

Avances Técnicos

MAYO 2025

Cenicafé
Centro Nacional de Investigaciones de Café

575

Duque-Dussán, E. | Ramírez, C. A. | Sanz-Uribe, J. R.
Londoño-Castañeda, J. A. | López Grisales S. O.
Guerrero, A. | Peñuela-Martínez, A. E. | Rojas-Botina, W. F.

Secadores solares modulares de café: una alternativa sostenible, automatizada y de mayor durabilidad



Federación Nacional de
Cafeteros de Colombia

El método más utilizado en Colombia para reducir la humedad del café a niveles seguros para su almacenamiento y comercialización es el secado solar, siendo los de tipo túnel ampliamente adoptados en todas las regiones cafeteras (Oliveros-Tascón et al., 2006). Estos equipos están diseñados para optimizar la circulación del aire, proteger los granos de la lluvia, elevar la temperatura del aire y facilitar el manejo del café desde el exterior, permitiendo operaciones eficientes como la carga, descarga, distribución y agitación del grano en el secador. Sin embargo, su construcción tradicional con madera o guadua limita su vida útil, ya que la exposición al sol y la lluvia reduce la eficiencia del proceso y aumenta los costos de renovación (Duque-Dussán et al., 2023).

Así mismo, uno de los principales problemas reportados por los caficultores en estos secadores es la baja durabilidad de las cubiertas plásticas, generalmente de polietileno o tela plastificada, que deben reemplazarse cada dos o tres años en promedio. Esto incrementa los costos y disminuye la eficiencia de los mismos al reducir la entrada de radiación solar y permitir filtraciones de agua que humedecen el café, especialmente en épocas de lluvia. Además, el secado solar demanda una alta cantidad de mano de obra para tareas como abrir cortinas, revolver el café y monitorear la humedad.

Más del 90% de los caficultores emplea algún tipo de secador solar, siendo los de tipo túnel ampliamente adoptados en todas las regiones cafeteras

Este Avance Técnico propone la incorporación en el secado solar de materiales duraderos como el policarbonato, que ofrece alta resistencia y excelente transmisión de radiación solar, además de diseños modulares ajustables para fincas pequeñas y medianas. También destaca la implementación de tecnologías que registran datos en tiempo real, optimizando la toma de decisiones, reduciendo la dependencia de mano de obra. Esto garantiza mayor eficiencia y sostenibilidad en el proceso de secado.

Desarrollo

Diseño de los secadores modulares. Los nuevos secadores solares modulares cuentan con cubiertas de policarbonato alveolar de 6,0 mm y macizo de 3,0 mm, seleccionadas por su alta durabilidad, resistencia a condiciones climáticas adversas y mayores propiedades de transmisión de radiación solar, mejorando la captación de energía y la retención de calor para un secado más eficiente (Benlioğlu et al., 2023).

La construcción modular permite ajustar la capacidad según las necesidades del productor. La base del secador, fabricada con perfiles metálicos de acero CR cuadrada de 1 ½" calibre 18, mejora la resistencia y durabilidad en comparación con materiales como madera, guadua o PVC. Cada módulo mide 2,0 m × 2,0 m, alcanzando un área total de 20 m² al ensamblar cinco módulos (Figura 1). Esta configuración flexible permite escalar los módulos de acuerdo con la capacidad de cada finca, ofreciendo una solución eficiente y adaptable para el secado de café.

El diseño autoportante de la cubierta actúa como una viga curva delgada, capaz de resistir esfuerzos externos por condiciones climáticas como lluvia y viento, impactos del rastrillo al revolver el café o la caída de objetos. La estructura, fabricada con materiales robustos y resistentes a la corrosión, asegura una vida útil superior a ocho años con



Figura 1. Montaje de los secadores en San Agustín, Huila.

mínimo mantenimiento (Demissie et al., 2024). Su diseño modular facilita el transporte y el ensamble, adaptándose a cualquier finca (Peñuela-Martínez et al., 2023), mientras que el piso rígido y nivelado distribuye uniformemente el café, mejorando la calidad del secado.

Para evitar que el grano se rehumedezca en condiciones de alta humedad relativa y baja temperatura (Hung et al., 2019), cada secador incluye una cubierta plástica debajo de la cama de secado, que se despliega para proteger el café del aire húmedo exterior.

El sistema automático de remoción de humedad (Figura 3) utiliza sensores para monitorear la temperatura y humedad relativa del aire dentro y fuera del secador (Peñuela-Martínez et al., 2023).

Este sistema, con un circuito higrostático, regula el ambiente a través de un extractor alimentado por energía solar (Atalay et al., 2022). Cuando la humedad relativa interna supera el 95%, el extractor se activa para renovar el aire, creando condiciones favorables sin necesidad de energía externa; de igual forma, el extractor no se enciende si la humedad relativa externa es mayor al 95%. El extractor se conecta a un controlador de carga y a una batería, optimizando el secado y utilizando los recursos de manera sostenible. Esto ofrece una solución autónoma y eficiente para diferentes condiciones climáticas, garantizando un proceso continuo y efectivo (Kong et al., 2022).

Condiciones de evaluación. El estudio se realizó en Gigante y San Agustín, Huila, evaluando tres tipos de secadores: uno con policarbonato macizo de 3,0

mm, otro con policarbonato alveolar de 6,0 mm y un secador tipo túnel estándar con cubierta de tela Prosolar (140 g m⁻²) como testigo. Cada secador tenía un área de 20 m². Se realizaron cinco pruebas de secado en cada secador por zona, usando 280 kg de café lavado, con una capa de 2,0 cm de espesor. Se midieron tiempos de secado, temperaturas internas, humedad relativa y temperatura del grano.

El café se secó desde un 53% de humedad base húmeda (b.h.) hasta alcanzar entre un 10% y 12% b.h., bajo las condiciones climáticas locales.

Comparación entre los materiales de la cubierta del secador. Se realizó una prueba de intemperie según la norma ASTM G7 durante diez meses (diciembre de 2023 a septiembre de 2024) para evaluar

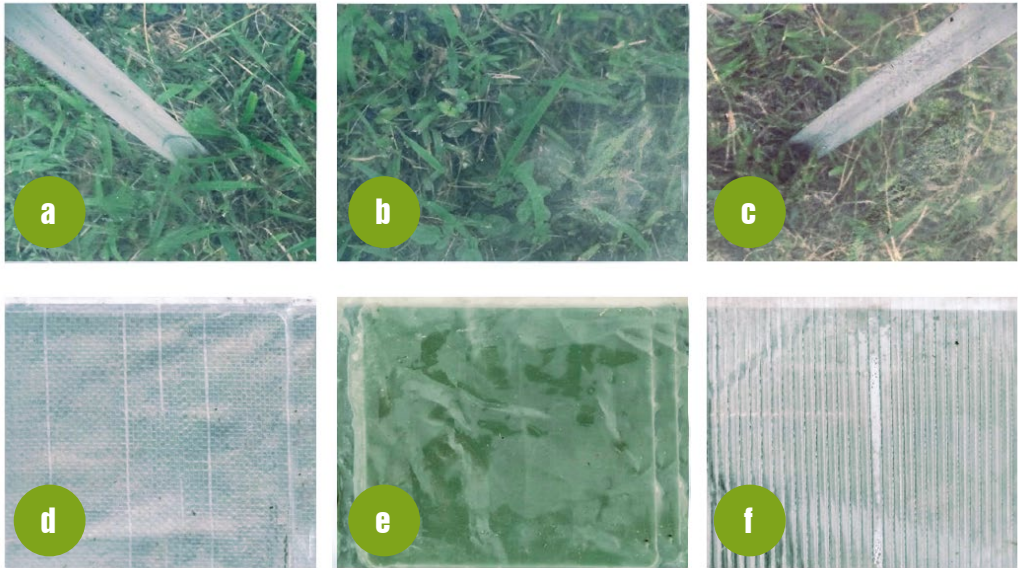


Figura 2. Montaje de prueba de deterioro a la intemperie de diferentes materiales. **a.** Acrílico. **b.** Policarbonato macizo 3,0 mm. **c** Policarbonato macizo 2,0 mm. **d.** Tela prosolar 140 g m⁻². **e.** Plástico cal. 6. **f.** Policarbonato alveolar 6,0 mm.

Tabla 1. Datos de transmisión de radiación solar de diferentes materiales para la cubierta.

Material	Transmisión radiación solar inicial (%)	Transmisión radiación solar final (%)
Plástico tipo invernadero calibre 6	95,0	73
Tela Prosolar de 140 g m ⁻²	95,0	80
Acrílico de 4,0 mm	92,0	90
Policarbonato alveolar de 6,0 mm	81,5	80
Policarbonato macizo de 2,0 mm	97,0	92
Policarbonato macizo de 3,0 mm	96,0	90

diferentes opciones de materiales de cubierta para el secador en términos de cambios en apariencia, opacidad y transmisión de radiación solar (Figura 2). Se documentó el estado de los materiales con fotografías y mediciones de transmisión solar con un medidor fotovoltáico PCE-SPM1.

Los resultados revelaron una pérdida de transmisión solar en todos los plásticos evaluados, siendo más pronunciada en el plástico calibre 6 y la tela Prosolar (Tabla 1). Otros materiales no presentaron cambios significativos como decoloración o ampollas.

El policarbonato alveolar es liviano y aislante (Figura 2f), mientras que el policarbonato macizo ofrece mayor resistencia mecánica (Figura 2b), que las demás cubiertas flexibles (Heydari, 2022). Ambos materiales destacan por su durabilidad y resistencia a la intemperie, superando los problemas de deterioro en secadores tradicionales de madera o guadua.

Aplicación

Tiempos de secado, humedad relativa y temperatura.
Los secadores con cubiertas de policarbonato

redujeron significativamente los tiempos de secado frente al secador convencional. En Gigante, la lámina maciza fue la más eficiente, con una reducción del 47%, seguida de la cubierta alveolar con un 43%. De igual manera, en San Agustín, aunque los tiempos fueron mayores por condiciones climáticas, ambos secadores de policarbonato redujeron el tiempo en más del 40% (Tabla 2). Estos resultados destacan la capacidad del policarbonato para acelerar el secado bajo distintas condiciones. Además, estos secadores registraron menores niveles de humedad relativa, evidenciando sus propiedades térmicas superiores y su capacidad para mantener condiciones estables y favorables para el secado.

Los secadores de policarbonato, especialmente el de lámina maciza, mostraron mayor eficiencia al reducir los tiempos de secado, mantener temperaturas internas más altas y disminuir la humedad del grano.

A pesar de las diferencias climáticas entre Gigante y San Agustín, los porcentajes de reducción de tiempo fueron similares, lo que resalta la consistencia y eficacia de estos secadores para optimizar el proceso de secado en diversas condiciones.

Tabla 2. Valores promedio de las variables de secado solar con diferentes tipos de cubierta. HR: Humedad relativa; T: Temperatura.

Ubicación	Tipo de cubierta del secador	Tiempo de secado (h)	HR _{interna} %	T _{interna} (°C)		HR _{ambiente} %	T _{ambiente} (°C)
				mín	máx		
Gigante	Macizo	112	71,5	19	45	79,4	23,2
	Alveolar	121	69,9	19	44		
	Testigo	213	76,8	17	40		
San Agustín	Macizo	190	72,4	18	42	84,9	21,6
	Alveolar	191	70,8	18,5	40		
	Testigo	325	78,9	17,8	38		

Demanda energética del sistema de remoción de humedad. El sistema de remoción de humedad de los secadores modulares es altamente eficiente, con un consumo promedio de 0,072 kWh por ciclo de secado, abastecido completamente por energía solar. La automatización del ventilador, combinada con el uso de energía solar, permite un control preciso del secado sin costos adicionales, lo que reduce la dependencia de fuentes externas y mejora la rentabilidad y sostenibilidad a largo plazo (Silva et al., 2021).

Cubierta plástica inferior. Se instalaron cubiertas plásticas debajo de los secadores de policarbonato, que se extienden manualmente durante la noche o en días fríos, protegiendo los granos del rehumedecimiento y favoreciendo un secado uniforme. Esto mantiene la humedad constante dentro de los secadores, mejorando la eficiencia, consistencia del proceso y la calidad del café.

Recomendaciones generales

- Las cubiertas de policarbonato tienen una vida útil estimada de ocho a diez años, superior a las cubiertas plásticas convencionales (dos a tres años), basada en su rendimiento en otras aplicaciones como techos e invernaderos.
- Se recomienda implementar secadores modulares de policarbonato, por su eficiencia en reducir tiempos de secado y controlar humedad y temperatura.
- Incorporar sistemas automatizados de monitoreo y control ayuda a reducir la humedad dentro del secador y mejora la eficiencia del proceso, especialmente al final del secado.

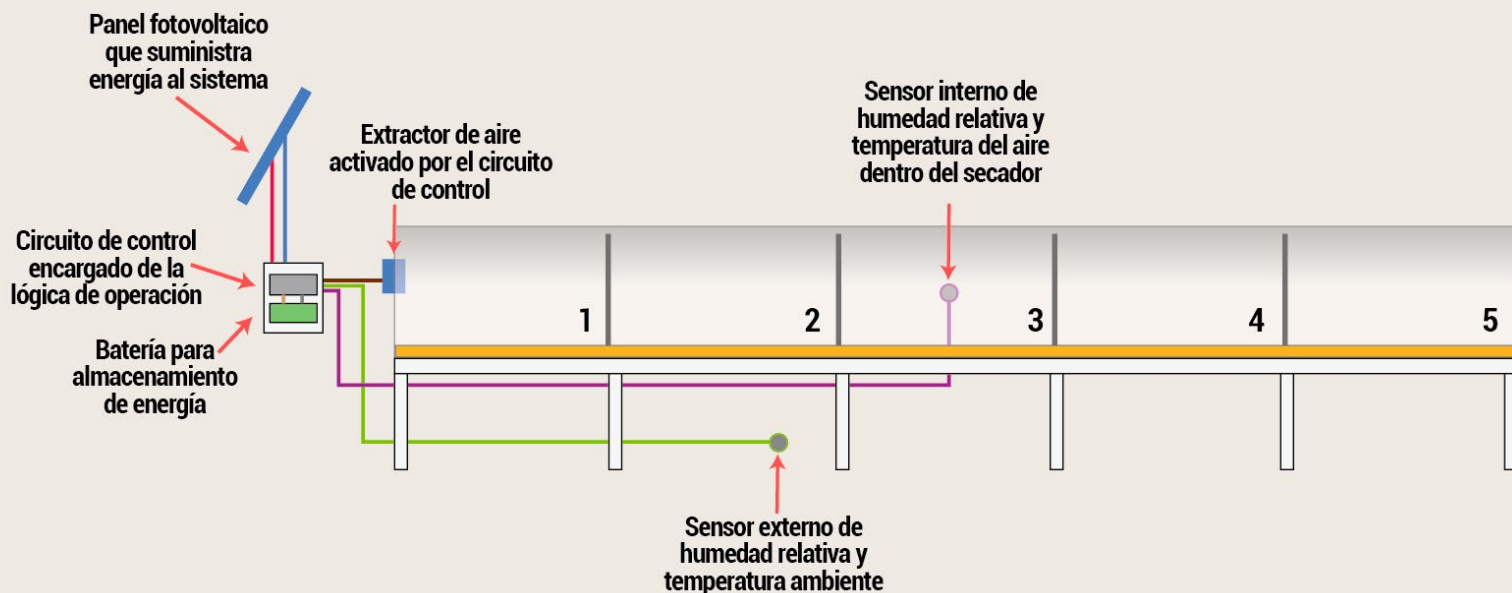
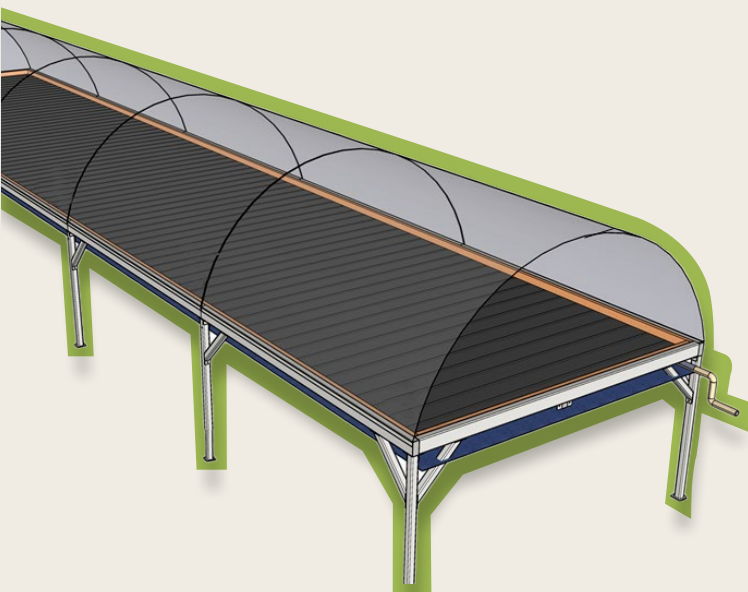


Figura 3. Diagrama esquemático del sistema automatizado de extracción de humedad en el secador solar.



Familias caficultoras



La adopción de secadores solares **modulares**, fabricados con policarbonato y equipados con extracción automática de aire húmedo, marca un avance en el secado de café en Colombia. Estos equipos **reducen el tiempo de secado**, **estabilizan la temperatura y la humedad interna** y **operan con muy poca energía externa**, ofreciendo a los caficultores una alternativa eficiente, autónoma y ambientalmente sostenible.

Literatura citada

- Atalay, H., Yavaş, N., & Turhan Çoban, M. (2022). Sustainability and performance analysis of a solar and wind energy assisted hybrid dryer. *Renewable Energy*, 187, 1173–1183. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2022.02.020>
- Benlioğlu, M. M., Karaağaç, M. O., Ergün, A., Ceylan, İ., & Ali, İ. H. G. (2023). A detailed analysis of a novel auto-controlled solar drying system combined with thermal energy storage concentrated solar air heater (CSAC) and concentrated photovoltaic/thermal (CPV/T). *Renewable Energy*, 211, 420–433. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2023.04.108>
- Demissie, Y. A., Abreham, R. E., Wassie, H. M., & Getie, M. Z. (2024). Advancements in solar greenhouse dryers for crop drying. *Energy Reports*, 11, 5046–5058. <https://doi.org/10.1016/j.egyr.2024.04.058>
- Duque-Dussán, E., Sanz-Urbe, J. R., & Banout, J. (2023). Design and evaluation of a hybrid solar dryer for postharvesting processing of parchment coffee. *Renewable Energy*, 215, 118961. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2023.118961>
- Heydari, A. (2022). Experimental analysis of hybrid dryer combined with spiral solar air heater and auxiliary heating system: Energy, exergy and economic analysis. *Renewable Energy*, 198, 1162–1175. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2022.08.110>
- Hung, N. Van, Martinez, R., Tuan, T. Van, & Gummert, M. (2019). Development and verification of a simulation model for paddy drying with different flatbed dryers. *Plant Production Science*, 22(1), 119–130. <https://doi.org/10.1080/1343943X.2018.1518723>
- Kong, D., Wang, Y., Li, M., & Liang, J. (2022). Experimental investigation of a novel hybrid drying system powered by a solar photovoltaic/thermal air collector and wind turbine. *Renewable Energy*, 194, 705–718. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2022.05.102>
- Oliveros-Tascón, C. E., Ramírez, C. A., Sanz-Urbe, J. R., & Peñuela-Martínez, A. E. (2006). Secador solar de túnel para café pergamino. *Avances Técnicos Cenicafe*, 353, 1–8. <https://doi.org/10.38141/10779/0353>
- Peñuela-Martínez, A. E., Hower-García, I. P., Guerrero, A., Agudelo-Laverde, L. M., Betancourt-Rodríguez, H., & Martínez-Giraldo, J. (2023). Physical, Sensorial, and Physicochemical Characteristics of Arabica Coffee Dried under Two Solar Brightness Conditions. *Processes*, 11(10), 3016. <https://doi.org/10.3390/pr11103016>
- Silva, G. M. da, Ferreira, A. G., Coutinho, R. M., & Maia, C. B. (2021). Energy and exergy analysis of the drying of corn grains. *Renewable Energy*, 163, 1942–1950. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2020.10.116>

Autores

Eduardo Duque Dussán 
Investigador Científico I
<https://orcid.org/0000-0002-8045-6088>

César Ramírez Gómez 
Investigador Científico I hasta febrero del 2024
<https://orcid.org/0000-0002-4773-4090>

Juan Rodrigo Sanz Uribe 
Investigador Científico III
<https://orcid.org/0000-0001-9875-9426>

Jorge Alexander Londoño C. 
Auxiliar de Mecánica
<https://orcid.org/0009-0006-2369-3542>

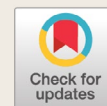
Samuel Osbaldo López Grisales 
Auxiliar de mecánica
<https://orcid.org/0009-0000-1671-2860>

Álvaro Guerrero Aguirre 
Investigador Científico I
<https://orcid.org/0000-0002-4986-4366>

Aída E. Peñuela Martínez 
Investigador Científico II
<https://orcid.org/0000-0003-4454-9778>

Willy Fernando Rojas Botina 
Asistente de Investigación
<https://orcid.org/0009-0009-7135-6307>

Disciplina de Poscosecha. Centro Nacional de Investigaciones de Café. Cenicafe
DOI (Digital Object Identifier)
<https://doi.org/10.38141/10779/0575>



Edición

Sandra Milena Marín López

Fotografías

Archivo Cenicafe

Diagramación

Carmenza Bacca Ramírez

Imprenta

Gerencia Técnica
Fondo Nacional del Café

Cenicafe
Centro Nacional de Investigaciones de Café



ISSN-0120-0178
ISSN-2145-3691 (En línea)

Los trabajos suscritos por el personal técnico del Centro Nacional de Investigaciones de Café son parte de las investigaciones realizadas por la Federación Nacional de Cafeteros de Colombia. Sin embargo, tanto en este caso como en el de personas no pertenecientes a este Centro, las ideas emitidas por los autores son de su exclusiva responsabilidad y no expresan necesariamente las opiniones de la Entidad.

Manizales, Caldas, Colombia - Tel. (606) 8500707
www.cenicafe.org



Licencia Creative Commons CC de Atribución - sin derivar - no comercial por la que este material puede ser distribuido, copiado y exhibido por terceros solo si se muestra en los créditos. No se puede realizar obras derivadas y no se puede obtener ningún beneficio comercial.

El proyecto fue financiado con recursos del Sistema General de Regalías del departamento del Huila y ejecutado por la Federación Nacional de Cafeteros de Colombia a través del proyecto "Proyecto Investigación + Desarrollo para potenciar la producción de cafés de calidad, ajustado a las zonas agroecológicas del departamento del Huila" con el código BPIN20221000100330.