD	Muestra TE
Humedad del fruto seco (%bh)	10,90	10,30	10,80	11,10	11,40
Humedad final de la almendra (%bh)	9,98	9,67	9,78	9,88	9,98
$A_w$ (0-1)	0,54	0,52	0,52	0,53	0,53
Merma en trilla (%)	49,06	48,47	50,50	48,91	49,91
Factor malla 15 (%)	140,62	138,37	143, 41	144,05	143,04

TA: Tratamiento A, policarbonato alveolar. TB: Tratamiento B, tela prosolar. TC: Tratamiento C, polietileno para invernadero. TD: Tratamiento D (tratamiento control), polietileno para invernadero. TE: Tratamiento E: Secado de los granos retirados por moho o deterioro físico.

De acuerdo con la Resolución 02 de 2016 (FNC, 2016) la almendra resultante del café de procesamiento natural no se clasifica como café “Excelso” exportable sino como café de otras calidades y para su exportación se debe marcar como “Producto de Colombia”. En este sentido, dicha resolución establece que se deberán cumplir con las normas fitosanitarias aplicables, es decir, estar libre de material extraño y contener una humedad entre el 8 y el 12,5%. Considerando lo anterior, el café (almendra) de los tratamientos evaluados en el presente estudio estuvo libre de materia extraña y cumplió el rango de humedad establecido en la Resolución anteriormente mencionada. Es importante resaltar que la calidad de la almendra proveniente de café de procesamiento natural aún no es certificada por la FNC, especialmente porque de acuerdo con la clasificación de la ICO, Colombia está considerado como país productor de café suave lavado y no como productor de café de procesamiento natural. Por lo que actualmente las condiciones comerciales de este tipo de café dependen en gran medida de los acuerdos establecidos de manera directa entre el exportador y el cliente final teniendo en cuenta la calidad sensorial definida principalmente por el perfil y la calidad en taza.

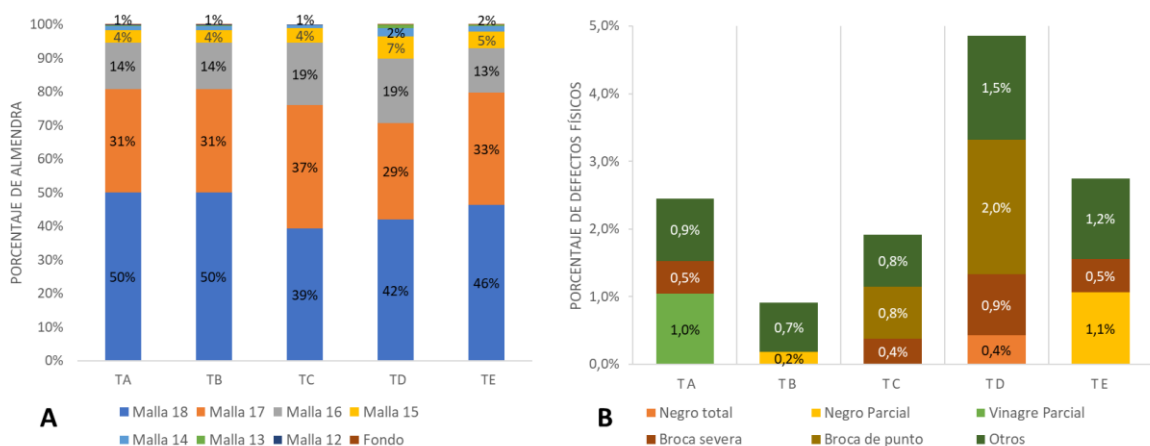
Dado lo anterior, en el presente estudio el análisis físico de los defectos y su efecto sobre la calidad en taza se realizó tomando como base la Guía de defectos de café verde Arábica para cafés lavados (SCA, 2018). Los resultados muestran que alrededor del 50% de los granos fueron retenidos por encima de la malla 15, los cuales se pueden considerar como almendra sana libre de defectos, para todos los tratamientos. Sin embargo, dentro del análisis de los defectos (Figura 6), las muestras provenientes de los tratamientos TD y TE presentaron granos con defectos tales como negro total y parcial, respectivamente; los cuales son considerados como críticos ya que pueden afectar la calidad sensorial de las muestras porque podrían generarse diversos sabores en taza como, por ejemplo, sabor fermentado, ácido acético, rancio/terroso, mohoso/húmedo, agrio o fenólico, además de riesgo de OTA. No se

evidenció grano negro total para los tratamientos TA, TB, TC y TE; no se encontró grano vinagre parcial en las muestras de los tratamientos TA, TB, TC y TE.

Se detectó daño grave y también ligero causado por insectos (broca severa y broca de punto) en las muestras de los tratamientos TA (0,5%), TC (0,4%), TD (0,9%) y TE (0,5%) los cuales, además de afectar la apariencia del grano verde y tostado, podrían generar sabores rancios/terrosos, agrios o mohosos/húmedos (especialmente si se encuentra presente en grandes cantidades) y aumentar el riesgo de presencia de OTA.

En la categoría denominada otros, se agruparon los defectos tales como granos inmaduros presentes en los tratamientos TA, TB, TC y TE, conchas encontradas en el tratamiento TE y granos partidos (en la operación de trilla) presentes en todos los tratamientos. Los granos inmaduros son la principal fuente de los sabores astringentes presentes en el café, además de afectar la apariencia del grano tostado (quaker), las conchas pueden generar que la operación de tueste no sea homogénea y si se llegan a carbonizarse generan un aroma a humo. En lo concerniente a los granos partidos, estos, además de afectar la apariencia del café verde y tostado, pueden afectar la calidad en taza al generar sabores rancios, terrosos, agrios o fermentados.

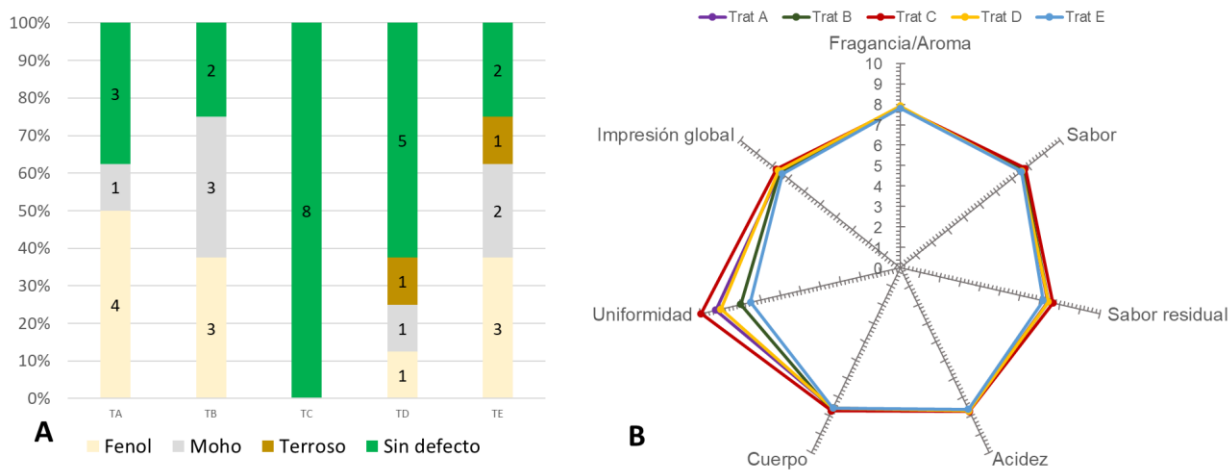
En concordancia con los anteriores resultados, la baja o nula presencia de defectos físicos de categoría 1 y 2 relacionados con grano negro, vinagre o dañado por moho, infiere un óptimo resultado en la cosecha, selección y alistamiento del fruto utilizado para el procesamiento del café natural del presente estudio.



**Figura 7.** Análisis físicos de las muestras de café proveniente de los diferentes sistemas de secado. (A) Análisis de granulometría (B) Defectos físicos en cada muestra. (TA: Tratamiento A, policarbonato alveolar. TB: Tratamiento B, tela prosolar. TC: Tratamiento C, polietileno para invernadero. TD: Tratamiento D (control), polietileno para invernadero. TE: Tratamiento E: Secado de los granos retirados por moho o deterioro físico).

### 3.4 Análisis sensorial.

Las muestras de café de cada uno de los tratamientos fueron analizadas en su perfil sensorial. De la totalidad de sesiones realizadas (muestras por duplicado y analizadas por 4 evaluadores) los resultados revelan que, en las muestras evaluadas con puntajes de calidad sensorial con valores menores a 80 puntos, se encontraron defectos sensoriales definidos como fenol, moho y terroso, siendo el fenol el defecto con mayor frecuencia (Figura 6). Al reportarse este tipo de defectos en el atributo de “taza limpia” en el protocolo SCA de valoración de calidad, también se afecta el valor de uniformidad ya que no se deben encontrar sabores extraños o impresiones negativas que interfieran en el sabor característico del café (Figura 6). De esta forma, cualquier sabor o aroma que no sea café descalificará una taza individual afectando a su vez la uniformidad. Si las tazas saben diferentes, la calificación de este aspecto no sería tan alta, esto de acuerdo al protocolo de catación de la SCA (SCA, 2015).



**Figura 8.** (A) Defectos de taza (B) Valoración atributos SCA. (TA: Tratamiento A, policarbonato alveolar. TB: Tratamiento B, tela Prosolar. TC: Tratamiento C, Polietileno para invernadero, TE: Tratamiento E: Secado de los granos retirados por moho o deterioro físico)

En la tabla 7, se presentan los puntajes globales SCA obtenidos en el análisis sensorial (8 sesiones de catación) realizadas para cada una de las muestras de los 5 tratamientos analizados. La muestra del café secado en el secador solar tipo gabinete con cubierta de polietileno (tratamiento TC) obtuvo puntajes que oscilaron entre 82,00 y 85,75 (café especial de categorías muy bueno y excelente). Además, este tratamiento presentó la mayor uniformidad de resultados en las 8 sesiones de catación, lo cual se evidencia al presentar la menor desviación estándar con respecto a los demás tratamientos.



**Tabla 2.** Puntajes globales SCA de las sesiones de catación realizadas por cada muestra

Tratamiento	Puntaje SCA									Promedio
TA	76,00	67,75	62,00	41,50	59,25	59,75	82,50	80,50	66,16±12,68	
TB	75,25	84,50	67,50	75,00	76,25	74,50	67,75	81,50	75,28±5,51	
TC	85,75	83,00	85,00	85,00	84,50	84,75	84,75	82,00	84,34±1,15	
TD	82,75	83,75	83,00	76,00	74,25	76,00	83,00	78,00	79,59±3,66	
TE	76,25	84,75	62,00	75,25	69,00	76,50	71,00	68,00	72,84±6,44	

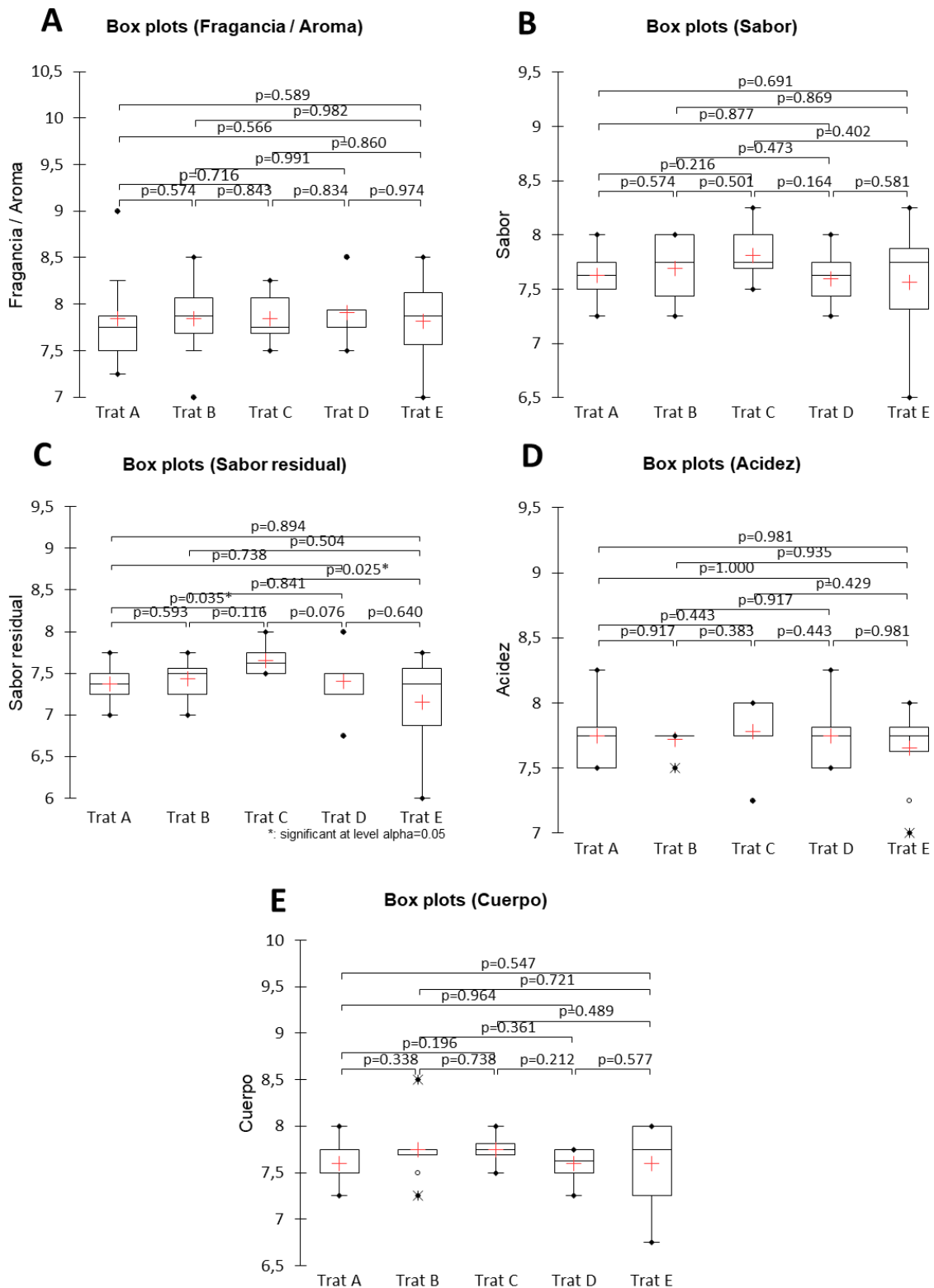
TA: Tratamiento A, policarbonato alveolar. TB: Tratamiento B, Tela Prosolar. TC: Tratamiento C, Polietileno para invernadero, TE: Tratamiento E: Secado de los granos retirados por moho o deterioro físico.

Una prueba de comparación de medias entre todos los tratamientos fue realizada para cada uno de los atributos contemplados en el protocolo SCA de valoración de calidad sensorial con el fin de investigar la existencia de diferencias entre cada una de las muestras (Figura 8). No se evidenciaron diferencias estadísticamente significativas ( $p>0,05$ ) entre los 5 tratamientos analizados para los atributos de fragancia/aroma, sabor, acidez y cuerpo. En el sabor residual diferencias estadísticamente significativas ( $p=0,035$ ) se presentaron entre las muestras del tratamiento TA (cubierta de policarbonato) y el tratamiento TC (cubierta de polietileno), asimismo este último tratamiento (TC) también presentó diferencias significativas ( $p=0,025$ ) con el tratamiento TE (frutos que presentaron deterioro o moho, secado al aire libre). En general, el tratamiento TC presentó una calificación mayor en sabor residual (7,65), a su vez que fue descrito principalmente como largo y agradable, mientras que, en los tratamientos TA y TE se encontraron notas secas y astringentes, principalmente.

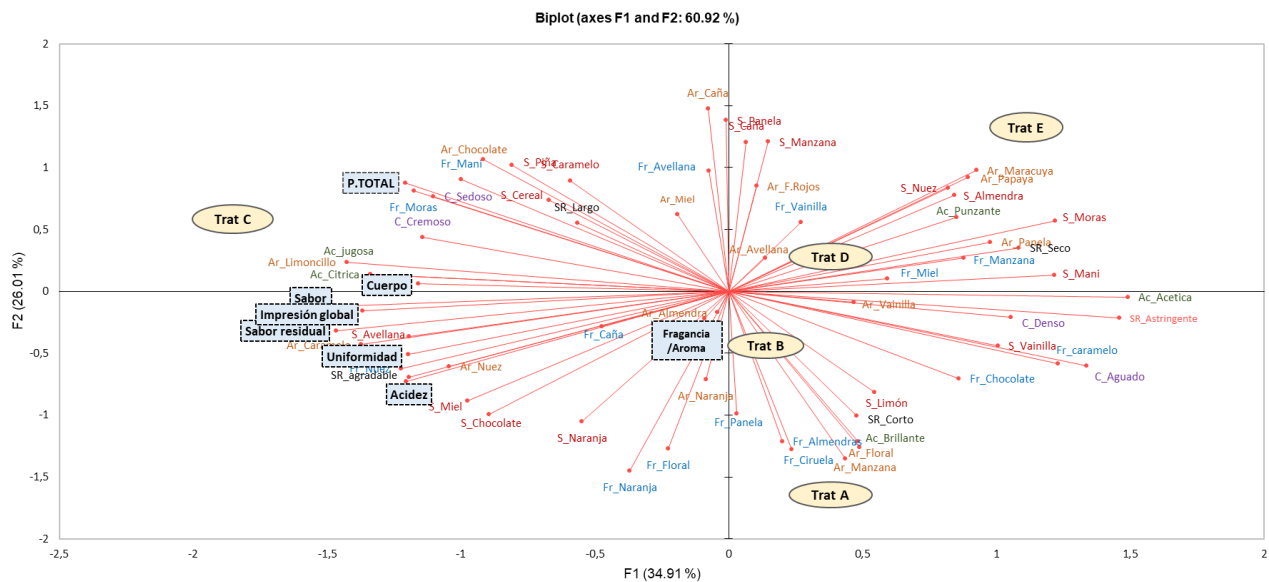
Por otra parte, el análisis PCA (Figura 11) muestra que el tratamiento TC fue el único que presentó una correlación positiva con los atributos generales de SCA correspondientes a sabor, sabor residual, acidez, cuerpo, uniformidad, impresión global, así como con el puntaje total SCA, corroborando que esta muestra fue valorada como diferente a nivel sensorial frente a las demás muestras de los otros tratamientos evaluados. Asimismo, TC presentó una correlación con los descriptores sensoriales moras, maní, nueces (fragancia), limoncillo, caramelo (aroma), avellanas, miel (sabor), sabor residual agradable, acidez jugosa y cítrica y cuerpo (sedoso, cremoso). Estas correlaciones pueden indicar que la presencia de estos atributos en el café de procesamiento natural hace que los evaluadores generen un puntaje de calidad más alto, como lo encontrado para la muestra del tratamiento TC.

Por su parte, el tratamiento TA tuvo correlación con los descriptores relacionados con fragancia (almendras y ciruelas), aroma (floral y manzana), sabor (limón), sabor residual (corto) y acidez

(brillante). Asimismo, el tratamiento TB tuvo correlación con los descriptores fragancia (panela, almendra y ciruela) y aroma (almendra y naranja). El tratamiento TD tuvo correlación con los descriptores fragancia (vainilla y miel) y aroma (vainilla y avellana). Finalmente, el tratamiento TE presentó correlación con los descriptores relacionados con fragancia (manzana), aroma (maracuyá, papaya y panela), sabor (nuez, almendra, moras, maní), acidez (punzante), sabor residual (seco). Si bien, la mayoría de estos atributos específicos son considerados deseables en café, en general las muestras de los tratamientos TB, TD y TE también fueron correlacionadas con sabor residual seco, astringente y corto lo que concuerda con la baja calificación global dada en el sabor residual para este tipo de muestras. Por lo tanto, la presencia de estos atributos sensoriales en sabor residual junto con una acidez punzante que también fue asociada a estas muestras podrían ser el indicativo de la valoración de calidad más baja comparada con la muestra TC.



**Figura 9.** Prueba Kruskal-Wallis (nivel de confianza del 95%) para los atributos: (A) Fragancia/aroma (B) Sabor (C) Sabor residual (D) Acidez (E) Cuerpo. (TA: Tratamiento A, policarbonato alveolar. TB: Tratamiento B, tela Prosolar. TC: Tratamiento C, polietileno para invernadero, TE: Tratamiento E: Secado de los granos retirados por moho o deterioro físico).



**Figura 10.** Gráfica de análisis de componentes principales. (TA: Tratamiento A, policarbonato alveolar. TB: Tratamiento B, tela Prosolar. TC: Tratamiento C, polietileno para invernadero, TE: Tratamiento E: Secado de los granos retirados por moho o deterioro físico).

### 3.5 Análisis de (OTA) en café tostado molido

El análisis de OTA en café tostado molido fue considerado en esta investigación, ya que durante la operación de secado se presentaron granos con moho o deterioro físico que fueron extraídos de los tratamientos TA, TB, TC y TD que conforman el tratamiento TE. En este sentido, es importante mencionar que el consumo de café tostado molido con concentraciones de OTA mayores a  $5\mu\text{g/kg}$  (Minsalud-Resolución 4506,2013), podría causar daño o insuficiencia renal (Ráduly et al., 2020). La OTA es un metabolito fúngico tóxico clasificado por el Centro Internacional de Investigaciones sobre el Cáncer (CIIC) como posible carcinógeno humano del Grupo 2b (Codex Alimentarius, 2009).

La concentración de OTA presente en las cinco (5) muestras analizadas no excedió el valor de  $5\mu\text{g/kg}$ , cumpliendo con la normatividad colombiana, siendo aptas para el consumo humano. Cabe resaltar que la muestra del tratamiento TE no excedió los niveles permisibles de OTA ( $3,08\mu\text{g/kg}$ ) ni presentó la mayor concentración de esta. En cuanto a las muestras analizadas de los secadores tipo gabinete (tratamientos TA, TB y TC) y del secador parabólico (tratamiento TD) los valores del nivel de OTA se presentan en orden ascendente, así:  $2,51\mu\text{g/kg}$  (TD),  $2,69\mu\text{g/kg}$  (TC),  $2,94\mu\text{g/kg}$  (TA) y  $3,29\mu\text{g/kg}$  (TB) estos valores presentaron un comportamiento que podría estar relacionado de forma directa

con la cantidad de los frutos que fueron retirados de cada uno de los tratamientos para conformar el tratamiento TE.

#### **4. Conclusiones**

El efecto del material de cubierta en secadores solares tipo gabinete (tratamientos TA, TB y TC) sobre la calidad física y sensorial de café de procesamiento natural fue evaluado comparándolo con un tratamiento control representado por un secador solar tradicional tipo parabólico con cubierta de polietileno (Tratamiento TD). En el tratamiento control TD se registraron las temperaturas más altas lo cual se podría atribuir al mayor valor de transmitancia del polietileno de alta densidad y a la menor saturación del aire en su interior.

Los secadores tipo gabinete (tratamientos TA, TB y TC) presentaron un mayor tiempo de secado respecto al secador parabólico (tratamiento TD). Por su configuración, este último expone la monocapa de granos a un flujo de aire continuamente renovado que difícilmente estará saturado. Esta condición requiere que se disponga de una grande superficie para la instalación de este tipo de secadores.

Los secadores tipo gabinete pretenden optimizar espacio colocando varias capas (paseras) verticalmente en un ambiente cerrado. Pese a que los gabinetes contaban con sistema de ventilación interna, las altas humedades relativas del lugar donde se realizó el estudio repercutieron en largos tiempos de secado. En este tipo de condiciones climáticas deberán incorporarse sistemas para reducir la humedad relativa al interior de los gabinetes. El policarbonato incoloro podría ser evaluado para sacar ventaja de su mayor transmitancia.

La menor variación en el comportamiento de la temperatura y humedad relativa se presentó al interior del tratamiento TA (secador solar tipo gabinete con cubierta de policarbonato) debido a las propiedades aislantes del material de cubierta. Sin embargo, las temperaturas al interior de este gabinete no superaron los 35°C y la humedad relativa difícilmente bajó de 30%. El análisis sensorial de este tratamiento presentó defectos en taza como fenol y moho; sin embargo, presentó descriptores positivos para fragancia (almendras y ciruelas), aroma (floral y manzana), sabor (limón) y acidez (brillante).

Aunque las estructuras de los tratamientos TC (secador solar tipo gabinete con cubierta de polietileno) y TD (secador solar parabólico con cubierta de polietileno) tenían el mismo material de cubierta, en la muestra del tratamiento TC no se encontraron defectos en taza, mientras que en el tratamiento TD se encontraron defectos en taza como moho, fenol y terroso.

La muestra del tratamiento TC (secador tipo gabinete con cubierta de polietileno) fue valorada como diferente a nivel sensorial frente a las demás muestras de los otros tratamientos evaluados. TC fue el único tratamiento que presentó una correlación positiva (análisis PCA) con los atributos generales de SCA correspondientes a sabor, sabor residual, acidez, cuerpo, uniformidad, impresión global y presentó una correlación con los descriptores sensoriales moras, maní, nueces (fragancia), limoncillo, caramelo (aroma), avellanas, miel (sabor), sabor residual agradable, acidez jugosa y cítrica y cuerpo (sedoso, cremoso).

No se presentaron diferencias estadísticamente significativas en la valoración de los atributos SCA relacionados con Fragancia/Aroma, Sabor, Acidez y Cuerpo de los tratamientos analizados (TA, TB, TC, TD y TE)

La investigación aplicada en fincas productoras en diferentes épocas de cosecha es indispensable para comprender las variables agroclimáticas que influyen en el secado solar del café con el fin de incorporar nuevas metodologías y tecnologías que permitan minimizar defectos en taza, así como una mayor comprensión y eficiencia de este tipo de secado.

Estudios como este permiten reflexionar sobre la posibilidad de que actores tanto públicos como privados de la cadena de valor del café continúen implementando estrategias para contar con nuevas herramientas y lineamientos enfocados a la producción, poscosecha, análisis de calidad y comercialización de los cafés de procesamiento natural.

## **5. Agradecimientos**

Los autores agradecen al caficultor Juan de Jesús Pinto Huertas y familia, (finca Buenos Aires, Guayatá, Boyacá, Colombia). Al equipo de cosecha y poscosecha. A Marina Barrera, Pedro Aragón, Antonio Barrera y a la marca de café De Aragón® (soporte económico para la financiación de la presente investigación). A las empresas Café y Procesos, Stravaganza Café y Expocafé (voluntarios para análisis físicos, sensoriales, medición actividad de agua y tueste de muestras para análisis de OTA).

## **6. Referencias**

- Alves, G., Borém, F., Andrade, E., Isquierdo, E., Siqueira, V., & Dias, C. (2020). Influence of different temperatures and airflows on drying of natural and pulped coffee. *Engenharia Agricola*, 40(2), 192–200. <https://doi.org/10.1590/1809-4430-ENG.AGRIC.V40N2P192-200/2020>
- Ángel, M., Zermeño, A., Melendres, A., Campos, S., Cadena, M., & Bosque, G. (2017). Características de la cubierta de un túnel efecto en radiación, clorofila y rendimiento de calabacita. In *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas* (Vol. 8, pp. 1127–1142).

- Balsamo, A., Vieira, B., & Sanfelice, R. (2019). Estudio comparativo entre materiais a base de vidro e policarbonato em projetos de superficies transparentes. *Revista Brasileira de Ciência, Tecnologia e Inovação*, 4(3), 327. <https://doi.org/10.18554/rbcti.v4i3.3904>
- Benites, A. J., Fernandes, M., Boleto, A. R., Azevedo, S., Silva, S., & Leitão, A. L. (2017). Occurrence of ochratoxin A in roasted coffee samples commercialized in Portugal. *Food Control*, 73, 1223–1228. <https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2016.10.037>
- Borém, F., Correa, C., & Tavares, E. (2014). *Handbook of post-harvest coffee technology: A comprehensive guide to the processing, drying, and storage of coffee*.
- Burmester, K., & Eggers, R. (2010). Heat and mass transfer during the coffee drying process. *Journal of Food Engineering*, 99(4), 430–436. <https://doi.org/10.1016/J.JFOODENG.2009.12.021>
- Codex Alimentarius. (2009). *CAC/RCP 69-2009. Código de prácticas para prevenir y reducir la contaminación de Ocratoxina A en el café*.
- CQI Coffee Quality Institute. (2017). *Libro de trabajo del estudiante V 2.0. Course #2199: Q Processing Course Level 2 – Professional. Mayo 14 al 19 de 2018*. (pp. 25–25).
- Cruz, D., López De León, E., Pascual, L. F., & Battaglia, M. (2010). *Guía técnica de construcción y funcionamiento de secadoras solares tipo domo*.
- de Melo Pereira, G. v., de Carvalho Neto, D. P., Magalhães Júnior, A. I., Vásquez, Z. S., Medeiros, A. B. P., Vandenberghe, L. P. S., & Soccol, C. R. (2019). Exploring the impacts of postharvest processing on the aroma formation of coffee beans – A review. In *Food Chemistry* (Vol. 272, pp. 441–452). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2018.08.061>
- Díaz, A., Silva, M., & Dávila, J. (2018). Relationship between good hygiene practices and ochratoxin A in organic coffee (*Coffea arabica* L.) from the main coffee regions in Peru. *Scientia Agropecuaria*, 9(2), 177–187. <https://doi.org/10.17268/sci.agropecu.2018.02.02>
- FAO. (2006). *Food and Agriculture Organization of the United Nations. Final Technical Report - Project CFC/ICO/06 - GCP/INT/743/CFC. Enhancement of Coffee Quality through the Prevention of Mould Formation*.
- FNC. (2016). Federación Nacional de Cafeteros de Colombia, Resolución 02. In *Normas de calidad del café verde en almendra para exportación* (No. 02; pp. 1–5). Federación Nacional de Cafeteros de Colombia.
- FNC. (2018). *Federación Nacional de Cafeteros. Informe de gestión 2018* (pp. 10–10).
- Goneli, A. L. D., Corrêa, P. C., Oliveira, G. H. H., & Afonso Júnior, P. C. (2013). Water sorption properties of coffee fruits, pulped and green coffee. *LWT - Food Science and Technology*, 50(2), 386–391. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2012.09.006>
- Guerrero, A., Sanz, J., Peñuela, A., & Ramírez, C. (2022). Mediverdes®: un método para medir la calidad de la recolección del café en el campo. *Avances Técnicos Cenicafé*, 536, 1–8. <https://doi.org/10.38141/10779/0536>
- Henao, J. D., Gutiérrez, N., & Orozco, D. A. (2017). *Buenas prácticas y procedimientos para el secado de cafés especiales*.
- ICO. (2022). Organización Internacional del Café. In *Informe del mercado del café* (pp. 1–11).

- Icontec. (2005). *Instituto Colombiano de Normas Técnicas - NTC 2325:2005 Café verde. Determinación de la pérdida de masa a 105 °C.*
- Janjai, S., Intawee, P., Kaewkiew, J., Sritus, C., & Khamvongsa, V. (2011). A large-scale solar greenhouse dryer using polycarbonate cover: Modeling and testing in a tropical environment of Lao People's Democratic Republic. *Renewable Energy*, 36(3), 1053–1062. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2010.09.008>
- Kjær, L. S., Poulsen, M., Sørensen, K., & Condra, T. (2018). Modelling of hot air chamber designs of a continuous flow grain dryer. *Engineering Science and Technology, an International Journal*, 21(5), 1047–1055. <https://doi.org/10.1016/J.JESTCH.2018.02.002>
- Minsalud. (2013). *Ministerio de Salud y Protección Social, Resolución 4506. Por la cual se establecen los niveles máximos de contaminantes en los alimentos destinados al consumo humano y se dictan otras disposiciones.*
- Monsalve-Atencio, R., Sanchez, K., Camaño, J., Lopera-Cardona, S., & Ortiz-Reyes, B. (2021). Determination of ochratoxin a in coffee by ELISA method and its relationship with the physical, physicochemical and microbiological properties. *Vitae*, 28(2). <https://doi.org/10.17533/udea.vitae.v28n2a343838>
- Oliveros, C., Ramírez, C., Sanz, J., & Peñuela, A. (2008). *Avances Técnicos 376: Secador parabólico mejorado. Centro Nacional de Investigaciones de Café – Cenicafé.*
- Oliveros, C., Ramírez, C., Tibaduiza, C., & Sanz, J. (2017). *Avances Técnicos 482: Construcción de secadores tipo túnel con nuevos materiales. Centro Nacional de Investigaciones de Café – Cenicafé.*
- Osorio, V., Usaquén, J., Shuler, J., & Fernández, M. (2022). Efecto de la combinación de procesos de secado en la calidad del café natural obtenido vía seca. *Revista Cenicafé*, 73 (1)(e73101), 7–23. <https://doi.org/10.38141/10778/73101>
- Peñuela, A., Guerrero, A., & Sanz, J. (2022). Cromacafé® Herramienta para identificar los estados de madurez de las variedades de café de fruto rojo. *Avances Técnicos Cenicafé*, 535, 1–8. <https://doi.org/10.38141/10779/0535>
- Ráduly, Z., Szabó, L., Madar, A., Pócsi, I., & Csernoch, L. (2020). Toxicological and Medical Aspects of Aspergillus-Derived Mycotoxins Entering the Feed and Food Chain. In *Frontiers in Microbiology* (Vol. 10). Frontiers Media S.A. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2019.02908>
- Rhouati, A., Yang, C., Hayat, A., & Marty, J.-L. (2013). Aptamers: A Promising Tool for Ochratoxin A Detection in Food Analysis. *Toxins*, 5. <https://doi.org/10.3390/toxins5111988>
- Rotta, N. M., Curry, S., Han, J., Reconco, R., Spang, E., Ristenpart, W., & Donis-González, I. R. (2021). A comprehensive analysis of operations and mass flows in postharvest processing of washed coffee. *Resources, Conservation and Recycling*, 170. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2021.105554>
- Santos, J., Fernandes, M., de Lima, R., & Temp, M. (2018). Optical behavior of translucent glasses and polycarbonates against solar radiation. *Revista Materia*, 23(3). <https://doi.org/10.1590/S1517-707620180003.0493>
- SCA. (2015). *Specialty Coffee Association SCAA. Protocols. Cupping Specialty Coffee.*
- SCA. (2018). *Specialty Coffee Association. El café Árábica lavado Guía de defectos del café verde. Edición nº3.*
- Schwartzberg, H. (2011). *Batch coffee roasting; roasting energy use; reducing that use.*



Soto L. (2017). *Guía de buenas prácticas para la producción de café semi lavado y natural* (pp. 1–13).

Taveira, J., Borém, F., Delyzette, S., Oliveira, P., Giomo, G., Isquierdo, E., & Fortunato, V. (2015). Post-harvest effects on beverage quality and physiological performance of coffee beans. *African Journal of Agricultural Research*, *10*(12), 1457–1466. <https://doi.org/10.5897/ajar2014.9263>