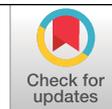


SECADO SOLAR DE CAFÉ USANDO DIFERENTES TIPOS DE CUBIERTAS PLÁSTICAS

Aída Esther Peñuela-Martínez *, María Valentina Restrepo Rivera **,
Carlos Alfonso Tibaduiza Vianchá ***

Peñuela-Martínez, A. E., Restrepo-Rivera, M. V., & Tibaduiza, C. A. (2022). Secado solar de café usando diferentes tipos de cubiertas plásticas. *Revista Cenicafé*, 73(2), e73206. <https://doi.org/10.38141/10778/73206>



Recientemente se ha incrementado el uso de cubiertas plásticas de color azul para realizar el secado solar del café, argumentando que sus propiedades ópticas tienen beneficios sobre la calidad en taza; sin embargo, su efecto sobre la misma es desconocido. Esta investigación determinó el efecto de cinco tipos de cubiertas plásticas diferentes, sobre la calidad sensorial y tiempos de secado realizando procesos de secado solar de manera simultánea mediante un diseño experimental de bloques completos al azar, utilizando café procedente de la Estación Experimental Naranjal. Se determinaron las curvas de secado en cada condición, así como el comportamiento de la temperatura. Al café obtenido se le realizó el análisis sensorial mediante el protocolo SCA. Se registró información acerca de las variables relacionadas con las condiciones ambientales durante cada proceso (factor de bloqueo). La calidad en taza obtuvo un promedio de 81,4 puntos SCA, el análisis de varianza no mostró diferencias significativas por efecto del uso de las diferentes cubiertas plásticas. Se presentaron diferencias en el tiempo de secado, siendo de hasta 40 horas menor para el testigo respecto a las cubiertas azul y naranja.

Palabras clave: Calidad sensorial, tiempo de secado, temperatura de secado, cubiertas plásticas, Cenicafé, Colombia.

SOLAR COFFEE DRYING USING DIFFERENT TYPES OF PLASTIC COVERS

Recently, the use of blue plastic covers to perform solar drying of coffee has increased due to their optical properties that may benefit cup quality. However, such effects are still unknown. This research determined the effect of five different types of plastic covers on sensory quality and drying times by performing solar drying processes simultaneously through an experimental randomized complete block design, using coffee from Naranjal Experiment Station. The drying curves in each condition as well as the behavior of the temperature were determined. A sensory analysis was made to the coffee obtained using the SCA protocol. The information about variables related to environmental conditions during each process (Blocking Factor) was recorded. The cup quality obtained had an average of 81.4 SCA points, the analysis of variance showed no significant differences related to the effect of the use of the different plastic covers. The drying time of the control was up to 40 hours shorter than that of the blue and orange covers.

Keywords: Sensory quality, drying time, drying temperature, plastic covers, Cenicafé, Colombia.

* Investigador Científico II. Disciplina de Poscosecha, Centro Nacional de Investigaciones de Café, Cenicafé. <https://orcid.org/0000-0003-4454-9778>

** Practicante hasta abril de 2021. Disciplina de Poscosecha, Cenicafé. <https://orcid.org/0000-0002-6845-4215>

*** Asistente de Investigación. Disciplina de Poscosecha, Cenicafé. <https://orcid.org/0000-0002-7053-0942>



En el secado solar del café el aprovechamiento de la radiación y la energía del aire se ha utilizado como una alternativa de bajo costo para obtener el café pergamino seco (cps), especialmente cuando la producción máxima es de 3.500 kg año⁻¹ de cps (Parra et al., 2017), y en las fincas de mayores producciones en épocas de bajo flujo de café. Los desarrollos tecnológicos en esta área se han enfocado en ofrecer opciones que permitan tener mayor eficiencia térmica del proceso, reflejado en menores tiempos de secado, de acuerdo con las horas de brillo solar (Oliveros et al., 2013), bajo el enfoque de la resistencia mecánica del material y la pérdida de propiedades ópticas (Oliveros et al., 2006; Oliveros et al., 2017), con el fin de garantizar una mayor durabilidad y, por lo tanto, menores costos de mantenimiento.

Este tipo de secado es un proceso complejo, en el que la humedad del grano disminuye durante el día y aumenta durante la noche, dada la gran cantidad de variables que intervienen en él, tales como la radiación solar, la temperatura, la velocidad y la humedad del aire, las cuales pueden variar durante el día y entre días (Roa et al., 1999). Lo anterior conlleva a tener tiempos de secado que pueden variar desde cinco hasta 20 días, dependiendo de las condiciones ambientales del lugar, al momento de realizar la operación (Roa, Oliveros y Ramírez 2000). Este proceso se lleva a cabo mediante el intercambio de energía térmica y humedad en la superficie de los granos, por lo que los primeros en disminuir su humedad, dada la evaporación, son los que se encuentran en la parte superior de la capa, provocando un calentamiento mayor al de los granos de la capa inferior, que se mantienen además en el mismo estado de humedad. Con el fin de tener un adecuado aprovechamiento de la radiación solar y la energía del aire, en Cenicafé se han desarrollado tecnologías que permiten obtener café de buena

calidad física y sensorial, dentro de éstas se encuentran el secador parabólico y el secador tipo túnel, que son estructuras con cubiertas plásticas que permiten la mejor utilización de la radiación difusa en días poco soleados o lluviosos, o de la radiación directa durante las horas de mayor brillo solar (Roa et al., 2000). Las cubiertas plásticas utilizadas para los secadores solares han sido diseñadas para el uso agrícola, especialmente para invernaderos, en los cuales se han tenido en cuenta las propiedades mecánicas, ópticas y térmicas, y su relación con las variables ambientales a las que quedan expuestas.

Los plásticos utilizados en las cubiertas de los secadores tienen diferentes propiedades ópticas, mecánicas y térmicas, que pueden variar dependiendo del fin deseado. La transmisión de luz en el rango visible del espectro (400 a 700 nm), es una de las más importantes propiedades ópticas, dado que la intensidad de la radiación solar bajo una cubierta plástica siempre es menor que la que hay en el exterior, debido a la reflexión. Esta propiedad se mide a través de la transmisión global de la luz visible (TGLV), especialmente importante para cultivos en producción. Para el secado de café también es de interés el porcentaje de transmisión de luz difusa, que es la que se desvía más de 2,5° respecto a la dirección del haz de luz incidente. Una película plástica con mayor porcentaje de difusión es especialmente útil en lugares en los que hay poca nubosidad, alta radiación y escasez de lluvia, mientras que en climas con mayor humedad se prefieren películas con menor porcentaje de transmisión de luz difusa, es decir, que sean lo más claras posibles, ya que la radiación global ya es difusa por la nubosidad del sitio (Espí, 2012).

El polietileno de baja densidad y el EVA (co-polímero de etileno y acetato de vinilo) componentes de los plásticos, permiten tener

propiedades mecánicas como la resistencia a tensiones e impactos físicos y ambientales a los que se ve expuesta la película durante y después de su instalación. Estas propiedades están relacionadas con la resistencia al impacto y al rasgado, así como el porcentaje de elongación y la tensión en el punto de rotura (PQA, 2001). En la evaluación de estas propiedades, en dos tipos de cubiertas plásticas comercialmente usadas, se obtuvo una disminución en la resistencia al rasgado hasta del 82% y un incremento entre 22% y 29% de la resistencia a la tensión en punto de rotura, que condujeron a una disminución en la durabilidad del material (Oliveros et al., 2013). Respecto a las propiedades térmicas, especialmente la termicidad, estas hacen referencia a la capacidad de retener temperatura durante la noche, para evitar enfriamientos excesivos o para controlar la temperatura diurna excesiva bajo el invernadero en las zonas tropicales o desérticas (Espí, 2012).

Con el incremento en la demanda de cafés con perfiles especiales en taza, el secado solar ha tomado importancia dada la creencia en que este tipo de proceso permite obtener café de mejor calidad, soportada en menores temperaturas y mayores tiempos de secado. Lo anterior, ha llevado a realizar variaciones, tales como el uso de cubiertas plásticas de color azul, sin que se conozca el fundamento técnico de su implementación. Tampoco se han considerado las propiedades ópticas de este tipo de plástico, ni los factores ambientales que inciden en el secado como el brillo, la radiación solar y la temperatura del aire, que en algunos lugares o épocas del año no son apropiados para realizar este tipo de proceso.

El secado es una de las etapas del proceso poscosecha de mayor cuidado dentro del manejo del café, dada su relación con la causa de defectos de la calidad física, con consecuencias en la calidad en taza. Ante este panorama

se hizo necesario conocer el efecto del uso de este tipo de cubiertas plásticas sobre la calidad del café, además de su incidencia en el desarrollo del proceso, con el fin de suministrar la información técnica relacionada con su uso, bajo la hipótesis planteada de que el tipo de plástico usado para el secado solar de café no modifica los atributos en taza.

MATERIALES Y MÉTODOS

Localización

Esta investigación se realizó en el área de secado solar de la disciplina de Poscosecha de Cenicafé, ubicado en Manizales (Caldas), a una altitud de 1.310 m, con una temperatura media anual de 21,2°C y humedad relativa del 78%. Se utilizó café de las variedades Cenicafé 1 y Castillo® General, procedentes de la Estación Experimental Naranjal.

Diseño experimental

Para el desarrollo de esta investigación se aplicó un diseño experimental de Bloques al Azar (DBA) con cinco tratamientos, que corresponden a procesos de secado solar utilizando cinco tipos de cubiertas plásticas. Para esto se utilizaron secadores tipo túnel contruidos a escala, con un área de 2 m² y capacidad para secar 28 kg de café lavado (14 kg cps), que constituyeron la unidad de trabajo. El diseño de los secadores consideró la extracción de aire exhausto, a través de una sección circular de seis pulgadas, ubicada en la parte superior. También, se consideró que la cubierta plástica estuviera separada del suelo no más de 5 cm, con el fin de tener el secado por efecto de la cubierta específicamente. Para el piso del secador se utilizó malla plástica red 5000 para permitir mayor circulación de aire. Con este tipo secadores se obtiene una reducción en el tiempo de secado hasta del 50% respecto a otras tecnologías como las

bandejas móviles o secadores parabólicos con piso de concreto (Oliveros et al., 2013).

Cada secador se cubrió con un tipo de cubierta plástica con características diferentes, respecto al color, porcentaje de bloqueo de rayos UV y porcentaje de termicidad, que fueron tomados como tratamientos.

Criterios para la selección de las cubiertas plásticas

Para la selección de las cubiertas plásticas se realizó un análisis de espectrometría de luz de diferentes colores, usando como base el plástico estándar con 2% de bloqueo UV, 55% de termicidad y transmisión de luz UV 340 nm en calibre 6. Para cada color se utilizó una capa de papel celofán en azul, verde, amarillo, naranja y rojo. Se seleccionaron los colores que presentaron diferencias contrastantes en la longitud de onda para la transmisión de luz en el espectro visible. Las pruebas se realizaron en el laboratorio de calidad de la empresa Plásticos y Químicos Andinos, PQA.

En los procesos de secado, se utilizó como testigo el plástico tradicionalmente usado y recomendado por sus características técnicas y de durabilidad para los secadores solares de café, conocido como AgroplasN.

Una vez seleccionadas las cubiertas plásticas y con los secadores construidos, se realizaron diez bloques, considerando como factor de bloqueo las condiciones ambientales al momento en que se realizaron los procesos. Para cada bloque se obtuvo la información de brillo solar, temperatura y humedad relativa del aire en el transcurso de cada uno de ellos. También se realizó el seguimiento de la temperatura dentro del secador, ubicando sensores UT330-USB, localizados a 15 cm de la masa de café en el centro de los secadores (Figura 2b). El número de bloques se estimó a partir de una varianza de

9,3 asociada a la variable calificación promedio SCA, para seis tratamientos y una diferencia mínima aceptable de tres. Para una potencia mayor del 80%.

Procesamiento de café

Los frutos de café variedad Cenicafé 1 utilizados para el procesamiento tuvieron como criterio tener más del 80% de frutos maduros en la masa cosechada y menos de 2,5% de frutos verdes. Para la obtención del café lavado se siguieron las recomendaciones del proceso 7P® (siete prácticas clave para el beneficio de café de calidad), despulpando aproximadamente 200 kg de frutos de café previamente clasificados por densidad por medio del separador hidráulico de tolva y tornillo sinfin. El café despulpado se clasificó por tamaño en una zaranda circular de lámina troquelada, para llevar a fermentación natural en tanque de acero inoxidable, una vez finalizado el proceso, de acuerdo con el método Fermaestro®, se lavó en un módulo Ecomill® LH-300 (Peñuela y Sanz, 2021). El café lavado fue asignado aleatoriamente a los tratamientos de secado solar en cada uno de los secadores dispuestos para este fin.

El manejo de café en los secadores del experimento, siguió las recomendaciones para el manejo de café en secado solar (Oliveros et al., 2017; Oliveros et al., 2013; Oliveros et al., 2006; Roa, Oliveros y Ramírez, 2000), el secador se mantuvo abierto durante el primer día de secado, con el fin de eliminar el exceso de humedad generado por la evaporación en la primera etapa de secado. Después de esto, los secadores solamente se abrieron para revolver el café y para registrar la pérdida de masa según método Gravimet (Oliveros et al., 2009).

Cada ensayo se finalizó cuando todos los tratamientos alcanzaron una humedad de $11,0 \pm 0,5\%$ b.h., para lo cual se realizó el seguimiento de la misma mediante el método

Gravimet. Se registró el tiempo de secado, al momento de obtener la humedad deseada en cada tratamiento.

El café pergamino seco obtenido de cada tratamiento se llevó a análisis de calidad sensorial, por al menos tres catadores Q-Grader del panel de catación de Cenicafé, quienes evaluaron las muestras, según el protocolo SCA, en el que se asigna un puntaje a cada uno de los diez atributos del café, de cuya sumatoria se obtiene el puntaje total.

La información de las variables climáticas registradas durante el desarrollo de las pruebas, temperatura (°C), humedad relativa (%) y brillo solar (h), fue tomada de la estación agroclimática localizada en el sector de La Granja Cenicafé.

Al finalizar el proceso experimental se tomaron muestras de las cubiertas plásticas, originales y después del uso (18 meses), para determinar si las propiedades ópticas y mecánicas se conservaron, tales como la transmisión y difusión de luz total (400 – 700 nm), termicidad (%), resistencia a la rotura por impacto (gf), resistencia a la propagación del rasgado (gf), esfuerzo a la rotura (Mpa) y porcentaje de elongación (%). Se tomó una muestra de 5 cm x 5 cm, de cada una de las cubiertas localizadas en la parte de mayor exposición a la radiación solar; muestras del mismo tamaño de los plásticos originales sin utilizar, fueron tomadas para los valores de referencia. Para las propiedades mecánicas se utilizó la máquina universal de ensayos-Instron 5569 y para las ópticas se utilizó un espectrofotómetro de luz visible.

Variables determinadas

La variable de respuesta fue el puntaje total de acuerdo con el protocolo SCA y los puntajes individuales de los atributos del café obtenido.

La evaluación de calidad fue realizada por un panel de catación conformado por al menos tres catadores acreditados con certificado Q-Grader, que garantizan la calidad de la variable. Para el análisis se tuvo como criterio obtener taza limpia en el testigo, para comparar con los tratamientos.

Las variables complementarias fueron:

- Tiempo de secado (h)
- Temperatura del aire dentro del secador (°C)
- Temperatura del ambiente (°C)
- Brillo solar (h)

Análisis de la información

Se obtuvo el promedio y la variación para cada tratamiento tanto de la variable de respuesta como de las variables complementarias. Se aplicó un análisis de varianza al 5% con la variable de respuesta, bajo el diseño experimental propuesto. Adicionalmente, se construyeron las curvas de las variables complementarias vs. el tiempo de secado para cada tratamiento.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Selección de las cubiertas plásticas

La Figura 1 muestra los espectros de transmisión de luz de cada color evaluado. Se observa que la transmisión de luz comienza a partir de 340 nm, dado por el bloqueo UV adicionado al plástico, característico de la cubierta estándar, sin color (línea morada). Las diferencias por color se observan principalmente en el azul, que permite una mayor transmisión entre 380 nm y 560 nm, contrario a lo que sucede con los colores naranja y rojo que transmiten a partir de 560 nm. Respecto al infrarrojo (a partir

de 750 nm) todos aumentan la capacidad de transmisión, siendo mayor para el plástico de referencia o estándar y menor para el verde, seguido del azul. Lo anterior se traduce en aumento de temperatura bajo la cubierta.

La difusión se refiere a la transmisión de la luz a través de un medio traslúcido y no transparente, en la que la energía de la radiación incidente pasa a ser radiada en otras direcciones, disminuyendo la intensidad de la radiación (Tipler, 1999). El cambio de color en el plástico afectó principalmente el porcentaje de transmisión total y difusa, así como la difusión de luz total, siendo el color verde el que menor transmisión genera (Tabla 1). Lo anterior implica alta probabilidad de generar condiciones de penumbra durante el secado, dificultando la disminución de humedad del grano, prolongando en exceso el tiempo de secado y ocasionando riesgos para la calidad y la inocuidad del café. Los colores de la cubierta que presentaron mayor transmisión de luz son el azul seguido del amarillo, de los cuales el primero presentó

mayor difusión total, que representa mayor dispersión de la luz una vez ésta atraviesa la película plástica, indicando los mismos niveles de luz al interior del secador.

La variación del color en el plástico no afectó el bloqueo de la luz ultravioleta (UV), que es una característica propia del plástico de referencia, dado por el aditivo incorporado para que cumpla con esta función. El bloqueo de radiación ultravioleta (UV) es una propiedad óptica a considerar, básicamente por estar relacionada con la mayor durabilidad del plástico, ya que los rayos UV son la principal causa de su degradación (PQA, 2001).

Las diferencias en las propiedades ópticas se basan en diferentes porcentajes de transmisión de luz total y difusa, cuyos valores absolutos, de acuerdo con la caracterización, se presentan en la Tabla 2. Con base en esta información, para la investigación se seleccionaron las cubiertas de color naranja, color azul y la cubierta del tratamiento cuatro (conocida como AgrocLEAR

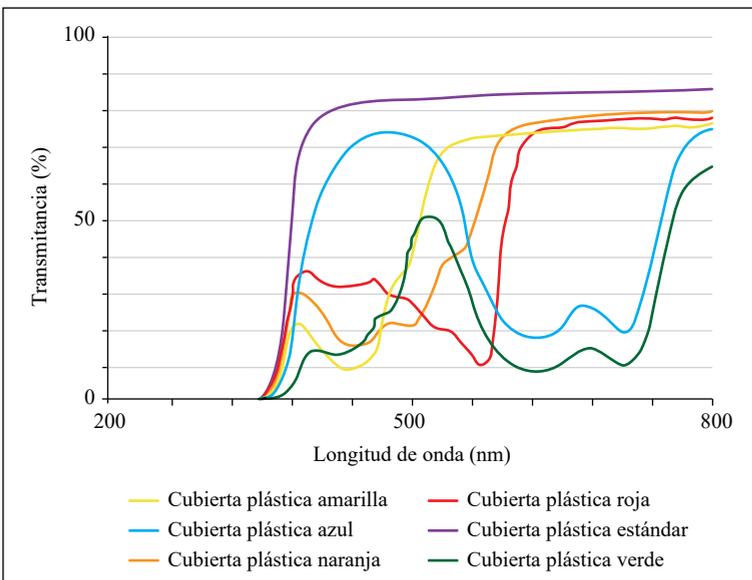


Figura 1. Espectros de transmisión de luz ultravioleta y visible en plásticos de diferentes colores.

X), cuyas propiedades garantizan un porcentaje de termicidad mayor y diferente al de los demás tratamientos, con color muy similar al de la utilizada para el tratamiento 1 (plástico de referencia). Todas las cubiertas utilizadas para el ensayo se encontraban en calibre 7.

Así mismo, se observa que cada cubierta tiene una propiedad óptica que la hace diferente de las otras y se encuentran resaltadas en negrilla. Los secadores construidos a escala y montados con las cubiertas plásticas se observan en la Figura 2.

Tabla 1. Transmisión y difusión de luz de las cubiertas plásticas de acuerdo con el cambio de color.

Plástico	Calibre	Bloqueo UV (nm)	Transmisión de luz total (%)	Transmisión de luz difusa (%)	Difusión de luz total (%)
Transparente (referencia)	6	340	83,74	48,50	57,91
Referencia + azul	6+1	340	59,70	39,40	65,90
Referencia + verde	6+1	340	21,07	15,13	24,34
Referencia + rojo	6+1	340	42,98	25,27	59,49
Referencia + amarillo	6+1	340	53,27	30,04	56,39
Referencia + naranja	6+1	340	47,80	26,11	54,62

Tabla 2. Tratamientos utilizados de acuerdo con las características de las cubiertas plásticas.

Tratamiento	Color	Termicidad (%)	Transmisión de luz			Difusión de luz total (%)
			UV (nm)	Total (%)	Difusa (%)	
T1	Transparente	50 ± 10	250	84,87	46,78	55,11
T2	Azul	55 ± 10	340	59,70	39,40	65,90
T3	Naranja	55 ± 10	340	47,80	26,11	54,62
T4	Transparente	80 ± 5	380	83,92	43,14	51,40
Testigo	Amarillo verdoso	55 ± 10	340	53,27	30,04	56,39

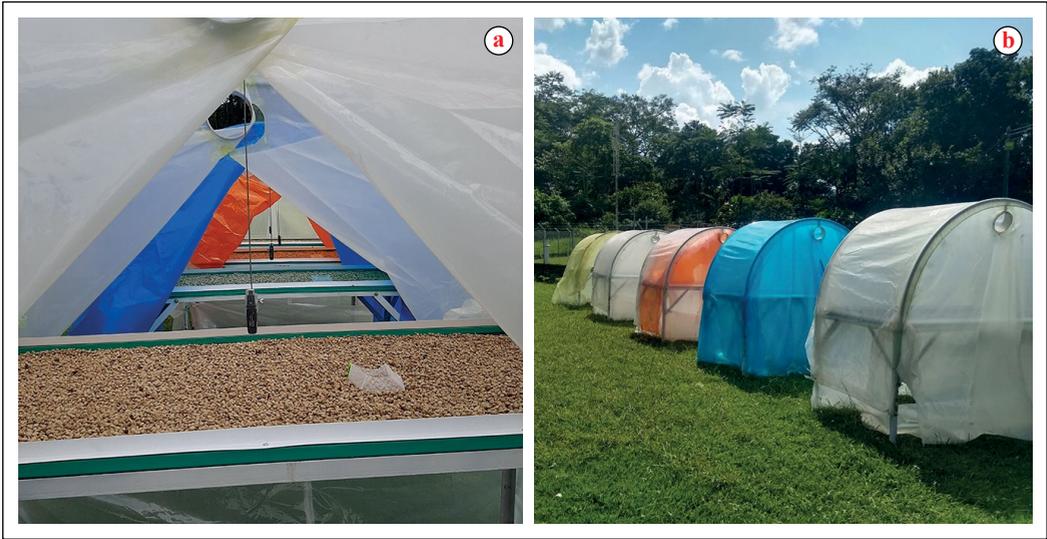


Figura 2. Secadores solares tipo túnel construidos a escala. **a)** Cubiertas plásticas utilizadas como tratamientos; **b)** Ubicación del sensor de temperatura y humedad relativa dentro de los secadores.

Humedad final del café y tiempo de secado

La humedad del café pergamino seco estuvo dentro de los rangos establecidos, con un promedio general de 11,0%. La dinámica del secado solar, depende de las condiciones climáticas que se presenten durante el proceso, por tal razón se presentan diferentes tiempos de secado en cada uno de los bloques experimentales realizados, en un rango entre 132,8 y 259,4 horas (Tabla 3). Según Ramírez et al. (2012), la zona cafetera colombiana posee un promedio de brillo solar de 4,5 h d⁻¹, durante las pruebas el valor de esta variable estuvo entre 1,7 y 5,7 h y un rango entre 20,7 y 40,2 h para alcanzar la humedad del café deseada, independiente del comportamiento de las demás variables climáticas.

El tiempo de secado promedio por tratamiento estuvo entre 125 y 270 h, con variaciones por el tipo de cubierta plástica, siendo el testigo el tratamiento que presentó

menores tiempos de secado. En general, esta variable estuvo entre 5 y 11 días (Tabla 4); resultados similares fueron encontrados por Oliveros et al. (2006) utilizando el secador de túnel, con área de secado de 10 m² con este tipo de cubierta. Las diferencias de tiempo de secado respecto al testigo pueden estar relacionadas con el porcentaje de transmisión de luz total de las cubiertas (Tabla 2), ya que a mayores valores de esta característica menores tiempos de secado y viceversa.

Temperatura del aire dentro del secador

La Figura 3a muestra el promedio de la temperatura del aire dentro de los secadores, para cada uno de los bloques experimentales, así como el promedio de la temperatura diaria del ambiente. En general, se presentó una temperatura promedio al interior del secador superior a la del ambiente en todos los tratamientos entre 2,7 y 6,1°C, en las que el tratamiento 4 y el testigo fueron los que

Tabla 3. Valores promedio para las variables tiempo de secado, temperatura, humedad relativa del aire y brillo solar, durante la realización de la investigación.

Bloque	Tiempo de secado (h)	Temperatura (°C)			Humedad relativa (%)			Brillo total diario (h)
		Mínima	Media	Máxima	Mínima	Media	Máxima	
4	132,8	18,3	23,3	31,6	43,7	75,9	96,8	4,2
6	154,8	17,6	22,0	30,2	47,2	83,9	100,0	5,7
3	166,0	17,9	22,3	30,4	47,5	82,0	98,4	3,6
2	170,0	18,0	21,9	29,6	52,4	84,5	99,8	2,8
10	175,6	16,7	20,7	28,7	52,8	86,2	100,0	3,2
5	181,8	17,7	21,9	30,0	49,9	83,5	99,7	3,3
8	182,2	17,8	21,7	29,8	52,6	85,5	100,0	3,7
9	202,2	17,0	20,5	28,5	55,2	88,5	100,0	2,8
1	240,2	18,0	21,4	27,8	61,3	89,5	99,5	1,7
7	259,4	18,1	22,3	30,6	48,6	81,6	98,6	2,8

presentaron la mayor diferencia. La cubierta plástica utilizada en el tratamiento 4 presenta el mayor porcentaje de transmisión de luz total y el más alto valor de termicidad (Tabla 2). Del mismo modo, durante el secado se observa la influencia del tipo de cubierta sobre la temperatura diaria al interior del secador, conservando el comportamiento descrito anteriormente. La temperatura promedio alcanzada al interior de los secadores es influenciada por la temperatura promedio del ambiente durante el día. Para explicar este comportamiento la Figura 3b presenta la información registrada por cada tratamiento en uno de los bloques experimentales, en el que se obtuvo entre ocho y 11 días de secado.

En la Figura 3c las líneas verdes demarcan los valores mínimo, medio y máximo de la temperatura ambiente en 17,8°C, 21,7°C y 29,8°C, respectivamente, durante la evolución del bloque experimental. Se observa el comportamiento de esta variable durante el día y la noche, en el transcurso del secado. Los valores más altos se presentaron entre las 10:00 de la mañana y las 3:00 de la tarde, alcanzando valores puntuales por encima de 50°C en todos los tratamientos, excepto para la cubierta azul (T2). Este tratamiento presentó valores promedio por hora de temperatura inferiores entre 0,5°C y 3,0°C respecto a los demás tratamientos (Figura 3d).

Tabla 4. Valores promedio y desviación estándar para la humedad final del café y el tiempo de secado solar utilizando diferentes cubiertas plásticas (tratamientos).

Tratamiento	Humedad cps (% b.h.)	Tiempo de secado (días)			
		Promedio	Mínimo	Máximo	Diferencia con testigo (h)
T1	10,85 ± 0,91	7,2	5,2	9,2	3,0
T2	11,14 ± 0,94	8,5	6,1	11,3	33,6
T3	11,03 ± 1,04	8,8	6,1	11,2	40,3
T4	11,20 ± 0,37	7,2	5,1	11,2	2,1
Testigo	11,01 ± 0,61	7,1	5,1	11,2	—

En general, se registraron temperaturas inferiores a la mínima del ambiente durante los bloques experimentales por cortos períodos de tiempo, siendo el tratamiento 4 el que presentó menores valores, probablemente debido al mayor porcentaje de termicidad del plástico (Tabla 2), propiedad que mantiene la temperatura bajo de la cubierta por más tiempo. Estas diferencias tienen relación con la entalpía de evaporación del agua sobre todo al inicio del secado, que hace que aumente la humedad relativa por mayor presión de vapor dentro del grano, lo que disminuye la temperatura registrada dentro del secador.

Estudios realizados por Vélez-Piedrahita et al. (2019), mencionan que la viabilidad de un secador solar es determinada por las diferencias entre los valores de temperatura y humedad relativa al interior del secador y las del ambiente. Datos experimentales obtenidos por estos autores indican diferencias de temperatura promedio entre 1,9°C y 3,6°C, realizando la medición a 10 cm de la capa de café, en un secador solar de túnel con la misma geometría y configuración que la utilizada en la investigación objeto del presente artículo, en el que los sensores se ubicaron a 15 cm de la masa de café. Se debe resaltar

que el volumen del aire entre la superficie del café y la cubierta, además del tamaño del área disponible para el flujo de aire tienen gran influencia sobre las condiciones que se generen al interior del secador. Los secadores solares de túnel se caracterizan por tener mayor eficiencia térmica debido al diseño, configuración y manejo, con una reducción en el tiempo de secado que genera ventajas para el caficultor (Oliveros et al., 2006).

Pérdida de humedad del grano

Las curvas de secado obtenidas muestran diferentes velocidades de evaporación de acuerdo a la condición del tratamiento y a las condiciones que se presentan entre el día y la noche. Se registró una mayor pérdida de humedad del café para el tratamiento 4 y el testigo, al pasar del 30,7% al 21,3% en un tiempo de 8,0 h, que coincide con el incremento de temperatura media del ambiente para el sexto día de proceso, para el cual las condiciones ambientales promedio fueron de 23,3°C y 75,8% de humedad relativa.

La Figura 4 muestra dos ejemplos de las curvas de humedad obtenidas, en tiempos de secado entre 170 h (a) y 250 h (b). En general,

se observan tres etapas del proceso; la primera (I) en la que el café de todos los tratamientos perdió humedad de manera similar, con las tasas de evaporación similares entre todos los tratamientos, hasta tener una humedad cercana al 45% b.h., definida como “café seco de agua”. La segunda etapa (II) en la que se presenta la mayor pérdida de humedad desde aproximadamente el 45% b.h. hasta el 15% a 25% b.h. y se observan diferencias en las tasas de evaporación de acuerdo con el tratamiento. Y la tercera etapa (III) se caracteriza por la pérdida de humedad durante el día,

pero ganancia en la noche, conocido como rehumedecimiento en los granos, con algunas diferencias entre los tratamientos.

La explicación a estos comportamientos se da por las diferencias en las presiones de vapor que se presentan a medida que avanza el proceso, durante el secado la presión de vapor del grano es mucho mayor a la del ambiente ($P_{v_{grano}} \cdot P_{v_{aire}}^{-1} > 1$), por lo que el flujo de agua se da del grano hacia el ambiente (Borem, 2014). La primera etapa se da por el alto contenido de humedad en

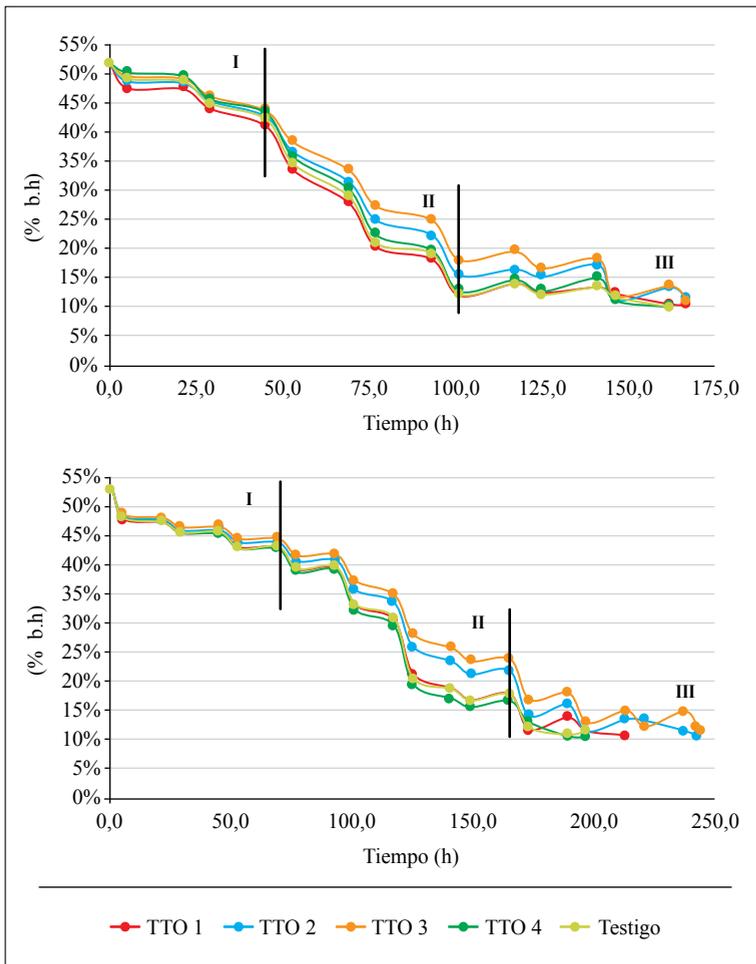


Figura 4. Humedad del café vs tiempo de secado solar con diferentes tipos de cubiertas plásticas.

el grano, con una alta presión de vapor que indica que hay remoción de humedad, aunque no se presenten condiciones ambientales para el secado o las condiciones generadas por las cubiertas plásticas sean diferentes; en esta etapa se considera de gran importancia el flujo de aire para evacuar el aire exhausto dentro del secador. En la segunda etapa, las condiciones de secado dadas por cubiertas plásticas generan diferencias en las tasas de extracción de humedad de cada tratamiento. El comportamiento de rehumedecimiento observado en la última etapa se debe a que el grano se encuentra sometido a una humedad relativa por encima del 70% durante las horas de la noche, en esta condición se invierte la relación en las presiones de vapor ($P_{V_{\text{grano}}} \cdot P_{V_{\text{aire}}}^{-1} < 1$), generando una mayor presión de vapor del aire sobre el grano haciendo que este absorba nuevamente agua del ambiente, en un rango entre 0,5% y 2,0% b.h., que dependen de la humedad del grano y de la del aire, la Figura 5 muestra un ejemplo de este comportamiento, obtenido durante la ejecución de uno de los bloques experimentales. La humedad de

equilibrio higroscópico para café pergamino se mantiene para la humedad relativa del ambiente inferior a 75%, a humedad mayor al 80% la humedad de equilibrio del café está en el rango entre 15% y 19% b.h. (Trejos et al., 1989).

Calidad sensorial

Todas las condiciones y variables presentadas durante las tandas de secado con el uso de los diferentes tipos de cubiertas plásticas, permitieron obtener el café pergamino seco. Sin embargo, a pesar de las diferencias en los procesos de secado no se obtuvo diferencias en la calidad sensorial. Las calificaciones para el café proveniente de los tratamientos estuvieron cercanos a 81 puntos SCA (Figura 6), calidad que refleja las características dadas por la variedad, oferta ambiental y prácticas agronómicas (Peñuela y Sanz, 2021). El análisis de varianza no mostró efecto de tratamientos ($p=0,657$) pero sí entre los bloques ($p=0,025$). Sobre la variable calidad sensorial, tiene mayor influencia la calidad inicial del café que es procesado que el secado solar.

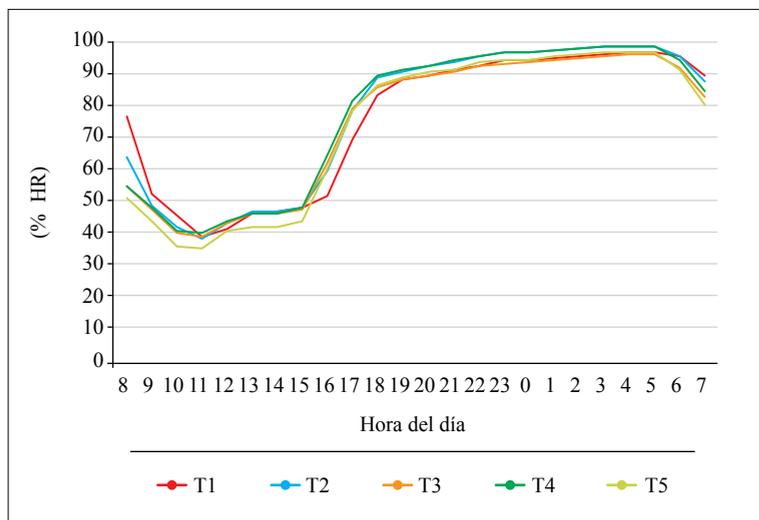


Figura 5. Comportamiento de la humedad relativa del aire, durante el transcurso del día, al interior de los secadores.

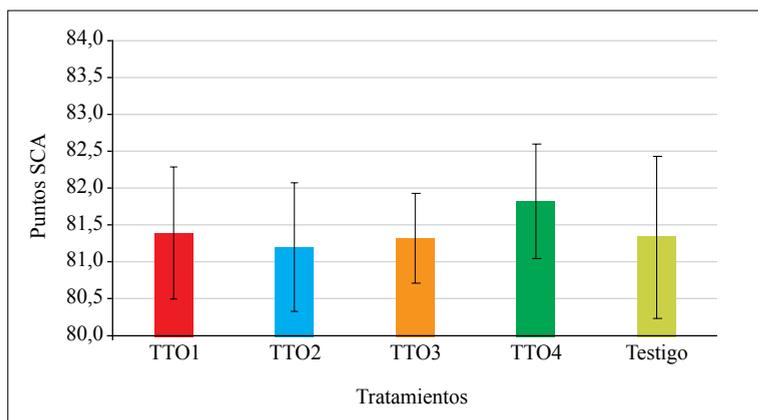


Figura 6. Calidad sensorial en puntos SCA del café obtenido con secado solar bajo diferentes tipos de cubiertas plásticas.

De igual manera, los principales atributos no reflejaron diferencias entre tratamientos (Tabla 5), de acuerdo con los valores medios obtenidos de los diez bloques experimentales realizados. Los valores promedio obtenidos describen una calidad sensorial normal, sin resaltarse algún atributo en especial, sin embargo, descriptivamente los valores para fragancia/aroma están ligeramente superiores a los demás atributos, lo que es atribuido a la especie y tipo de proceso.

Se observó una mayor probabilidad para presentar defectos en el tratamiento 4 (30%) y el tratamiento 1 (25%), con mayor porcentaje de defectos y con cubiertas con el 84% de transmisión de luz total (Tabla 2). Mientras que la menor probabilidad de defectos fue para los tratamientos 2 y 3 (10%), estos dos tratamientos corresponden a las cubiertas con menor transmisión de luz total y los que menor temperatura y mayor tiempo de secado presentaron.

Calidad de las cubiertas

Los valores que se presentan en la Tabla 6 corresponden a la reducción porcentual en las propiedades evaluadas. La transmisión de luz total se redujo entre 7% y 13%, lo que

se encuentra en valores normales debido a la acumulación de polvo dada la exposición del plástico en ese período de tiempo; que a su vez aumentó los valores de difusión, siendo mayor en el testigo (T5). Se considera que los cambios en la termicidad son mínimos, ya que variaron entre 2% y 5%.

Respecto a las propiedades mecánicas, se observa que la cubierta plástica azul (T2) es la que presenta la mayor reducción, haciéndola poco resistente en un corto período de tiempo y explicado por la mayor absorción de radiación y exposición a la humedad, conocidas como unas de las principales causas de la degradación de los plásticos (Posada Bustamante, 1994).

Los resultados obtenidos en esta investigación permitieron concluir que las características de los plásticos utilizados en el secado solar no modificaron los atributos en taza, ni se obtuvieron diferencias respecto al testigo. La calidad global del café no se afecta por efecto de las cubiertas plásticas utilizadas durante el secado solar; sin embargo, se encontró una mayor probabilidad de presentar defectos en las cubiertas que presentan mayor porcentaje de transmisión global, relacionado con la radiación directa sobre el grano.

Tabla 5. Promedios y desviación estándar para el puntaje de atributos según SCA para café procedente de diferentes tratamientos de secado solar.

Tratamiento	Fragancia/ Aroma	Sabor	Sabor residual	Acidez	Cuerpo
T1	7,56 ± 0,18	7,25 ± 0,13	7,19 ± 0,17	7,46 ± 0,14	7,33 ± 0,19
T2	7,49 ± 0,18	7,28 ± 0,12	7,19 ± 0,17	7,32 ± 0,14	7,39 ± 0,09
T3	7,51 ± 0,14	7,29 ± 0,13	7,20 ± 0,09	7,38 ± 0,15	7,43 ± 0,10
T4	7,48 ± 0,21	7,34 ± 0,22	7,27 ± 0,18	7,43 ± 0,16	7,42 ± 0,12
T5	7,55 ± 0,25	7,32 ± 0,26	7,23 ± 0,20	7,35 ± 0,17	7,48 ± 0,14

Tabla 6. Reducción de las propiedades ópticas y mecánicas de las cubiertas plásticas utilizadas en el secado solar del café.

Tratamiento	Propiedades ópticas			Propiedades mecánicas		
	Transmisión de luz total (%)	Difusión de luz Total (%)	Termicidad (%)	Resistencia a la rotura por impacto (%)	Resistencia a la propagación del rasgado (%)	Esfuerzo a la rotura (%)
T1	7	-5	2	-5	-3,6 DM 1,1 DT	13,8 DM 0,3 DT
T2	11	13	3	59	42,1 DM -2,5 DT	0,5 DM 11,7 DT
T3	6	6	5	18	0,21 DM -1,43 DT	9,98 DM 18,6 DT
T4	11	-6	2	26	16,6 DM -4,9 DT	14,4 DM 8,9 DT
T5	13	-22	-5	8	0,1 DM -1,0 DT	8,9 DM 9,7 DT

DM: Dirección máquina DT: Dirección transversal

Las mayores diferencias se aprecian en las variables relacionadas con el desarrollo del proceso de secado, como son el tiempo total, temperaturas dentro del secador y comportamiento de la pérdida de humedad del grano. La forma cómo transcurre el proceso si bien no resalta ni atenúa los atributos o la calidad general del café, si puede tener un efecto posterior, dado el deterioro del grano, por el mayor tiempo de exposición del café a mayores temperaturas.

Las cubiertas plásticas evaluadas con diferentes propiedades ópticas no influyen sobre la calidad final. El secado solar del café es una etapa necesaria para mantener la calidad del café, es necesario considerar que el cambio en el tipo de cubierta no aporta ventajas en la calidad que reflejen un ingreso mayor al caficultor; por el contrario, representarían un mayor costo dada la reducción en las propiedades mecánicas, que hacen que la cubierta de color azul presente menor resistencia al impacto y al rasgado, teniendo que ser reemplazada en

menor tiempo que la cubierta tradicionalmente usada para el secado de café y utilizada en esta investigación como testigo.

AGRADECIMIENTOS

Los resultados presentados en este documento corresponden a la investigación POS100001, que fue financiada por la Federación Nacional de Cafeteros de Colombia (FNC). Los autores agradecen a Jorge Alexander Londoño por el apoyo en el diseño y construcción de los secadores y al personal de apoyo en la Estación Experimental Naranjal, por su valiosa colaboración en el suministro oportuno de café con las características específicas y al panel de Catación de Cenicafé por el análisis sensorial de las muestras. Así mismo, a la empresa Plásticos y Químicos Andinos por suministro de la información técnica, de los plásticos necesarios para la evaluación y el apoyo en las pruebas ópticas y mecánicas de las cubiertas utilizadas.

LITERATURA CITADA

- Borém, F. M. (2014). *Handbook of Coffee Post-Harvest Technology*. Gin Press.
- Cabrera Morales, C. M., & López-Nevot, M. A. (2006). Efectos de la radiación ultravioleta (UV) en la inducción de mutaciones de p53 en tumores de piel. *Oncología (Barcelona)*, 29(7), 291–298. <https://doi.org/10.4321/S0378-48352006000700003>
- Espí, E. (2012). Materiales de cubierta para invernaderos. *Cuadernos de estudios agroalimentarios*, 3, 71–88. <https://www.publicacionescajamar.es/publicacionescajamar/public/pdf/publicaciones-periodicas/cuadernos-de-estudios-agroalimentarios-cea/3/3-550.pdf>
- Haro-Maza, J. F., & Guerrero-Beltrán, J. A. (2013). Efecto de la radiación UV-C en frutas y verduras. *Temas Selectos de Ingeniería de Alimentos*, 7(1), 68–77. <https://tsia.udlap.mx/efecto-de-la-radiacion-uv-c-en-frutas-y-verduras/>
- Oliveros-Tascón, C. E., Ramírez, C. A., Sanz-Uribe, J. R., & Peñuela-Martínez, A. E. (2006). Secador solar de túnel para café pergamino. *Avances Técnicos Cenicafé*, 353, 1–8. <http://hdl.handle.net/10778/402>
- Oliveros-Tascón, C. E., Peñuela-Martínez, A. E., & Jurado, J. M. (2009). Controle la humedad del café en el secado solar utilizando el método gravimet. *Avances Técnicos Cenicafé*, 387, 1–8. <http://hdl.handle.net/10778/385>
- Oliveros-Tascón, C. E., Ramírez, C. A., Sanz-Uribe, J. R., Peñuela-Martínez, A. E., & Pabón, J. (2013). Secado solar y secado mecánico del café. En Federación Nacional de Cafeteros de Colombia, *Manual del cafetero colombiano: Investigación y tecnología para la sostenibilidad de la caficultura* (Vol. 3, pp. 49–80). Cenicafé. https://doi.org/10.38141/cenbook-0026_29
- Oliveros-Tascón, C. E., Ramírez, C. A., Tibaduiza, C. A., & Sanz-Uribe, J. R. (2017). Construcción de

- secadores solares tipo túnel con nuevos materiales. *Avances Técnicos Cenicafé*, 489, 1–8. <https://doi.org/10.38141/10779/0489>
- Parra Coronado, A., Roa Mejía, G., Oliveros-Tascón, C. E., & Sanz Uribe, J. R. (2017). *Optimización operacional de secadores mecánicos para café pergamino*. Cenicafé. <https://www.cenicafe.org/es/publications/librosecado.pdf>
- Peñuela-Martínez, A. E., & Sanz-Urbe, J. R. (2021). Obtenga café de calidad en el proceso de beneficio. En Centro Nacional de Investigaciones de Café, *Guía más agronomía, más productividad, más calidad* (3a ed., pp. 189–218). Cenicafé. https://doi.org/10.38141/10791/0014_11
- Posada Bustamante, B. (1994). La degradación de los plásticos. *Revista Universidad EAFIT*, 30(94), 67–86. <https://publicaciones.eafit.edu.co/index.php/revista-universidad-eafit/article/view/1408>
- Productos Químicos Andinos – PQA. (2001). Portafolio de presentación. <https://www.pqapag.co/en/productos-y-servicios/>
- Ramírez, V. H., Jaramillo, A., Peña, A., & Valencia, J. (2012). El brillo solar en la zona cafetera colombiana, durante los eventos El Niño y La Niña. *Avances Técnicos Cenicafé*, 421, 1–12. <http://hdl.handle.net/10778/329>
- Roa Mejía, G., Oliveros-Tascón, C. E., & Ramírez, C. A. (2000). Utilice la energía solar para secar correctamente el café. *Avances Técnicos Cenicafé*, 281, 1–4. <https://doi.org/10.38141/10779/0281>
- Tipler, P. A. (1999). Properties of light. En *Physics for scientists and engineers* (4a ed., Vol. 2, pp. 1027–1049). Worth Publishers.
- Trejos, R., Roa Mejía, G., & Oliveros-Tascón, C. E. (1989). Humedad de equilibrio y calor latente de vaporización del café pergamino y del café verde. *Revista Cenicafé*, 40(1), 5–15. <http://hdl.handle.net/10778/841>
- Vélez-Piedrahita, S., Ciro-Velásquez, H. J., Osorio-Saraz, J. A., & Largo-Avila, E. (2019). Estudio del efecto de la geometría de un secador solar típico para café con CFD. *Revista Ingenierías Universidad de Medellín*, 18(35), 149–161. <https://doi.org/10.22395/riium.v18n35a9>