

# Secado solar y secado mecánico del café

Carlos Eugenio Oliveros Tascón; Cesar Augusto Ramírez Gómez;  
Juan Rodrigo Sanz Uribe; Aída Esther Peñuela Martínez;  
Jenny Pabón Usaquén

El alto contenido de humedad del café después del lavado, 52,7% a 53,5% (Puerta, 2005), su composición química y las condiciones del clima en las regiones cafeteras colombianas son favorables para el desarrollo de microorganismos, principalmente mohos y levaduras, que pueden afectar su calidad e inocuidad. Los microorganismos pueden provenir del campo, de los árboles (Coliformes totales), por el contacto con las manos de los recolectores (Coliformes y estreptococos fecales) y de las aguas de lavado (Archila, 1985). También existe la posibilidad de contaminación en las instalaciones del beneficiadero (Archila, 1985).

El secado de productos agrícolas es una práctica universalmente utilizada, desde el inicio de la agricultura, para conservar su valor nutricional, calidad física, organoléptica e inocuidad por períodos indefinidos de tiempo. Al secar un producto agrícola hasta los niveles exigidos en la comercialización (10% a 12%, en la mayoría de ellos), se reduce la actividad del agua a niveles que impiden el desarrollo de microorganismos y disminuye notoriamente su actividad metabólica.

En este capítulo se presentan tecnologías que se utilizan actualmente en Colombia para el secado del café, desarrolladas en Cenicafé.



## Cómo Citar:

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](https://doi.org/10.38141/cenbook-0026_29)

## Conceptos Generales

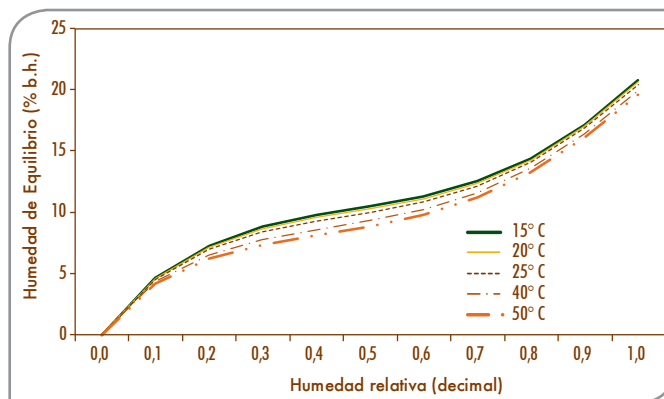


**La actividad del agua es la humedad relativa de equilibrio del entorno que rodea a un producto, expresada en decimal. Indica la disponibilidad potencial de agua para participar en reacciones químicas, bioquímicas y en el desarrollo de hongos (Borem et al., 2008). La actividad del agua está relacionada con el tipo de producto, su composición química y con la temperatura de los granos (Borem et al., 2008).**

Con el conocimiento de la actividad del agua se pueden definir las condiciones de temperatura y humedad relativa más favorables para la conservación de los granos en almacenamiento y durante el procesamiento. La actividad del agua mínima para el crecimiento de microorganismos como *Aspergillus ochraceus* varía de 0,77 a 0,83 y para la producción de la toxina **ocratoxina A (OTA)** de 0,83 a 0,87 (Urbano et al., 2000). Pardo et al. (2005) no observaron producción de **OTA** con actividad del agua de 0,80. De acuerdo con Suárez et al. (2004) con la **actividad del agua inferior a 0,80 el café está protegido de A. ochraceus**. En estudio realizado con café lavado (Puerta, 2005), se observó mayor presencia de *fusarium* spp. y *Penicillium* spp., seguido de *Cladosporium* spp., durante el proceso de secado solar.

Aunque en el proceso del secado los granos de café se llevan hasta un contenido del 10% al 12% (base húmeda), su contenido de humedad puede variar posteriormente dependiendo de las condiciones ambientales del sitio donde sean almacenados, principalmente la temperatura y la humedad relativa, y del tiempo de almacenamiento, hasta alcanzar una condición de equilibrio que en el caso del café y de las regiones cafeteras colombianas es superior al 12%. En estas condiciones de contenido de humedad, la actividad del agua es superior a 0,8, permitiendo el desarrollo de la mayoría de hongos que pueden afectar su calidad sensorial e inocuidad.

En la Figura 1 se presentan curvas de humedad de equilibrio para café pergamino variedad Caturra que permiten conocer las variaciones del contenido de humedad dependiendo de



**Figura 1.**

Curvas de humedad de equilibrio para diferentes temperaturas y actividad del agua, para café pergamino variedad Caturra. Fuente Trejos et al. (1989).

las condiciones de humedad relativa y de temperatura a que sean sometidos durante un largo período de tiempo.

## Secado solar del café

### Brillo solar y radiación solar en Colombia

El sol es la fuente central de energía en el sistema solar. La energía solar que llega a la Tierra es una pequeña fracción de la energía generada por el sol, permitiendo la vida y todas las manifestaciones como corrientes de aire, actividad fotosintética, ciclos hídricos y corrientes oceánicas, entre otras. La energía que llega hasta el suelo es la resultante de la radiación solar directa y la difusa. En días soleados predomina la radiación directa, mientras que la difusa lo hace en los días nublados. En el secado solar del café en Colombia, en días de mayor flujo de la cosecha, se aprovecha principalmente la radiación difusa y la energía del aire.



**La información de las condiciones climáticas del lugar, principalmente temperatura, humedad relativa y brillo solar, la producción anual de café, el flujo en los días de mayor producción o días "pico" y la disponibilidad de mano de obra, entre otros factores, se debe tener en cuenta en la selección y el dimensionamiento de tecnologías solares para el secado del café.**

En la mayor parte de las zonas cafeteras colombianas el brillo solar varía entre 1.600 y 1.800 h/año, con promedio de 1.550 h/año, que indican alta nubosidad y alta radiación difusa (Jaramillo, 2005). En cada cuenca hidrográfica el brillo solar varía con la altitud, por efecto de la nubosidad diurna. Información de brillo solar mensual en diferentes áreas cafeteras es presentada por Jaramillo (2005). El promedio de la disponibilidad multianual de energía solar varía entre 2.190 en La Guajira y 1.278 kWh/m<sup>2</sup>/año, en la Costa Pacífica (IDEAM, 2013). Para la región Andina el promedio anual de radiación solar es 1.643 kWh/m<sup>2</sup>/año (IDEAM, 2013).

## Tecnologías para el secado solar del café

**En el secado solar se aprovechan la energía natural del aire ambiente y la radiación solar, que inciden directamente sobre la superficie de los granos.** Cuando una masa de café tiene una altura de capa de secado de



**Figura 2.**

Superficie de una capa de café en secado solar (arriba). Áreas que reciben radiación solar directa, más claras (abajo).

2,5 cm, la superficie de café representa solamente el 2,71% del total de granos que aprovechan la radiación directa. En la Figura 2 se observa el área de granos de café que está expuesta a la radiación directa. Teniendo en cuenta lo anterior, el café debe revolverse al menos cuatro veces al día (Roa *et al.*, 1999), para permitir que otros granos aprovechen también la radiación solar directa, obtener un producto con humedad final más uniforme y aprovechar más eficientemente la energía empleada en el proceso de secado.

**En Cenicafé se han desarrollado tecnologías para el secado solar del café, en las cuales se aprovechan eficientemente la radiación solar y la energía del aire, y se obtiene un producto de alta calidad física y sensorial. Son estructuras de bajo costo, fáciles de utilizar, que pueden ser construidas con mano de obra local e inclusive por el propio caficultor. Los diseños se han ajustado teniendo en cuenta observaciones y recomendaciones de los usuarios.**

Los secadores solares se han diseñado para atender las necesidades de secado en fincas con producción máxima de 1.875 kg de café pergamino seco por año (150 @.año<sup>-1</sup> de c.p.s.). Los menores tiempos de secado (3 a 7 días), se han obtenido con un promedio de brillo solar superior a 5 h.día<sup>-1</sup>, con altura de capa máxima de café lavado de 2 cm (13 kg de café lavado/m<sup>2</sup>), revolviendo el café por lo menos 4 veces al día, utilizando rastrillos diseñados en Cenicafé (Oliveros *et al.*, 2006), como el presentado en la Figura 3.

A continuación se presentan tecnologías que se utilizan actualmente en Colombia para el secado del café, desarrolladas en Cenicafé.



**Figura 3.**

Rastrillo para revolver café diseñado en Cenicafé (Oliveros *et al.*, 2006).

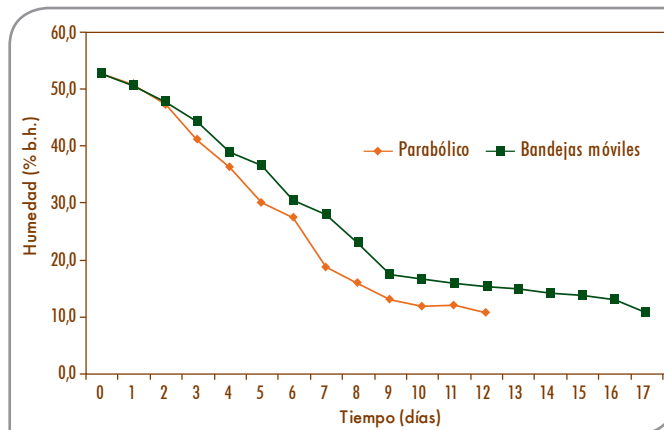
## Secador parabólico

Es una estructura con cubierta en forma de parábola, con piso en concreto o en malla soportado por una estructura construida en guadua (Figura 4). El plástico utilizado en la cubierta es Agroplás N calibre 6. En ensayos realizados se observó menor tiempo en el secador parabólico que en plataformas móviles o “carros”, hasta del 23,5% (Figura 5). El piso del secador puede ser construido en concreto de 5 cm de espesor, con relación de 1:2:3 de cemento, arena y gravilla fina, respectivamente, colocado sobre una estructura construida en guadua, a 80 cm del suelo; para el piso también puede utilizarse una malla plástica, negra, de referencia RED 5000 (Figura 6), con aberturas de 4,4 x 4,4 mm que permiten mayor circulación de aire a través de la capa de granos, con mayor remoción de humedad en las etapas iniciales del proceso de secado. En pruebas realizadas se observó reducción en el tiempo de secado hasta del 50% (Figura 7). El plano detallado para la construcción del secador parabólico se presenta en el Avance Técnico 305 (Ramírez et al., 2003).



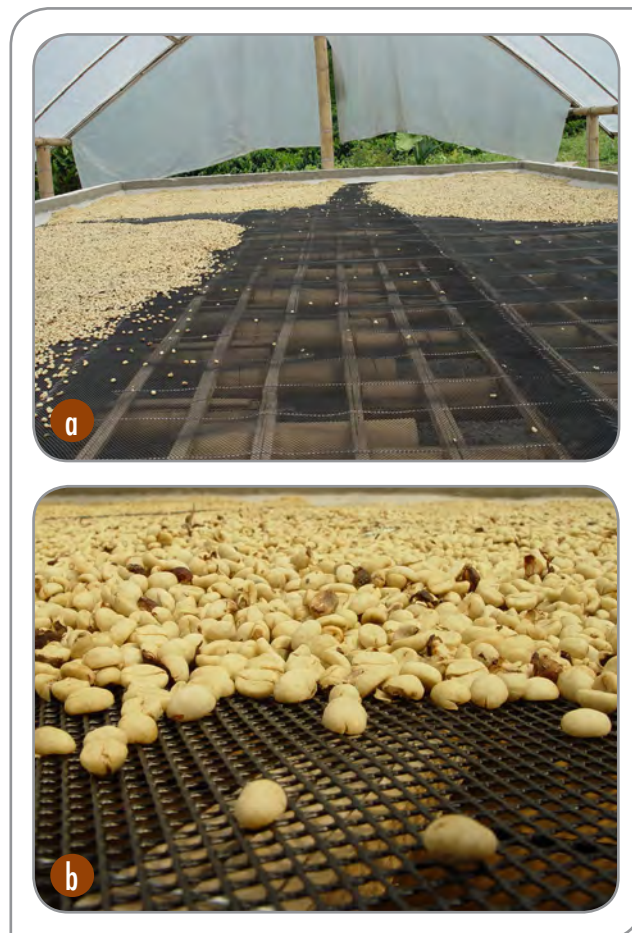
**Figura 4.**

Secador solar parabólico diseñado en Cenicafé.



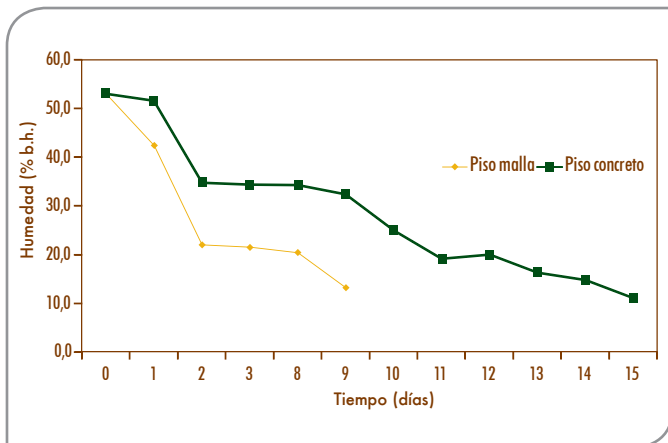
**Figura 5.**

Curvas de secado para café pergamino lavado en equipo parabólico y en bandejas móviles o “carros”, en las instalaciones de Cenicafé (Chinchiná).



**Figura 6.**

Piso en malla plástica del secador parabólico tipo Cenicafé. **a.** Vista general de la estructura sobre la cual se apoya la malla plástica; **b.** Vista cercana mostrando la malla y los granos de café.



**Figura 7.**

Curvas de secado obtenidas con secador parabólico con piso de concreto y en malla plástica, fabricada en hilos de polietileno de alta densidad, de 1 mm de diámetro y separación libre entre hilos de 4,4 mm (RED 5000).

**El secador parabólico ha sido construido y utilizado exitosamente en las zonas cafeteras de Colombia, como única opción en fincas de menor producción (hasta de 1.875 kg de café pergamino seco (c.p.s.) al año ó 150 @ de c.p.s. al año) y como alternativa en días de menor flujo de cosecha en fincas de mayor producción.**

En su construcción se emplean materiales como plástico y guadua, entre otros, con vida útil diferente. El plástico utilizado para la cubierta puede durar de 3 a 5 años, si se siguen las instrucciones presentadas por Ramírez et al. (2003) en el Avance Técnico de Cenicafé No. 305; el piso puede durar 15 años o más si es construido en concreto sobre estructura de guadua y hasta 5 años si es construido en malla plástica Red 5000. Teniendo en consideración lo anterior se diseñó un nuevo modelo, denominado parabólico 2, utilizando parte de la estructura y la guadua, en caso que esté en buen estado (Figura 8). En el nuevo modelo la altura máxima en la cumbre es de 1,5 m; se utilizan compuertas laterales, para facilitar el trabajo al operario fuera del equipo, para mayor confort y mayor facilidad para limpiar la cubierta plástica. Los detalles para su construcción son presentados en el Avance Técnico de Cenicafé No. 376 (Oliveros et al., 2008).

**Cuando el piso no está en buen estado y se desea seguir utilizando el secador Parabólico – Cenicafé, puede construirse un secador con piso alto (a 80 cm del suelo), con cubierta similar a la del secador parabólico 2, como se presenta en la Figura 9. Para el piso se utiliza malla plástica sarán de 40% de sombra. Por la altura del piso y facilidad de operación, algunos caficultores lo consideran apropiado para el secado solar del café.**



**Figura 8.**

Secador solar parabólico 2, con cubierta modificada, construido aprovechando el piso de un secador Parabólico 1.



**Figura 9.**

Secador solar parabólico 2, con cubierta modificada, construido aprovechando el secador Parabólico 1.

### Secador solar tipo túnel

**El secador solar tipo túnel consta de un piso en malla, soportado en una estructura construida en madera o en tubos de hierro, a 0,8 m del suelo, con cubierta plástica para proteger al café de la lluvia.** Son utilizados en Brasil para el secado del café en fruto y lavado, con y sin utilizar la cubierta plástica, denominados pisos elevados. De acuerdo con Micheli (2000), citado por Borém et al. (2008), con secadores tipo túnel sin cubierta plástica, denominados “terreiro suspenso”, se obtiene mejor calidad en cafés despulpados sin lavar (“descascados”) y con café lavado, que con el método tradicional en piso de concreto.

Como una alternativa a los secadores solares tipo parabólico utilizados en Colombia, se diseñaron secadores solares tipo túnel (Figura 10), teniendo en cuenta sugerencias de los usuarios de los secadores parabólicos, principalmente para facilitar la operación y mantenimiento, disminuir el tiempo de secado y el costo por metro cuadrado ( $m^2$ ).

Es una estructura en forma de túnel, con piso de 2 x 10 m, a 80 cm del suelo, construida en guadua y malla plástica sarán de 40% de sombra, con cubierta en forma de parábola, de altura máxima 1,8 y 2,0 m de ancho, con tres compuertas en cada lado, para facilitar al operario las actividades relacionadas con el secado del café, como cargar, esparcir el producto en capa de máximo 2 cm de altura, revolver y recoger, y descargar el producto seco. Con este modelo de 20  $m^2$  de área de piso puede secarse hasta 270 kg de café lavado, con altura de capa de 2 cm. En la Tabla 1 se presentan los materiales de construcción, los detalles para su construcción y las recomendaciones para su operación se presentan en el Avance Técnico de Cenicafé No. 353 (Oliveros et al., 2006).

### Secadores solares tipo túnel construidos con estructura metálica

Para facilitar la construcción de secadores solares tipo túnel y disminuir el costo de la mano de obra utilizada, se diseñaron dos nuevos modelos denominados Secador Túnel Solar Modelo 1 (TS-1) y Secador Túnel Solar Modelo 2 (TS-2). Adicionalmente, se buscó mejorar la fijación del plástico a la estructura, disminuyendo notoriamente las perforaciones ocasionadas por los clavos utilizados en los modelos anteriores, para alargar su vida útil. El modelo TS-1 conserva las dimensiones presentadas en el Avance Técnico Cenicafé No. 353 (Oliveros et al., 2006), reemplazando la guadua utilizada en la cubierta por tubos de hierro de 1", calibre 18, madera cepillada de 4 x 2 cm y manila de 1/4" (Figura 11). El volumen de la cámara de secado es 14,77  $m^3$ .

El secador Túnel Solar Modelo TS-2 presenta cámara de secado de 60,7cm, de menor altura que el modelo 1 (Figura 12), y un volumen de cámara de secado de 9,53  $m^3$ , con el fin de lograr mayores temperaturas en su interior y mayores tasas de secado, que se reflejan en menores tiempos de secado. Con esta reducción de altura se utiliza menos plástico para la construcción de la cubierta (Tabla 1), con menor costo del metro cuadrado de secador. También se utiliza tubo de hierro de 1" de diámetro, calibre 18, y tubo de hierro de sección rectangular de 2"x 4", calibre 18, **recubiertos con pintura anticorrosiva y pintura de aceite blanca.**

A continuación se presentan los materiales necesarios para la construcción del Secador Túnel Solar Modelo TS-2 (Tabla 2).



**Figura 10.**

Secador solar tipo túnel desarrollado en Cenicafé para café pergamino. **a.** Vista interna del secador; **b.** Manejo del café por medio de compuertas laterales; **c.** Rastrillo desarrollado en Cenicafé para revolver el café (Oliveros et al., 2006).

Material	Unidad	Dimensiones	Cantidad	Observaciones
Guaduas	m	1,00	10	Bases o columnas
	m	2,00	17	Partidas a la mitad en medias caras para un total de 34 piezas para soportar el piso del secador
	m	5,00	8	Para los soportes del piso
	m	5,00	4	30 "latas" de 3 cm x 5,0 m
	m	3,00	1	8 "latas" para los arcos de 3 cm x 3,0 m
Total Guaduas	m	5,00	20	
Varillón de 4 x 2 cm (Sajo)	Unidad	3	20	Para estructurar los arcos de la cubierta
Varas de 1 x 2 cm (Sajo)	Unidad	20	8	Para templar las tapas laterales en plástico
Plástico Agropilas N (PQA)	m	3	13	Calibre 6
Tubo conduit de 1 1/4"	m	6	4	Estructura arcos de la cubierta
Puntillas	lb	3"	1	
Puntillas	lb	2"	1	
Puntillas	lb	2 1/2"	1	
Puntillas	lb	1 1/2"	1	
Alambre galvanizado	kg		2	Calibre 18 para amarras
Tornillo galvanizado	m	3/8"	2,5	
Arandela	Unidad		20	
Tuerca	Unidad		20	
Grapa cosedora	caja		1	
Malla Sarán	m	3,0 x 1,0	11	Malla tipo Sarán de 45% de sombra
Fibra polietileno	rollo		1	
Pintura vinilo	galón		0,25	Blanco protección madera
Pintura aceite	galón		0,25	Blanco
Thinner	L		1	
Brocha 2"	Unidad		1	
Mano de obra	Jornales		4	Solo la cubierta

Tabla 1.

Materiales requeridos para la construcción de un secador de túnel solar modelo TS-1.



**Figura 11.**

Secador Túnel Solar Modelo TS-1. **a.** Estructura construida para la cubierta; **b.** Fijación de las compuertas laterales; **c.** Fijación del plástico a la estructura utilizada para la cubrera; **d.** Vista interior de la cámara de secado; **e.** Vista general del secador.



**Figura 12.**

Secador Túnel Solar Modelo TS-2. **a.** Estructura utilizada para la cubierta; **b.** Detalle de la unión del tubo de sección rectangular al pórtico; **c.** Fijación del plástico a la estructura de la cubierta; **d.** Vista interior de la cámara de secado; **e.** Vista externa del secador.



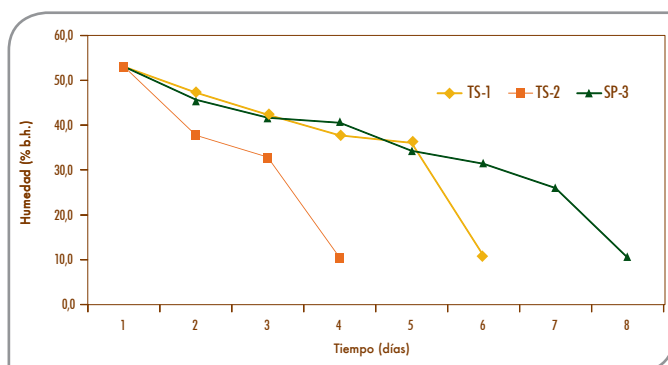
Material	Unidad	Dimensiones	Cantidad	Observaciones
Guaduas	m	1,00	10	Bases o columnas
	m	2,00	17	Partidas a la mitad en medias caras para un total de 34 piezas para soportar el piso del secador
	m	5,00	8	Para los dos soportes del piso
	m	5,00	4	30 latas de 3 cm x 5,0 m
	m	3,00	1	8 latas para los arcos de 3 cm x 3,0 m
Total guaduas	m	5	20	
Varas de 1 cm x 2 cm (madera fina)	Unidad	20	8	Para templar los tapas laterales en plástico
Plástico Agroplas o N PQA	m	2,5 de ancho doble	12	Calibre 8
Tubo conduit de 1 1/4"	m	6	5	Estructura arcos de la cubierta
Perfil rectangular 1" x 2" x 6mts Cal 18	m	6	5	
Platina de 1/8"x 1" x mts	m		1	
Tornillo madera cabeza plana 9x1 ref 1491	caja		1	Unir perfiles con tubos
Tornillo madera cab. plana 9x1.1/2 ref 1493	caja		1	Unir perfiles con tubos
Tornillo madera cab. plana 9x2.1/2 ref 1496	caja		1	Unir perfiles con tubos
Puntillas	Libra	3"	1	
Puntillas	Libra	2"	1	
Puntillas	Libra	2 1/2"	1	
Puntillas	Libra	1 1/2"	1	
Alambre galvanizado calibre 18	kg	1/16"	2	Amarras
Tornillo galvanizado x metros	Unidad	3/8"	25	
Arandela	Unidad		20	
Tuerca	Unidad		20	
Grapa cosedora	caja		1	
Malla Sarán del 45%	m	3,0 m x 11,0 m	1	Malla tipo Sarán de 45% de sombra
Fibra polipropileno	Rollo		1	Referencia 120000
Pintura	Galón		0,25	Protección madera
Pintura	Galón		0,25	Vinilo blanco
Thinner	L		1	
Brocha 2"	Unidad		1	
Mano de obra	Jornal		4	Solo cubierta

Tabla 2.

Materiales requeridos para la construcción de un secador de túnel solar modelo TS-2.

En días lluviosos el secador puede operarse con las compuertas laterales cerradas más del 80%, utilizando un ventilador axial de 6" de diámetro (extractor), con un promedio de caudal de  $4,91 \text{ m}^3 \cdot \text{min}^{-1}$ , controlado por medio de un temporizador que lo activa cada 10 min, durante 2 min. De esta forma se evita el contacto del café con la lluvia, mejora el aprovechamiento de la energía solar y facilita la operación del secador.

En la Figura 13 se presentan las curvas de secado obtenidas con los secadores solares tipo túnel, modelo 1 (TS1) y 2 (TS2), y con el secador parabólico con piso y cubierta modificados (SP3). Se observa menor tiempo de secado con el modelo TS2 seguido del TS1.



**Figura 13.**

Curvas de secado obtenidas con tres tipos de secadores solares. Tipo túnel solar, modelo 1 y 2 (TS1 y TS2) y con secador parabólico con piso y cubierta modificados (SP3).

### Secador solar tipo túnel para pequeños productores

Para caficultores con producción anual hasta de 625 kg de café pergamino seco por año ( $50 \text{ @.año}^{-1}$  de c.p.s.), se diseñó un secador solar tipo túnel de bajo costo por metro cuadrado, con piso para secado de  $1 \times 6 \text{ m}$ , que puede ser construido fácilmente por el caficultor con la ayuda de su familia, modelo TS-3 (Figura 14).

Este secador presenta las siguientes novedades con relación al túnel solar, modelos TS-1 y TS-2:

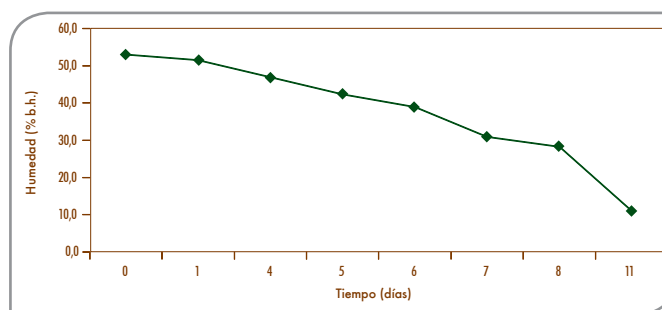
- Se puede ensamblar en el sitio escogido y desarmar en menos de 4 h.
- La altura del piso del secador puede variar desde menos de 20 cm hasta 80 cm.
- El plástico empleado para la cubierta se coloca utilizando accesorios que permiten extenderlo y retirarlo en menos de 10 minutos, por lo cual, cuando no hay café para secar se puede retirar y guardar, aumentando su vida útil.

- La estructura de la cubierta está construida utilizando componentes metálicos y fibra sintética, de relativo bajo costo, fácil uso y, principalmente, larga vida útil.



**Figura 14.**

Secador de túnel solar modular para café. a. Vista general; b. Detalle del accesorio empleado para fijar el plástico de la cubierta del secador.



**Figura 15.**

Curva de secado para café, obtenida en el secador modular de túnel solar, con una altura de capa de granos de 2 cm.

El tiempo requerido para secar el café del 53% a 11% de humedad es de 11 días (Figura 15), lo cual se explica por las condiciones climáticas que se presentaron durante el ensayo: 3 días con cero horas de brillo solar, 5 días hasta con 2 horas de brillo solar y un 1 día con 4 horas de brillo solar.

### Consideraciones prácticas

*Estos secadores también pueden utilizarse en fincas de mayor producción en días de menor flujo de cosecha, también se pueden emplear para orear el café y continuar el proceso en el silo, disminuyendo costos de combustible y de energía eléctrica.*

Algunas propiedades ópticas y mecánicas de dos plásticos utilizados para la cubierta de secadores parabólicos, referencia Agroplas N y AgrocLEAR de 7 a 8 milésimas de pulgada de espesor, se presentan en la Tabla 3 (Oliveros, 2004). Después de 2 años, se observa que las propiedades ópticas del plástico experimentan variación máxima del 12%, mientras que las propiedades mecánicas, principalmente la resistencia al rasgado, presentan disminución hasta de 82,2%. Luego de este tiempo, los plásticos se han “endurecido”, comportamiento que se refleja en el incremento de la resistencia a la tensión en el punto de rotura en ambas direcciones (hasta 29%).

## Método para medir la humedad del café en secado solar

En días soleados, la temperatura en el interior de los secadores solares tipo túnel desarrollados en Cenicafé puede alcanzar valores superiores a 50°C, durante varias horas, y la humedad relativa disminuir a menos del 20%. Desde el punto de vista del proceso de secado, esto contribuye a aumentar la tasa de extracción de humedad de los granos y disminuir el tiempo de secado. Sin embargo, también puede causar que los granos disminuyan su contenido de humedad a niveles inferiores al 10%, con pérdidas económicas al caficultor, si no se está atento para determinar el momento adecuado para retirarlos del secador.

Para medir la humedad del café en las fincas se utilizan métodos basados generalmente en el color y la dureza de las almendras, que con frecuencia conducen a tomar decisiones equivocadas sobre el momento apropiado para retirar el café del secador, cuando su contenido de humedad está en el rango exigido en la comercialización (10% a 12% en base húmeda, b.h.). En un estudio realizado por la Federación Nacional de Cafeteros de Colombia (Federacafé, 1984) con 623 muestras de café pergamino seco, obtenidas en igual número de fincas, se encontró que el 25% de ellas tenían menos del 10% de humedad y el 13% más del 12%, es decir, el 38% de las muestras no presentaba el contenido de humedad final exigido en la comercialización, lo cual ocasiona pérdida en la calidad del café y afecta los ingresos del productor (Roa et al., 1999).

Propiedad	AgrocLEAR			Agroplas		
	Tiempo, años		Variación,%	Tiempo, años		Variación,%
	0	2		0	2	
Transmisión de luz total (400nm - 700nm), %	77,3	82,2	6,3	82,2	81,1	-1,3
Transmisión de luz difusa (400nm - 700nm), %	44,9	44,0	-2,0	17,5	19,5	11,4
Termicidad, %	87,4	85,9	-1,7	53,7	56,6	5,4
Resistencia al rasgado, gf (DM)	5.000	889	-82,2	5.000	1.272	-74,6
Resistencia al rasgado, gf (DT)	5.200	1.600	-69,2	5.200	1.587	-69,5
Elongación en punto de rotura,%,(DM)	450	986	119,1	450	768	70,7
Elongación en punto de rotura,%,(DT)	590	1.320	123,7	590	1.050	78,0
Resistencia a la tensión en punto de rotura, MPa (DM)	16,3	20	22,7	16,3	21	28,8
Resistencia a la tensión en punto de rotura, MPa (DT)	16,3	19	16,6	16,3	16	-1,8

Tabla 3.

Propiedades ópticas y mecánicas de plásticos utilizados en secadores parabólicos referencia Agroplas N y AgrocLEAR de 7 a 8 milésimas de pulgada de espesor, construidos en Chinchiná (Caldas). (Oliveros, 2004).

Para determinar el momento adecuado para detener el secado, los caficultores o personas responsables de la actividad recurren a métodos tradicionales como la evaluación del color del café sin pergamino o de la dureza del mismo, también al sonido que producen los granos de café al revolverse dentro del secador. Recientemente, en una prueba realizada con 76 caficultores, con muestras de café en almendra, en el rango de humedad del 8% al 14%, se observó que solamente el 30% identificó el café en el rango del 10% al 12%, mientras que el 37% asoció el color con más del 12% de humedad y el 33% se inclinó por los granos con menos del 10%, con lo cual se evidenció que el 70% de los caficultores cometen un error, sea sobre o subestimando la humedad del café (Peñuela et al., 2010); estos resultados corroboran una vez más que los métodos tradicionales empleados en las fincas no son confiables para determinar la humedad del café.



*En Cenicafé se desarrolló un método para medir la humedad durante el proceso de secado solar y definir el momento de retirar el café, basado en la conservación de la materia seca durante el proceso de secado, es decir, se asume que se retira fundamentalmente agua, considerando que las pérdidas por respiración son pequeñas y se pueden descartar (Oliveros, 2001; Oliveros et al., 2009). La humedad del café al inicio del proceso de secado, escurrido una hora en tanque, sin flotes, guayabas, granos brocados, ni restos de pulpa, es de 53% b.h. (Oliveros et al., 2009). El café seco se considera con humedad del 11% (b.h.), con el fin de evitar granos con humedad superior al 12% (granos “flojos”), que pueden ser detectados al momento de vender el café y causar el rechazo del lote. Teniendo en cuenta las condiciones iniciales y finales de humedad definidas anteriormente para el proceso de secado, cuando la masa de café experimente una disminución de 47,3% de su valor inicial, el café estará con un promedio de humedad del 11%.*

Para la **aplicación del método, denominado Gravimet**, se utiliza una canastilla construida en malla plástica, translúcida, con aberturas de 6,5 x 6,5 mm en el fondo y área libre de 68%. En los costados presenta aberturas rectangulares de 6,5 x 4,5 mm y área libre de 63%. En la canastilla se deposita una muestra de igual altura a la capa a secar: 200 g en capa de 2 cm de altura, 150 g con altura de capa de 1,5 cm y 100 g con altura de capa de 1,0 cm; con las alturas de capa de café anteriores, el peso del café seco al 11% b.h., debe ser 104 a 105 g, 78 a 79 g y 52 a 53 g, respectivamente, como se presenta en el Avance Técnico de Cenicafé No. 387 (Oliveros et al., 2009). Para pesar el café se utiliza una balanza digital de bajo costo, con rango 0 a 5 kg y resolución de 1 g. Jurado et al. (2009) obtuvieron un error absoluto promedio de 1,0% para el **método Gravimet**, en el rango de 53% a 10%. El método fue evaluado en fincas de caficultores en los departamentos de Antioquia, Caldas, Risaralda y Quindío, con un total de 231 lotes de café, a los cuales se les realizó el seguimiento de la humedad utilizando el **método Gravimet**, como resultado de este proceso, el 93% de los lotes presentó contenido de humedad entre el 10% y el 12% (Oliveros et al., 2009).

Para la aplicación del **método Gravimet** se emplea el procedimiento presentado en el Anexo 14. Aplicación del Método Gravimet.

## Consideraciones generales para seleccionar un secador solar

Para seleccionar un secador solar deben considerarse al menos los siguientes factores:

- Flujo de café en la semana de mayor producción, denominada semana “pico”
- Información sobre clima, principalmente temperatura media, precipitación, humedad relativa media y brillo solar de la región donde está localizada la finca
- Posibilidad de cambios notorios en las condiciones climáticas del lugar por la presencia de los eventos de La Niña y El Niño
- Disponibilidad económica
- Alternativas tecnológicas

El flujo de café en la semana “pico” se puede considerar igual a cuatro veces la producción del día “pico”. La producción en el día pico varía, en general, dependiendo de la altitud de la finca, siendo mayor en zonas localizadas a menos de 1.400 m.s.n.m. Puede variar del 1% hasta el 2,0% de la producción anual. Los registros de producción de la finca generalmente son la mejor guía para estimar la producción de la semana pico.

## Consideraciones prácticas

*La información sobre clima en regiones cafeteras colombianas se registra en el Anuario Meteorológico Cafetero publicado anualmente por Cenicafe, en el cual se encuentra la información obtenida en la red meteorológica de la Federación Nacional de Cafeteros distribuida en las zonas cafeteras colombianas, para cada mes y día del año, en un determinado lugar. En este documento se puede obtener información de temperatura (máxima y mínima), humedad relativa media (%), precipitación (mm) y brillo solar (h).*

La época más crítica para el secado solar se presenta durante la temporada de cosecha por las condiciones climáticas que se presentan: Alta precipitación, baja temperatura, alta humedad relativa y bajo brillo solar, con un producto con actividad del agua superior a 0,9 durante gran parte del proceso. Para disminuir los riesgos para la calidad e inocuidad del café se debe tener especial cuidado al seleccionar la tecnología a utilizar y el área de secado disponible para cada día de la semana que lo requiera. La altura de capa no debe superar 2,0 cm y el café se debe revolver al menos cuatro veces al día para permitir el mejor aprovechamiento de la energía solar y del aire.

Como criterio para definir la viabilidad de alguna de las tecnologías mencionadas para el secado solar, como principal alternativa en la finca y para estimar el área requerida, se debe considerar que los mejores resultados se obtienen en lugares con un promedio de brillo solar superior a 5 h.día<sup>-1</sup>, y que en estas condiciones el secado, con altura de capa hasta de 2 cm, dura máximo 7 días.

**De las consideraciones anteriores, se pueden estimar para una determinada tecnología la capacidad diaria y semanal máximas.** Con un secador solar tipo túnel con área de piso de 20 m<sup>2</sup>, se podrían secar cada día, en promedio, 55,5 kg de café lavado y escurrido, con una altura máxima de capa de 2 cm. En la semana se secarían 280 kg de café lavado, de los cuales se obtienen aproximadamente 148 kg de café pergamino seco al 11%. Se podría atender las necesidades de secado de fincas con producción anual de 2.951 kg y 1.475,6 kg de c.p.s. (236 - 118 @.año<sup>-1</sup> de c.p.s.), con días "pico" de 1% y 2%, respectivamente.

**La ocurrencia de eventos de La Niña y El Niño debe tenerse en cuenta en la decisión sobre la tecnología a utilizar y el área requerida para el secado del café.** En eventos de El Niño, con mayor temperatura, menor

precipitación, menor humedad relativa y mayor brillo solar, la cosecha tiende a concentrarse, con mayor flujo de café en el día pico respecto a los registrados en tiempo neutro. En el evento de La Niña, por las condiciones climáticas que se presentan la cosecha tiende a ser menos concentrada y el proceso de secado requiere más tiempo, aumentando los riegos para la calidad e inocuidad del café. Debido al incremento en las precipitaciones en los días de la cosecha, es recomendable utilizar secadores con cubierta plástica para proteger al café (tipo parabólico y túnel solar) o colocar cubierta plástica a los que no la tienen, como patios y carros.

## Secado mecánico del café

*En gran parte de las regiones cafeteras las condiciones climáticas en la época de cosecha no son favorables para el secado solar del café, aun en pequeña escala, por la baja temperatura, la alta humedad relativa y el bajo brillo solar que se presentan, condiciones que aumentan el tiempo en el proceso de secado, con riesgo para la calidad e inocuidad del producto. Debido a ello, en los últimos años se ha incentivado el uso de secadores de baja capacidad estática (desde 94 kg de c.p.s.) como complemento del secado solar, secado combinado o como única alternativa.*

*De igual manera, en presencia del evento del fenómeno de La Niña las condiciones son desfavorables para el secado solar del café en gran parte de las zonas cafeteras, por el incremento en las precipitaciones de 20% a 40% con relación a los valores esperados (Jaramillo y Arcila, 2009).*

El diseño y la operación apropiada de un secador son de gran importancia para obtener café de alta calidad, con mejor aprovechamiento de la energía y de la mano de obra y menores costos.

## Tecnologías utilizadas para el secado mecánico del café

El secador mecánico de café tipo Guardiola (Figura 16), fue diseñado por el ingeniero José Guardiola en el año 1869, y es uno de los más conocidos para secar café en el mundo.

Consiste de un tambor, con perforaciones para la salida del aire húmedo, que gira a baja velocidad ( $< 2$  rpm); el tambor está dividido en varias cámaras independientes, a las cuales llega el aire de secado a través de un ducto central con perforaciones. Las cámaras se llenan con café hasta un máximo de 75% a 80% de su volumen. Al girar el tambor los granos se desplazan en varias direcciones, principalmente radial y tangencial, permitiendo su mezcla, para finalmente obtener un producto seco con humedad más uniforme, como su principal ventaja.

Como desventajas se tienen el prolongado tiempo de secado, baja eficiencia energética, necesidad de presecar el café en otros equipos, complejidad de manejo y alto costo, tanto inicial como de mantenimiento.

**Con el fin de ofrecer tecnología para el secado de café en Colombia, sin las desventajas mencionadas para el equipo Guardiola, en Cenicafé, en la década de 1970, se diseñó un secador denominado Silo Secador Cenicafé (Figura 17).**

Este secador generalmente consta de dos cámaras o cuartos de secado, de menor complejidad mecánica que



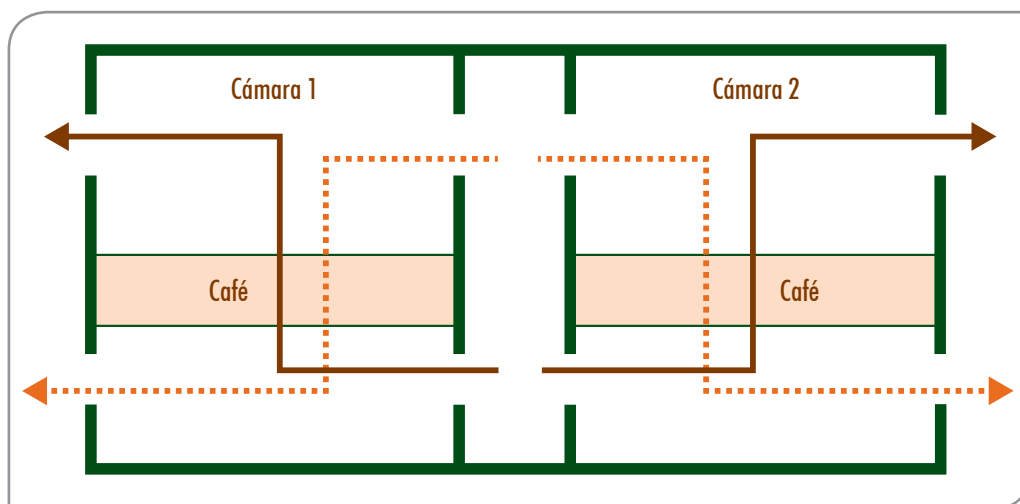
**Figura 16.**

Secador mecánico de café tipo Guardiola.

el secador Guardiola, construido utilizando materiales de mampostería (Ladrillos, bloques, cemento, entre otros).

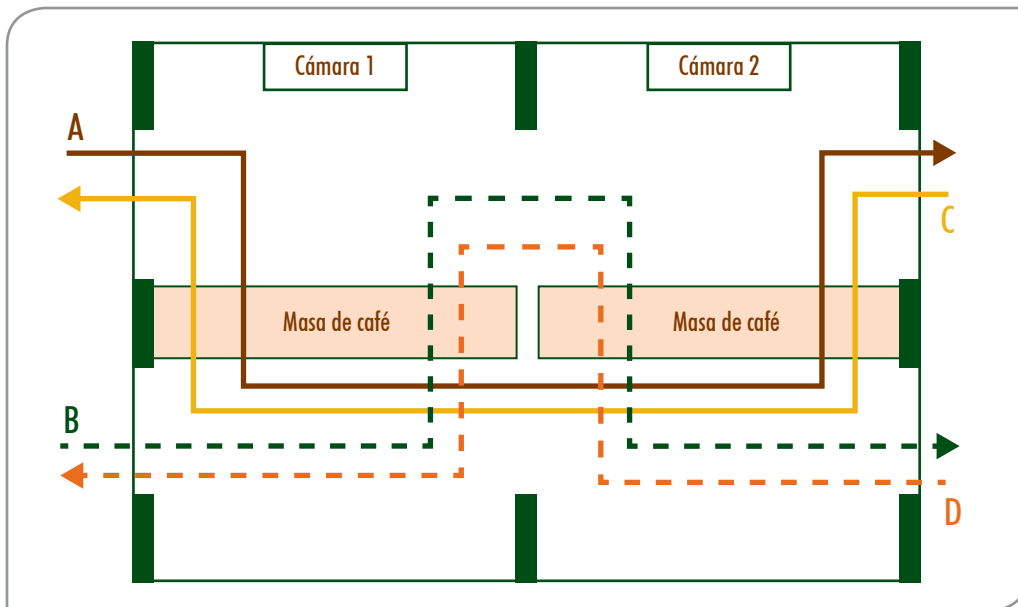
El aire de secado es entregado en cada cámara desde un túnel central. Para obtener un producto seco con mayor uniformidad de humedad se optó por invertir la dirección del aire que pasa a través de cada capa de granos, utilizando compuertas, en lugar de agitar y mezclar los granos durante el proceso de secado. Para un mejor aprovechamiento de la energía térmica utilizada para calentar el aire de secado, el secador se diseñó con dos cámaras, con altura máxima de capa de 40 cm, en cada una.

A pesar de las ventajas técnicas y económicas presentadas en el Secador Cenicafé se observó dificultad para accionar las compuertas debido a que el operario



**Figura 17.**

Esquema de funcionamiento de un Silo Secador Cenicafé de túnel central. Las líneas representan el flujo del aire. Líneas continuas: El aire entra por debajo y sale por encima de la capa; línea punteada: El aire entra por encima y sale por debajo de la capa de café.



**Figura 18.**

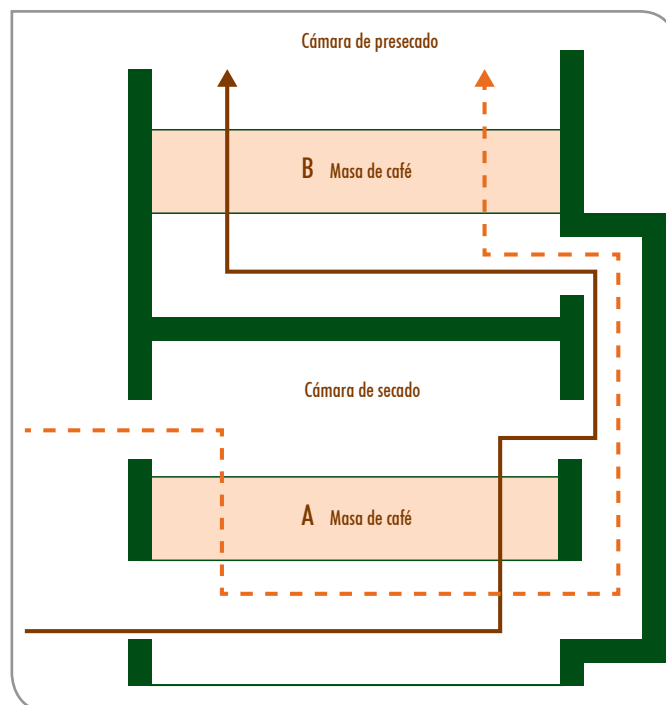
Esquema de funcionamiento de un silo secador Cenicafé modificado con cámaras dispuestas en un mismo nivel. Las líneas representan el flujo del aire.

debía ingresar al túnel, que estaba caliente y por sus dimensiones dificultaba el acceso y los desplazamientos. Para superar estas limitaciones y aumentar la eficiencia energética en el proceso, aprovechando la capacidad de secado del aire exhausto, se modificó el silo secador Cenicafé para que trabajara en serie con una capa en secado y otra en presecado, dispuestas en un mismo nivel (Figura 18) o verticalmente (Figura 19). Para esta modificación se requirió de dos compuertas adicionales. En el nuevo modelo las compuertas se operaban por medio de palancas accionadas externamente. Esta tecnología ha sido muy utilizada en Colombia (Figura 20), con las cámaras de secado en un mismo nivel o dispuestas verticalmente.

Los secadores que se fabrican actualmente en Colombia para el café, en general, constan de tres cámaras, dispuestas verticalmente (Figura 21). En cada una se puede colocar una capa de café con altura de 12 a 40 cm, según el modelo y la capacidad del equipo. Para el manejo del café entre cámaras se asume que cada capa está dividida virtualmente en dos capas de igual espesor, denominadas inferior y superior. El café lavado y escurrido, se carga en la cámara más alta, denominada cámara de presecado 2, luego de 6 h de secado con aire a 50°C, se pasa a la cámara intermedia o cámara de presecado 1, descargando primero el café más húmedo (capa superior), luego el más seco (en la capa inferior). A las 12 h de iniciado el proceso de secado, se pasa el café del presecado 1 a la cámara de secado, invirtiendo la capa como se mencionó anteriormente y se carga con café lavado y escurrido la cámara de presecado 2. Seis horas más tarde, el café en la cámara de secado está listo, con humedad entre el 10% y el 12%, se retira del equipo, permitiendo su enfriamiento con aire ambiental durante al menos 4 h antes de ensacarlo. Si el secador se carga

nuevamente con café lavado, cada 6 horas se obtiene café seco.

El secador de tres cámaras se ofrece con o sin inversión de flujo de aire en la cámara inferior. Para la primera



**Figura 19.**

Secador Cenicafé con cámaras dispuestas verticalmente e inversión del flujo del aire en la cámara de secado. Las líneas representan el flujo del aire.



**Figura 20.**

Silo secador para café Cenicafé.

opción se requiere de un ducto externo, compuertas y una placa deslizante (Figura 22). En la segunda opción, la uniformidad del secado se logra mediante el paso ordenado del café de una cámara a otra, como se mencionó anteriormente. Esta última disposición es la más económica en cuanto a inversión inicial, pero requiere más mano de obra.



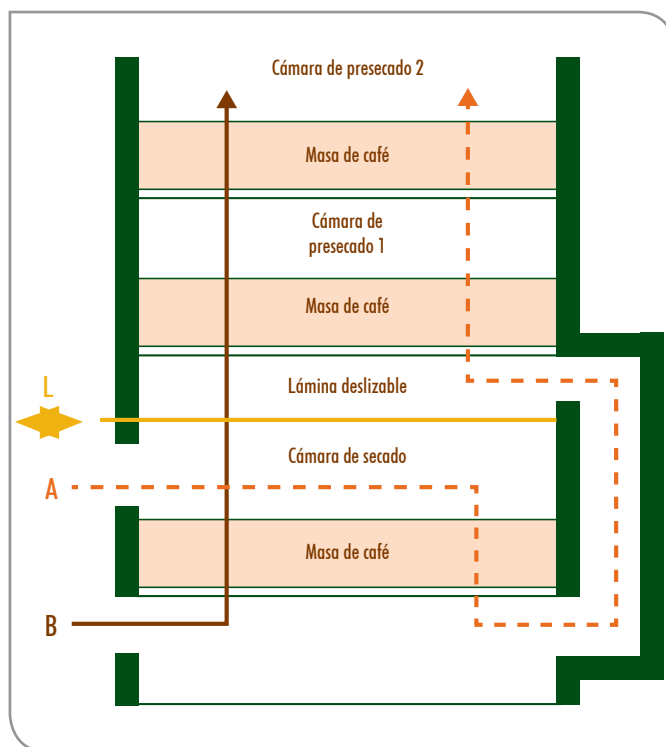
*El silo secador Cenicafé ha sido el punto de partida para el desarrollo de nuevos equipos, utilizando el mismo principio de invertir la dirección del flujo del aire o voltear la capa de granos al pasarlos de una cámara a otra para obtener café seco con mayor uniformidad del contenido de humedad.*

Algunos equipos fabricados por la industria colombiana para atender las necesidades de secado de café, en amplio rango de producción anual, se presentan en la Figura 21. Para fincas con producción de 2.500 a 3.750 kg.año<sup>-1</sup> de café seco se ofrecen secadores con capacidad estática de 178 kg de café lavado (aproximadamente 94 kg de café pergamino seco), utilizando gas propano en combustión directa, para calentar el aire de secado hasta un promedio de 50 °C. Para fincas con producción hasta

de 10.000 kg.año<sup>-1</sup> de café seco se fabrican equipos con capacidad para secar 500 kg de café lavado (Aprox. 262 kg de café pergamino seco), con intercambiador de calor y utilizando como combustible cisco o cascarilla de café, con alimentación mecánica o por gravedad. Para mayores necesidades de secado, la industria ofrece secadores con capacidad estática de 10.600 kg de café lavado (Aprox. 5.625 kg de café pergamino seco), con agitación mecánica automática del café en cada cámara de secado, descarga mecánica del café entre cámaras y retiro del café seco utilizando tornillo sinfín.

## Ventiladores

Es el componente del equipo que entrega el caudal de aire a la presión requerida (Figura 23). Para café se utilizan ventiladores centrífugos, generalmente con álabes curvados hacia atrás, que no se sobrecargan cuando el secador se utiliza con diferentes alturas de capa (Figura 24). Consta de un rotor que gira excéntricamente en el interior de una voluta en la cual entra el aire por la succión generada por el giro del rotor, luego se comprime y expulsa. El rotor puede estar unido al motor o accionado mediante una transmisión de potencia de poleas y bandas (Figura 25).



**Figura 21.**

Esquema de funcionamiento de un secador de tres capas fijas dispuestas verticalmente, con inversión de flujo de aire en la cámara inferior. Las líneas representan la dirección del flujo del aire.





**Figura 22.**

Secadores de café utilizados en Colombia, con tres cámaras de secado. **a.** Sin intercambiador de calor; **b.** Con intercambiador de calor y alimentación por gravedad de cascarilla de café; **c.** Con intercambiador de calor y alimentación con tornillo sinfín de cascarilla de café; **d.** Con agitación mecánica del café en las cámaras y descarga con tornillo sinfín.



**Figura 23.**

Ventilador centrífugo utilizado en secadores de café de álabes rectos.



**Figura 24.**

Ventilador centrífugo utilizado en secadores de café con álabes curvados hacia atrás.

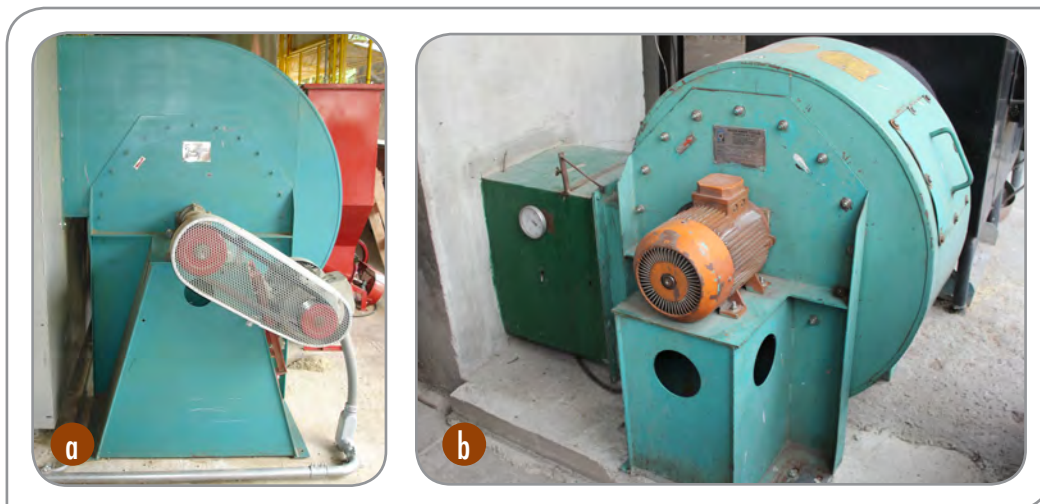


Figura 25.

Accionamiento de ventiladores. **a.** Con transmisión de potencia de poleas y correas; **b.** Acople directo

El ventilador es una turbomáquina que sigue las relaciones de caudal, presión, velocidad de giro y potencia indicadas a continuación (Henderson y Perry, 1976):

El caudal varía directamente con la velocidad de giro, que se expresa como en la Ecuación 1:

$$\frac{N_1}{N_2} = \frac{Q_1}{Q_2} \quad \text{Ecuación 1}$$

Donde,  $Q_1$  es el caudal entregado a la velocidad de giro  $N_1$  y  $Q_2$  es el caudal que entregaría a una velocidad  $N_2$ .

La presión total, estática o de velocidad, varía con el cuadrado de la velocidad (Ecuación 2).

$$\frac{N_1^2}{N_2^2} = \frac{H_1}{H_2} \quad \text{Ecuación 2}$$

Donde,  $H_1$  es la presión (total, estática o de velocidad) a la velocidad de giro  $N_1$  y  $H_2$  es la presión que entregaría a la velocidad de giro  $N_2$ . La potencia requerida varía con el cubo de la velocidad (Ecuación 3).

$$\frac{N_1^3}{N_2^3} = \frac{hp_1}{hp_2} \quad \text{Ecuación 3}$$

Donde,  $hp_1$  es la potencia requerida a la velocidad de giro  $N_1$  y  $hp_2$  la potencia que se requeriría a la velocidad de giro  $N_2$ .

Cuando en un secador se considera la posibilidad de variar la velocidad de giro del rotor para modificar el caudal de aire entregado, se recomienda tener en cuenta además de la velocidad requerida para obtener el nuevo caudal ( $N_Q$ ), la velocidad a la cual deberá girar para alcanzar la nueva presión ( $N_P$ ), como mencionan Gutiérrez et al. (2012), que

básicamente es la resistencia que ofrece el sistema al paso del nuevo caudal de aire (Ecuación 4).

$$N_f = \frac{(3N_P + N_Q)}{4} \quad \text{Ecuación 4}$$

Como ejemplo de aplicación de las Ecuaciones 1 a la 4 se tiene el siguiente:

En un secador de café de dos cámaras de 2 x 3 m, con 40 cm de altura de capa en cada una, se midió el caudal obteniendo un valor de  $120 \text{ m}^3 \cdot \text{min}^{-1}$ , con una presión estática de 3,8 cm de  $\text{H}_2\text{O}$ . El rotor del ventilador del secador gira a 900 rpm y es accionado por un motor de 4,8 hp. Con el caudal obtenido y la masa de café depositada en las dos cámaras (1,6 t de c.p.s.) el evaluador obtuvo un caudal específico de aire de  $73 \text{ m}^3 \cdot \text{min}^{-1}$  de c.p.s., que es notoriamente inferior al valor medio recomendado para secado de café ( $100 \text{ m}^3 \cdot \text{min}^{-1}$  de c.p.s.). Como primera alternativa se considera aumentar la velocidad de giro del ventilador, se puede hacer?

Utilizando la Ecuación 1 se determina la velocidad de giro del rotor del ventilador para obtener el caudal de aire de secado requerido ( $164 \text{ m}^3 \cdot \text{min}^{-1}$ ).

$$N_Q = 900 \left( \frac{164}{120} \right) = 1.200 \text{ rpm}$$

Si aumentamos el caudal de aire hasta  $164 \text{ m}^3 \cdot \text{min}^{-1}$  la caída de presión a través de la capa sería de 6,0 cm de  $\text{H}_2\text{O}$ , utilizando la Ecuación 5, propuesta para café por Óliveros y Roa (1986).

$$\frac{\Delta P}{\Delta L} = \left[ \frac{Q}{A} \right]^{1,4793} \quad \text{Ecuación 5}$$

Donde

$Q$  = Caudal de aire ( $\text{m}^3 \cdot \text{min}^{-1}$ )

$A$  = Área transversal al flujo del aire ( $\text{m}^2$ )

$M$  = Contenido de humedad del café (% base húmeda)

$\Delta P$  = Caída de presión en secciones distantes  $L$  (cm de agua)

$\Delta L$  = Distancia entre mediciones de la pérdida de presión  $P$  (m)

Con el valor de caída de presión obtenido para el nuevo caudal de aire de secado obtenemos la velocidad de giro del rotor requerida

$$N_p = 900 \sqrt{\frac{6,0}{3,8}} = 1.131 \text{ rpm}$$

Utilizando la Ecuación 4 calculamos la velocidad a la que finalmente el rotor del ventilador debe girar para obtener un caudal de aire de  $164 \text{ m}^3 \cdot \text{min}^{-1}$ .

$$N_f = \frac{[3 (1.131) + 1.200]}{4} = 1.148 \text{ rpm}$$

La potencia requerida para operar el rotor del ventilador a la nueva velocidad de giro sería

$$P_f = 4,8 \left( \frac{1,148}{900} \right)^3 = 10,0 \text{ hp}$$

En consecuencia se debe reemplazar el motor por otro que entregue la potencia requerida y realizar las modificaciones que sean necesarias en la transmisión de potencia actual. Hay que asegurar que el rotor del ventilador esté suficientemente balanceado para resistir el aumento de velocidad angular.

### Consideraciones prácticas

De acuerdo con el ejercicio anterior, las relaciones de caudal, presión y potencia son útiles para estimar el efecto que tendría la variación de giro del motor y la posibilidad de hacerlo para superar situaciones que se presentan frecuentemente en los secadores, generalmente por falta de caudal y de presión de aire de secado. Sin embargo, en la mayoría de los casos no se logra lo anterior simplemente variando la velocidad de giro del rotor del ventilador. Por ello se recomienda la asesoría de profesionales con experiencia en la selección de equipos para el secado mecánico del café antes de adquirirlos y para realizar modificaciones a los equipos, como la mencionada.

## Medición del caudal de aire de secado

Para medir el caudal de aire entregado por un ventilador en un secador de café Oliveros y Roa (1986) determinaron experimentalmente las relaciones entre la caída de presión entre dos puntos localizados a diferente altura en la capa de granos y el flujo de aire por unidad de área de piso del secador (Figura 26).

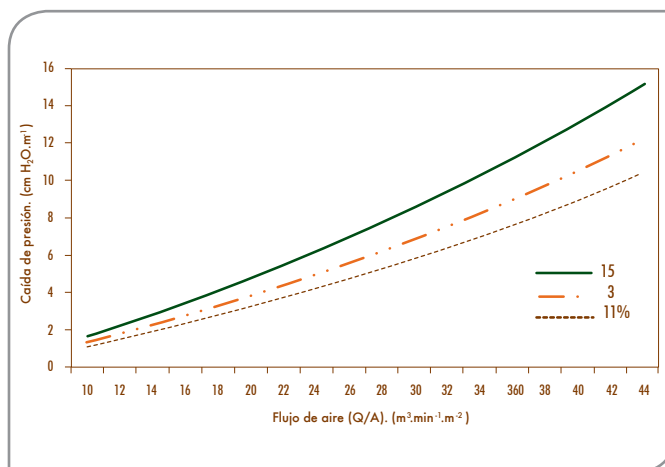


Figura 26.

Relaciones de caída de presión a través de la capa de café por unidad de altura ( $\frac{\Delta P}{\Delta L}$ ) y caudal por unidad de área ( $\frac{Q}{A}$ ), para diferentes contenidos de humedad del café.

Para medir la caída de presión estática puede utilizarse un manómetro, construido en manguera de polietileno doblada en U, con agua, preferiblemente destilada, colocando un fondo en papel milimetrado como se observa en la Figura 27.



Figura 27.

Medición de la caída de presión en una capa de café.

La diferencia entre la parte baja de los dos meniscos en cada manguera, en centímetros de columna de agua, es la caída de presión entre los dos puntos que están localizados a una diferencia de altura ( $h$ ), medida previamente en metros. Adicionalmente, deben registrarse las dimensiones del piso del secador ( $a$  y  $b$ , en metros), en equipos de sección rectangular o cuadrada, y obtener el área respectiva ( $a \times b$ , en metros cuadrados,  $m^2$ ). Si el secador es de sección circular se mide el radio ( $r$ ) o el diámetro ( $D$ ) y se calcula el área,  $3,14 r^2$  ó  $3,14 (D/2)^2$ , en  $m^2$ .

El caudal de aire obtenido siguiendo el procedimiento anterior debe compararse con el recomendado para el secado del café ( $100 m^3 \cdot \text{min}^{-1}$  de c.p.s.) (Parra et al. 2008), si es inferior, pueden considerarse las siguientes alternativas:

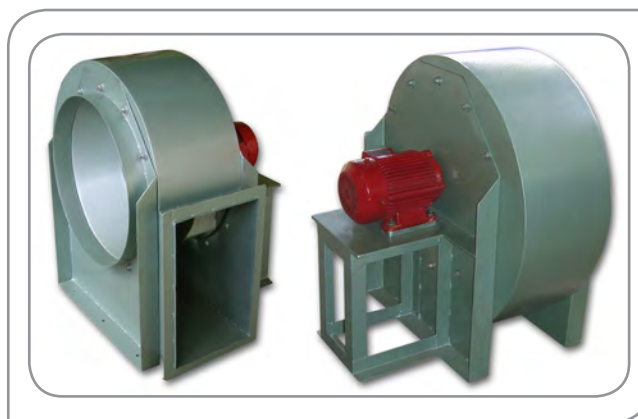
**a. Con café lavado, bien escurrido y el secador al 100% de su capacidad, medir el caudal de aire de secado siguiendo la metodología mencionada anteriormente.**

Si el valor obtenido no está en un rango de 90 a  $110 m^3 \cdot \text{min}^{-1}$  de c.p.s., para facilitar el procedimiento, es necesario disminuir en 10% la altura total de capa de café, en una sola cámara de secado. Medir nuevamente la caída de presión entre dos puntos de una capa de café y obtener el caudal de aire respectivo. Si el valor está entre 90 y  $110 m^3 \cdot \text{min}^{-1}$  de c.p.s., la altura de la capa total a utilizar será la observada. En caso que no se obtenga el caudal de aire de secado requerido, se debe disminuir nuevamente la altura total de la capa de café en 10% y repetir el procedimiento anterior. Teniendo en cuenta el impacto de la reducción de altura total de la capa de café en la capacidad estática de secado se considera que el procedimiento anterior es aceptable cuando la reducción total es de máximo 20% la capacidad inicial del secador.

**b. Considerar la variación en la velocidad de giro del rotor del ventilador,** siguiendo el procedimiento mencionado en el ejemplo anterior, utilizando un caudal específico de aire de secado de  $100 m^3 \cdot \text{min}^{-1}$  de c.p.s. Se deben considerar las pérdidas de presión a través del sistema de secado, especialmente a través del intercambiador de calor (Gutiérrez et al. 2012).

**c. Si no son viables las alternativas a y b, se debe reemplazar el ventilador,** solicitando la asesoría de un profesional con conocimientos en secado mecánico del café.

En Cenicafé (Gutiérrez et al., 2012) se desarrolló un programa en Excel que entrega los planos detallados para la construcción de ventiladores centrífugos para secadores de café (Figura 28), considerando la caída de presión a través de cada uno de los componentes del secador: Intercambiador de calor, ductos, compuertas, piso y capa de granos. Los rotores construidos siguiendo esta metodología se pueden balancear dinámicamente en equipos empleados para ruedas de automotores, a muy bajo costo (Figura 29).



**Figura 28.**

Ventiladores centrífugos para secadores mecánicos de café construidos siguiendo la metodología propuesta por Gutiérrez et al. (2012).



**Figura 29.**

Balanceo dinámico de un rotor de un ventilador centrífugo construido siguiendo la metodología propuesta por Gutiérrez et al. (2012).

## Calentamiento del aire en secadores mecánicos

En los secadores mecánicos para café utilizados en Colombia, de capa estática y con volteo de capa, el aire se calienta hasta una temperatura de  $50^\circ\text{C}$ . El tiempo para secarlo hasta humedad del 10% al 12% (base húmeda) varía de 18 a 24 h.

Para calentar el aire se utilizan diferentes combustibles, principalmente cascarilla o cisco del café, carbón mineral (hulla) y gas propano. **Cuando se utilizan combustibles sólidos se emplea un dispositivo, denominado intercambiador de valor,** para transmitir al aire parte de la

energía liberada durante la combustión, sin contaminarlo con los gases y las partículas resultantes. **Cuando se emplea gas propano no se utiliza intercambiador de calor.** En la Tabla 4 se presenta el poder calorífico de algunos combustibles utilizados en el secado del café y de otros productos agrícolas. Se observa que la cascarilla del café y la leña son combustibles importantes energéticamente para el secado, en efecto, por cada 2 kg de cascarilla de café y 2,3 kg de leña se obtiene la energía equivalente a la de 1 kg de carbón hulla (antracita) (Oliveros *et al.*, 2009).

El intercambiador de calor ofrece importante resistencia al flujo del aire, que debe ser considerada en la selección del ventilador adecuado para un determinado secador. Como se observa en la Figura 30, se presenta gran variación en la caída de presión estática a través de intercambiadores utilizados en las fincas, para un determinado valor de caudal de aire de secado.

**En general, los equipos que ofrecen mayor resistencia al flujo del aire presentan mejor aprovechamiento de la energía liberada en la combustión.** Sin embargo, mediante el diseño adecuado del intercambiador de calor es posible obtener alta eficiencia térmica (64%) con caída de presión inferior a la que presenta la capa de granos (Gutiérrez, 2011). De esta forma se aprovecha más eficientemente el combustible utilizado, disminuyendo la potencia del motor requerido para operar el ventilador.

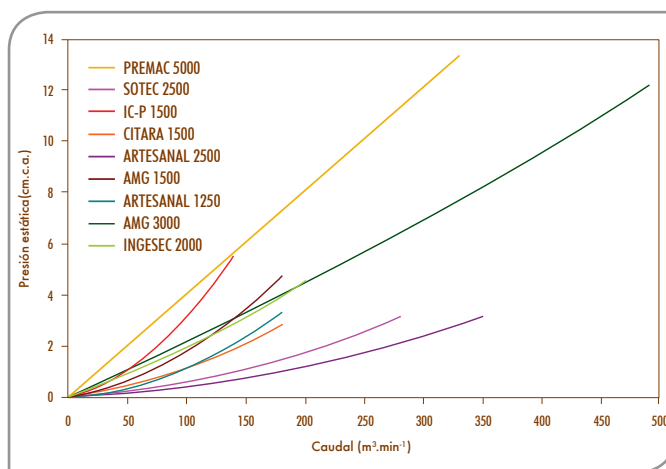
La industria colombiana fabrica intercambiadores de calor para atender necesidades de secado desde 250 kg de c.p.s. (22 @ de c.p.s.) hasta más de 3.000 kg de c.p.s. (250 @ de c.p.s.), que pueden ser utilizados con carbón mineral y cisco de café. Para los equipos de menor capacidad estática se ofrecen intercambiadores de calor con alimentación de combustible por gravedad. Para equipos de capacidad estática media y alta se ofrecen intercambiadores con alimentación por medio

de tornillo sinfín. Estos equipos disponen de tolvas con autonomía de trabajo de más de 6 h. En la Figura 31 se presentan algunos intercambiadores de calor producidos en Colombia.

## Consumo de combustible y costos en el secado del café

El consumo de combustible por unidad de producto seco ( $\text{kg} \cdot @^{-1}$ ) depende principalmente de los siguientes factores:

- Tecnología utilizada, básicamente intercambiador de calor, ventilador y control de temperatura del aire de secado
- Capacidad utilizada del equipo
- La humedad inicial del café, que puede disminuir a valores inferiores al 40% cuando se lleva inicialmente a secadores solares
- Manejo, depende de la experiencia y habilidad del operario



**Figura 30.**

Relaciones de caudal y caída de presión para algunos intercambiadores de calor utilizados en el secado del café en Colombia (Gutiérrez, 2008).

Combustible	Poder Calorífico		Fuente
	$\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$	$\text{kJ} \cdot \text{m}^3$	
Cascarilla de café	17.936		Roa <i>et al.</i> (1999)
Tusa de maíz	20% humedad	15.195	CLAAR II <i>et al.</i> (1981)
	30% humedad	13.348	CLAAR II <i>et al.</i> (1981)
Carbón vegetal	27.450		CLAAR II <i>et al.</i> (1981)
Biogás		17.086	CLAAR II <i>et al.</i> (1981)
Propano	46.350		<a href="http://onsager.unex.es/Apuntes/Termo/Tablas-Tema-3.pdf">http://onsager.unex.es/Apuntes/Termo/Tablas-Tema-3.pdf</a>
Leña - 20% de humedad	15.412		CLAAR II <i>et al.</i> (1981)

**Tabla 4.**

Poder calorífico de combustibles utilizados en el secado del café y de otros productos agrícolas.



**Figura 31.**

Intercambiadores de calor con alimentación mecánica del combustible utilizados en el secado del café. **a.** Utilizando cisco de café; **b.** y **c.** Con carbón mineral granulado.

Los primeros equipos construidos para el secado del café han recibido varias modificaciones, entre ellas, el cambio de la unidad para generar aire caliente, que inicialmente estaba diseñada para utilizar acpm o carbón coque. En algunos equipos también se ha reemplazado el ventilador por centrífugos, generalmente fabricados en talleres locales. Un alto porcentaje de estos equipos se construyen basados en modelos existentes o en conocimientos empíricos, por lo cual, generalmente no entregan el caudal de aire a la presión requerida, ni tampoco permiten el aprovechamiento eficiente del combustible y la energía entregada por el motor. Para el control de la temperatura del aire de secado se utilizan tecnologías simples, basadas en el apagado y encendido del alimentador de combustible al hogar del intercambiador de calor, o temporizadas, que permiten grandes variaciones con relación al valor deseado (50°C) hasta de 6°C, con efecto adverso sobre la calidad del café y el aprovechamiento eficiente de las energías suministradas (química y eléctrica) (Gutiérrez et al., 2012).

En años recientes se ha presentado un aumento en la oferta de equipos para el secado del café, con mejores ventiladores e intercambiadores de calor, y mejores materiales utilizados en su construcción; sin embargo, para el control de la temperatura del aire de secado se continúa utilizando las tecnologías mencionadas anteriormente, con ligeras variaciones en sus componentes.

En la Tabla 5 se presentan valores de consumo específico de combustible ( $\text{kg} \cdot \text{kg}^{-1}$  de c.p.s.) obtenidos en Cenicafé, con tres equipos fabricados en Colombia, utilizados en

el secado del café en las cosechas de mitaca y principal (Oliveros et al., 2009).

### Consideraciones prácticas

*El mejor aprovechamiento energético de un secador de café se logra utilizándolo al máximo de su capacidad estática. Generalmente, esta situación se presenta en los días de mayor flujo de la cosecha, mientras que en los días restantes puede utilizarse menos del 50% de la capacidad instalada, en estas últimas condiciones el ventilador entrega mayor caudal de aire, con mayor requerimiento de combustible para calentarlo hasta una temperatura media de 50°C. Adicionalmente, como lo indican Gutiérrez et al. (2012), el consumo de energía eléctrica (kW.h) también aumenta, alcanzado valores superiores al 50%, con relación al equipo al 100% de su capacidad. En Cenicafé se desarrolló tecnología que permite utilizar el secador con cualquier carga de café y obtener consumos específicos de energía (química y eléctrica) similares al equipo operado al 100% de su capacidad estática (González et al., 2012).*

Combustible	Consumo (kg.@ <sup>-1</sup> de c.p.s.)					
	Intercambiador I		Intercambiador II		Intercambiador III	
	Media	C.V.	Media	C.V.	Media	C.V.
Carbón mineral granulado	3,83	22,83	2,8	23,81		
Cisco de café					4,4	26,4

Tabla 5.

Consumo específico de combustible en secado del café con tres equipos y dos tipos de combustible.

Los intercambiadores de calor son similares en: Las direcciones del flujo de aire y de los gases de combustión, opuestas; la alimentación del combustible, por medio de tornillo sinfín; y el control de la temperatura del aire de secado, mediante un termostato que activa el alimentador cuando está varios grados por debajo del valor medio esperado, hasta 5 °C, y lo desactiva cuando supera el valor esperado, hasta 5 °C (Figuras 32, 33 y 34).

Al utilizar combustibles en el secado del café se contamina el aire, principalmente por la producción de CO<sub>2</sub> y la emisión de partículas (Tabla 6). La mayor emisión de CO<sub>2</sub> se produce cuando se utiliza hulla (antracita) y la menor con gas propano. Sin embargo, con empleo de cascarilla de café se obtienen mejores resultados ambientales, por ser carbono neutral, debido a que la huella neta de carbono es igual a cero.

**El cisco del café es una alternativa importante para el secado del café en Colombia, por su poder calorífico, facilidad de uso con las tecnologías actuales y relativo bajo costo, entre otros.** Por cada 100 kg de c.p.s. se obtienen 18 kg de cisco (Montilla et al., 2008). Considerando una producción anual de café de 12 millones de sacos, cada año se producen en el país 158.049 t de cisco, suficientes para secar 449.000 t de c.p.s. (35,9 millones de arrobas por año).

También puede considerarse la leña del cafeto, es así como por cada hectárea renovada se producen 16 t de madera seca, en una plantación con densidad de 5.000 árboles/ha (Farfán, 1994), que generan la energía equivalente a la obtenida con 13.748 kg de cisco. Esta energía es la requerida en el secado de 3.120 @ de c.p.s., con la tecnología ofrecida actualmente.

Tabla 6.

Producción de CO<sub>2</sub> por empleo de diferentes combustibles en el secado del café (Gutiérrez, 2011).

Combustible	Poder calorífico (kJ.kg <sup>-1</sup> )	Emisión de CO <sub>2</sub> (kg de CO <sub>2</sub> /t de c.p.s.)
Cisco de café	17.936	188,86
GLP	46.350	158,26
Hulla (atracita)	33.440	1265,7

## Consideraciones prácticas

En la estimación del costo de secado se debe tener en cuenta el valor de los equipos, el costo de mantenimiento, la vida útil, los costos del combustible y de la energía utilizada, y el costo de la mano de obra.

## Control de caudal y temperatura de secado

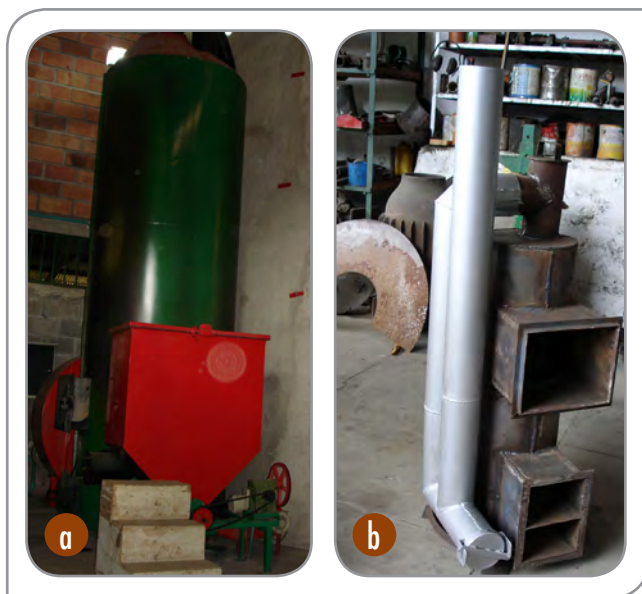
Con el fin de disminuir el consumo de combustible y energía eléctrica durante el secado de cantidades menores a la nominal del secador, González et al. (2010) desarrollaron un sistema de control de temperatura y caudal de aire, que mantiene la temperatura en el valor seleccionado sin importar las condiciones ambientales y el caudal en el valor específico óptimo hallado por Parra et al. (2008) el cual es 100 m<sup>3</sup>.min-t<sup>-1</sup> de café pergamino seco. El sistema fue evaluado para el secado de semilla en la cual se utiliza una temperatura de 38 °C. En esas condiciones se obtuvieron reducciones en el consumo de combustible y energía eléctrica de 27,62% y 84,38%, respectivamente, cuando se utilizó una capa de 20 cm de espesor.

- Este sistema tiene impacto sobre la economía del negocio cafetero porque el costo de combustible y energía eléctrica permanece constante e igual al que se obtiene con la capacidad nominal cuando se secan capas menores.
- El dispositivo de control de caudal y temperatura también tiene impacto positivo sobre la calidad del café** porque para que el secado sea económicamente viable cuando no se tiene control de caudal, los caficultores se ven obligados a esperar tandas de café de varios días con el fin de completar la carga nominal. Sin embargo, esta práctica no es recomendable porque se causan daños irreversibles a la calidad de la bebida. Con el sistema de control se generan los mismos costos operativos con capas menores sin arriesgar la calidad.
- El uso del sistema de control de temperatura y caudal también tiene impacto ecológico positivo porque al disminuir el consumo de combustible se reducen también las emisiones de gases y partículas al ambiente.** El mejor uso de la energía eléctrica que ofrece este sistema tiene también su contribución en aspectos ambientales.



**Figura 32.**

Equipo I. **a.** Intercambiador de calor; **b.** Tolva y alimentador de combustible.



**Figura 33.**

Equipo II. **a.** Vista general; **b.** Vista interna.



**Figura 34.**

Equipo III.

## Medición de la humedad del café en secadores de capa estática

Para decidir la finalización del proceso de secado del café se utilizan métodos empíricos basados en el color y la dureza de las almendras. Estos métodos, en general, no son confiables, tal como se observó en un estudio efectuado por la Federación Nacional de Cafeteros de Colombia (Federacafé, 1984) con 623 muestras de café pergamino obtenidas en igual número de fincas. Se encontró que el 25% de ellas tenían menos del 10% de humedad y el 13% más del 12%, es decir, el 38% de ellas no presentaba el contenido de humedad final exigido en la comercialización, lo cual ocasiona pérdida en la calidad del café y afecta los ingresos del productor (Federacafé, 1984).

Al utilizar estos métodos generalmente el café se seca a niveles de humedad inferiores al 10%, incrementándose el gasto de energía (eléctrica y térmica) y de mano de obra, se afecta la calidad del café y disminuyen los ingresos del productor. En la Tabla 7 se presentan valores de pérdidas debidas a la reducción del contenido de humedad hasta valores del 8,0%.

**Los equipos utilizados para medir la humedad de los granos se clasifican en directos e indirectos.**

**En los medidores directos** se extrae el agua presente en los granos. En Cenicafe se desarrolló un equipo para medir la humedad del café durante el proceso de secado, basado en la evaporación y condensación del agua extraída a una



muestra depositada en un recipiente, cubierta con aceite vegetal y calentado hasta una temperatura de 193°C. El tiempo requerido para determinar la humedad de una muestra es de 20 min. En evaluación realizada en fincas de caficultores se observó precisión de 0,5% en el rango de humedad del 10,4% al 45,8%. Esta tecnología no ha sido utilizada por los caficultores colombianos principalmente por el tiempo requerido para determinar la humedad al café, por ser destructiva, se requiere de tres a cinco muestras de 100 gramos cada una, para determinar la finalización del proceso de secado, y por el relativo alto costo del equipo ofrecido por la industria nacional.

Humedad (%)	Pérdidas por cada 1.000 kg de café lavado
	kilogramos de café pergamino seco
10,0	5,9
9,5	8,8
9,0	11,6
8,5	14,4
8,0	17,5

**Tabla 7.**

Pérdidas por secado del café por debajo del 10% de humedad.

A partir de los excelentes resultados obtenidos con el método Gravimet en secado solar (Oliveros *et al.*, 2009) se diseñó un dispositivo para utilizarlo en un secador mecánico (Figura 35). El dispositivo consta de dos cilindros de PVC. El externo, de 10,16 cm de diámetro nominal (4”) se coloca sobre la malla de la cámara de secado, en posición vertical (Figura 36); al cilindro interno se colocó una malla en un extremo, similar a la empleada en el silo, para retener los granos y permitir el paso del aire, en forma similar a la capa de café. En el cilindro interno se coloca una masa de café de igual altura que la capa de granos del secador, sin impurezas ni granos brocados. Para pesar el café se utiliza una balanza digital con rango de 0 a 5 kg y resolución de 1 g.

El método Gravimet SM fue evaluado inicialmente en Cenicafé (Oliveros *et al.*, 2010), y posteriormente, en fincas de caficultores (Oliveros y Pabón, 2012). En la evaluación en Cenicafé se consideraron cuatro alturas de capa de granos (10, 20, 30 y 40 cm), con 15 ensayos en cada una.

De cada lote de café seco se tomaron nueve muestras a diferente altura de la capa, para determinar la humedad utilizando el método estándar de la estufa (ISO 6673). En la Tabla 8 se presenta el promedio de la humedad obtenida para cada altura de capa con el método estándar de la estufa y la desviación estándar (D.E) correspondiente, y el promedio de la diferencia entre los valores de humedad obtenidos con el método de la estufa y con Gravimet S.M. (error absoluto).

La diferencia entre los contenidos de humedad obtenidos con el método Gravimet SM y la estufa (error absoluto) varió entre 0,6% y 0,8%, con error estándar de 0,11% a 0,15%, respectivamente. El análisis mostró que estos valores no son afectados por la altura de la capa y que las humedades del café obtenidas con el método Gravimet –SM y con el método estándar de la estufa (ISO 6673) son iguales. En 56 de los 60 ensayos realizados (93,3%) el café presentó humedad final en el rango de 10% a 12% (Oliveros *et al.*, 2012).

Teniendo en cuenta los resultados anteriores se adelantó una etapa de validación en fincas, en las cuales el método fue utilizado por las personas encargadas del manejo de los secadores. Inicialmente, se capacitaron los operarios, se entregó un equipo completo (Figura 36), un instructivo en el cual se detallaron los pasos a seguir para utilizar el método Gravimet SM (Anexo 15. Procedimiento Gravimet secado mecánico) y una tabla, en la cual para un determinado peso inicial del café en el receptor, se presenta el peso seco al que debe llegar la muestra de café para que su humedad esté en el 11% (Tabla 9). En la Tabla 10 se presentan los tipos de secadores y altura de capa de café utilizadas en la etapa de validación en algunas fincas.

El promedio del contenido de humedad de los 72 lotes de café secados utilizando Gravimet SM, medidos en el sitio de compra, fue 11,3%, muy cercano al esperado (11,0%), la mediana fue 11,5%. Los valores mínimo y máximo, con un 95% de confianza, fueron 11,2% y 11,5%, respectivamente.

En la etapa de campo se observó que la mayor parte de los equipos de secado presentan deficiencias en el suministro de aire (caudal y presión) y en las tecnologías empleadas para calentar y para controlar la temperatura del aire de

Altura de capa (cm)	Humedad		Error absoluto	
	Promedio (%)	D.E. (%)	Promedio (%)	D.E. (%)
10	10,7	0,5	0,6	0,5
20	11,0	0,5	0,7	0,3
30	10,6	0,7	0,7	0,6
40	10,8	0,7	0,8	0,5

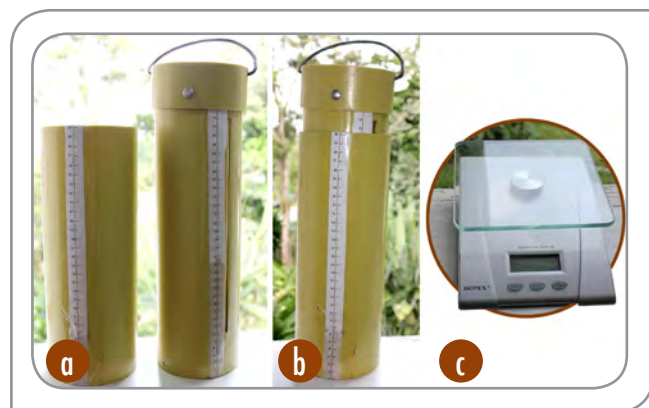
**Tabla 8.**

Promedios de los porcentajes de humedad y errores absolutos para diferentes alturas de capa de café, al utilizar el método Gravimet SM durante el secado en silo.  
D.E.: Desviación estándar



**Figura 35.**

**a.** Ubicación del porta-receptor en la malla de la cámara de secado; **b.** Ubicación del receptor de granos.



**Figura 36.**

Componentes del método Gravimet-SM. **a.** Cilindro externo o porta receptor y cilindro interno receptor de granos; **b.** Cilindros en posición de trabajo; **c.** Balanza digital.

secado. Todavía se utilizan hornillas para quemar coque en combustión directa. Gran parte de estas deficiencias son generadas por los ventiladores utilizados, generalmente contruidos en talleres locales, sin las especificaciones técnicas de diseño y operación, que aseguren la entrega del aire requerido para el secado del café.

Otras deficiencias también son ocasionadas al reemplazar los equipos empleados para calentar el aire, utilizando coque y acpm, entre otros, por unidades para quemar carbón mineral y cisco de café, debido al incremento en la resistencia al paso del aire que se ocasiona con estos nuevos equipos, que puede ser superior a la ofrecida por el café.

También se observó el empleo de malas prácticas en el secado, como mezclas de café con diferentes contenidos de humedad inicial, capas de granos de mayor altura a las de diseño (más de 40 cm) e inadecuada construcción de los cuartos de secado, que contribuyen a incrementar la desuniformidad en el contenido de humedad final del café.

### Consideraciones prácticas

Los resultados obtenidos con el método Gravimet SM en las etapas de evaluación en Cenicafé, y validación en fincas de caficultores, indican que éste es útil para medir la humedad del café durante el proceso de secado en los secadores utilizados y para definir el momento de finalizarlo para obtener café en el rango del 10% al 12%. Los mejores resultados se obtienen cuando se utiliza en secadores que disponen del caudal de aire recomendado para café, con cualquier altura de capa,  $100 \text{ m}^3 \cdot \text{min}^{-1}$  de c.p.s. (Parra et al., 2008), con tecnología apropiada para el control de la temperatura de secado, que para café debe ser  $50 \pm 2^\circ \text{C}$ , y cuando se aplican buenas prácticas en el proceso de secado.

## Secado combinado

En fincas que utilizan secado mecánico, con frecuencia disponen también de secadores solares que emplean para arear el café, especialmente en los días de menor flujo de cosecha, disminuyendo su contenido de humedad a valores entre 30% y 40%. Luego, el café es llevado al secador, obteniendo excelentes resultados como: Menor tiempo

de secado, ahorro de combustible y energía eléctrica y, principalmente, un producto con mayor uniformidad de contenido de humedad.

En la Tabla 11 se presentan resultados obtenidos en Cenicafé para el secado combinado (Oliveros et al., 2009),

utilizando un secador tipo túnel solar y un silo de tres cámaras, con capacidad estática de 93,8 kg de c.p.s. (7,5 @ de c.p.s.). Cuando la humedad del café al final del presecado solar está en el rango del 30% al 45%, el tiempo de secado en el silo varía entre 8 y 12 h, por lo cual el café debe ser trasladado de una cámara a otra entre 2,7 h y 4,0 h.

Inicial	Final	Inicial	Final	Inicial	Final	Inicial	Final	Inicial	Final	Inicial	Final	Inicial	Final
500	264	810	428	1.120	591	1.430	755	1.740	919	2.050	1.083	2.360	1.246
505	267	820	433	1.130	597	1.440	760	1.750	924	2.060	1.088	2.370	1.252
510	269	830	438	1.140	602	1.450	766	1.760	929	2.070	1.093	2.380	1.257
520	275	840	444	1.150	607	1.460	771	1.770	935	2.080	1.098	2.390	1.262
530	280	850	449	1.160	613	1.470	776	1.780	940	2.090	1.104	2.400	1.267
540	285	860	454	1.170	618	1.480	782	1.790	945	2.100	1.109	2.410	1.273
550	290	870	459	1.180	623	1.490	787	1.800	951	2.110	1.114	2.420	1.278
560	296	880	465	1.190	628	1.500	792	1.810	956	2.120	1.120	2.430	1.283
570	301	890	470	1.200	634	1.510	797	1.820	961	2.130	1.125	2.440	1.289
580	306	900	475	1.210	639	1.520	803	1.830	966	2.140	1.130	2.450	1.294
590	312	910	481	1.220	644	1.530	808	1.840	972	2.150	1.135	2.460	1.299
600	317	920	486	1.230	650	1.540	813	1.850	977	2.160	1.141	2.470	1.304
610	322	930	491	1.240	655	1.550	819	1.860	982	2.170	1.146	2.480	1.310
620	327	940	496	1.250	660	1.560	824	1.870	988	2.180	1.151	2.490	1.315
630	333	950	502	1.260	665	1.570	829	1.880	993	2.190	1.157	2.500	1.320
640	338	960	507	1.270	671	1.580	834	1.890	998	2.200	1.162	2.510	1.326
650	343	970	512	1.280	676	1.590	840	1.900	1.003	2.210	1.167	2.520	1.331
660	349	980	518	1.290	681	1.600	845	1.910	1.009	2.220	1.172	2.530	1.336
670	354	990	523	1.300	687	1.610	850	1.920	1.014	2.230	1.178	2.540	1.341
680	359	1.000	528	1.310	692	1.620	856	1.930	1.019	2.240	1.183	2.550	1.347
690	364	1.010	533	1.320	697	1.630	861	1.940	1.024	2.250	1.188	2.560	1.352
700	370	1.020	539	1.330	702	1.640	866	1.950	1.030	2.260	1.193	2.570	1.357
710	375	1.030	544	1.340	708	1.650	871	1.960	1.035	2.270	1.199	2.580	1.362
720	380	1.040	549	1.350	713	1.660	877	1.970	1.040	2.280	1.204	2.590	1.368
730	386	1.050	554	1.360	718	1.670	882	1.980	1.046	2.290	1.209	2.600	1.373
740	391	1.060	560	1.370	723	1.680	887	1.990	1.051	2.300	1.215	2.610	1.378
750	396	1.070	565	1.380	729	1.690	892	2.000	1.056	2.310	1.220	2.620	1.384
760	401	1.080	570	1.390	734	1.700	898	2.010	1.061	2.320	1.225	2.630	1.389
780	412	1.090	576	1.400	739	1.710	903	2.020	1.067	2.330	1.230	2.640	1.394
790	417	1.100	581	1.410	745	1.720	908	2.030	1.072	2.340	1.236	2.650	1.399
800	422	1.110	586	1.420	750	1.730	914	2.040	1.077	2.350	1.241	2.660	1.405

Tabla 9.

Peso inicial y final del café en el receptor, en gramos, para alcanzar humedad del 11%.

Finca	Tipo de secador	Capacidad nominal	Altura de la capa de café
		(kg de café seco)	(cm)
1	Capa estática (tipo Cenicafé)	2.250	42
2	Capa estática (tipo Cenicafé)	3.000	27
3	Con volteo de capa	88	34
4	Con volteo de capa	125	35
5	Con volteo de capa	125	25
6	Capa estática (tipo Cenicafé)	563	22
7	Con volteo de capa	94	24
8	Capa estática (tipo Cenicafé)	1.750	23
9	Capa estática (tipo Cenicafé)	563	23
10	Con volteo de capa	125	17
11	Capa estática (tipo Cenicafé)	563	20
12	Capa estática (tipo Cenicafé)	563	29
13	Capa estática (tipo Cenicafé)	563	29
14	Con volteo de capa	188	22
15	Capa estática (tipo Cenicafé)	1.250	28

Tabla 10.

Secadores utilizados en la validación del método Gravimet SM.

Tabla 11.

Resultados del secado combinado del café, utilizando un secador tipo túnel solar y un silo de tres cámaras, con capacidad estática para 93,8 kg de c.p.s. (7,5 @).

Ensayo	Lote	Secado Solar			Secado en Silo				
		Humedad inicial (%)	Humedad final (%)	Tiempo (días)	Tiempo secado (h)	Humedad final (%)		Consumo combustible (kg.@ <sup>-1</sup> de c.p.s.)	Reducción tiempo secado (%)
						Media (%)	C.V. (%)		
1	1	53	31,4	1	7,5	10,8	2,18	2,1	58,3
	2	53	31,4	2	8,0	10,7	2,18	2,1	55,6
	3	53	21,0	2	6,0	10,6	1,32	2,1	66,7
2	1	53	48,4	1	14,0	10,3	0,88	2,8	22,4
	2	53	44,7	2	13,0	11,9	1,18	2,8	27,8
	3	53	39,3	2	12,0	11,3	1,18	2,8	33,3

## Recomendaciones prácticas

**Para obtener mejores resultados en el secado solar del café se aconseja tener en cuenta las siguientes recomendaciones:**

- Lleve al secador café bien lavado, limpio y bien escurrido, dejándolo al menos una hora en el tanque al finalizar el lavado.
- Deposite el café sobre el piso del secador aprovechando al máximo el área de secado disponible, para permitir su oreado rápido. Al día siguiente recoja el café formando una capa de máximo 2 cm de altura.
- Evite el contacto del café con la lluvia. Ante la inminencia de éstas, cierre parcialmente las compuertas, permitiendo la circulación de aire a través del secador. Si dispone de ventilador extractor, puede cerrar un poco más las compuertas, aunque no totalmente.
- Revuelva el café diariamente, por lo menos cuatro veces, procurando hacerlo en direcciones diferentes. Realice esta labor con cuidado, para evitar daños en la cubierta plástica. No pise el café ni permita que animales de la finca lo hagan.
- Evite la mezcla de lotes de café de diferentes días. Utilice un listón de madera para separar el café de cada día.
- Si necesita retirar el café del secador durante la noche para dejarlo en el interior de la casa, por seguridad especialmente, colóquelo en un lugar limpio, sobre estibas de madera, donde no se guarden otros productos que puedan contaminar al café.
- Utilice el método Gravimet para determinar el momento para detener el secado. Si el café presenta menos del 20%, pese la muestra dos veces al día, al medio día y al finalizar el día, y relaciónelo con la humedad del café. Si de acuerdo con el método, el café está entre el 10% y el 12% de humedad, tome una muestra, tríllela y observe el color de las almendras para verificar que esté con la humedad deseada.
- Cuando el café esté con la humedad deseada retírelo del secador y déjelo enfriar en un lugar protegido de las lluvias, antes de empacarlo.
- Para empacar el café utilice sacos limpios, en buen estado y que no hayan contenido previamente alguna clase de agroquímico, para evitar la contaminación del café.
- Almacene el café en un lugar limpio, sobre estibas, libre de humedad, donde sólo se tenga café.
- Por las condiciones climáticas del lugar donde se almacene el café en la finca, el producto puede ganar humedad ocasionando problemas en la venta. Para evitar que esto suceda, lleve el café al sitio de compra lo antes posible.
- Mantenga limpia la cubierta plástica del secador. Utilice un paño suave, solamente con agua limpia, no use detergentes porque acortan la vida útil del plástico.

**Para obtener mejores resultados con los secadores mecánicos de café se recomienda tener en cuenta:**

- La capacidad de secado a instalar en la finca se determina considerando la producción en el día de mayor flujo de cosecha o día “pico” y la posibilidad de utilizar el secado solar, para arear el café.
- Al seleccionar la tecnología más apropiada se debe analizar la oferta existente, el costo y el servicio de postventa. También la disponibilidad de energía eléctrica en la finca y de combustible en la región y su costo.
- Con el equipo seleccionado se debe lograr que al utilizarlo al 100% de su capacidad, el caudal específico de aire de secado sea de  $100 \text{ m}^3 \cdot \text{min}^{-1}$  de c.p.s.  $\pm 10 \text{ m}^3 \cdot \text{min}^{-1}$  de c.p.s. La temperatura del aire de secado siempre debe ser de  $50^\circ\text{C}$  con variaciones máximas respecto a este valor de  $\pm 2^\circ\text{C}$ .
- La calidad de los materiales y la manufactura del equipo se deben tener en cuenta al momento de seleccionarlo. Con materiales adecuados, la cámara de combustión del equipo puede durar al menos 6 años sin presentar fisuras o grietas, que permitan el paso de gases al café y su posterior contaminación.
- Con secadores de tres cámaras de secado, con volteo manual o agitación mecánica de las capas, se obtiene café con uniformidad aceptable para las condiciones colombianas.
- Desde el punto de vista económico y ambiental, es más conveniente utilizar el cisco o cascarilla del café que otras opciones como carbón mineral.
- No se debe depositar más café en los secadores que el máximo establecido por el fabricante, ya que afecta el funcionamiento del equipo ocasionando mayores tiempos de secado y mayor desuniformidad de la humedad del café seco.
- Siempre que sea posible se debe utilizar el secado solar para arear el café y llevarlo luego al secador o para secarlo hasta la humedad del 10% al 12%. Cuando se seque café solamente en el silo, se debe dejar escurrir en el tanque el mayor tiempo que sea posible, 1 a 2 h, para retirar gran parte del agua adherida a su superficie.
- Para obtener café con la humedad del 10% al 12%, puede utilizar el método Gravimet SM, siguiendo las recomendaciones para su aplicación. Los mejores resultados se obtienen en secadores con adecuado suministro de aire de secado y buen control de la temperatura.

## Literatura citada

- ARCHILA G., M. Análisis bacteriológico de aguas residuales de beneficio de café. Bogotá : Universidad de los Andes. Facultad de Microbiología, 1985. 40 p. Tesis: Microbióloga.
- BORÉM M., F.; RODRÍGUEZ R., C.H. Secagem do café. p. 214-215. En: Borém M., F.;Rodríguez R., C.H.; Tavares Andrade., E. Pós-colehlita do café. Lavras : Universidade Federal de Lavras, 2008. 631 p.
- CLAAR II., P.W.; BUCHELE, W.F. Crop: Residue fired furnace for drying grain. Michigan : ASAE, 1981. 450 p.
- FARFÁN V., F. El zoqueo del café conserva el bosque nativo. Chinchiná : CENICAFÉ, 1994. 4 p. (Avances Técnicos No. 209).
- FEDERACAFÉ. Análisis de la encuesta sobre beneficio y calidades de café. Chinchiná : CENICAFÉ, 1984. 160 p.
- FEDERACAFÉ. Análisis de la encuesta sobre beneficio y calidades de café. Chinchiná : CENICAFÉ, 1984. 160 p.
- GONZÁLEZ S., C.A. Control de temperatura y caudal de aire para la optimización del secado mecánico del café. Cali: Universidad del Valle. Escuela de ingeniería mecánica, 2008. 86 p. Tesis: Ingeniero mecánico.
- GONZÁLEZ S., C.A.; SANZ U., J.R. Control de caudal y temperatura de aire en el secado mecánico de café. Cenicafé 61(4):281-296. 2010.
- GUTIÉRREZ F., J.M. Desarrollo de un secador mecánico de café con empleo de alcohol carburante obtenido del proceso de beneficio húmedo. Chinchiná : CENICAFÉ, 2011. 44 p.
- GUTIÉRREZ F., J.M. Metodología para la construcción de ventiladores centrífugos para secado mecánico de café en talleres rurales. Pereira : Universidad tecnológica de Pereira. Facultad de ingeniería mecánica, 2008. 122 p. Tesis: Ingeniero mecánico.
- GUTIÉRREZ F., J.M.; SANZ U., J.R. Ventiladores para secadores de café: Diagnóstico, diseño y construcción económica de ventiladores centrífugos. Chinchiná : CENICAFÉ, 2012. 56 p.
- HENDERSON, S.M.; PERRY, R.L. Agricultural process engineering. Connecticut : The AVI publishing, 1976. 442 p.
- IDEAM. Atlas de radiación solar de Colombia. [En línea]. Bogotá : IDEAM, (s.f.). Disponible en internet: <https://documentacion.ideam.gov.co/openbiblio/Bvirtual/019649/1-Preliminares.pdf> Consultado el 17 de enero de 2013.
- IDEAM. Atlas de radiación solar de Colombia. [En línea]. Bogotá : IDEAM, (s.f.). Disponible en internet: <https://documentacion.ideam.gov.co/openbiblio/Bvirtual/019649/1-Preliminares.pdf> Consultado el 17 de enero de 2013.
- IDEAM. Mapas de brillo solar. [En línea]. Bogotá : IDEAM, (s.f.). Disponible en internet: <https://documentacion.ideam.gov.co/openbiblio/Bvirtual/019649/3-BrilloSolar.pdf>. Consultado el 17 de enero de 2013.
- JARAMILLO R., A. Clima andino y café en Colombia. Chinchiná : CENICAFÉ, 2005. 192 p.
- JARAMILLO R., A.; ARCILA P., J. Variabilidad climática en la zona cafetera colombiana asociada al evento de La Niña y su efecto en la caficultura. Chinchiná : CENICAFÉ, 2009. 8 p. (Avances Técnicos No. 389).
- MONTILLA P., J.; ARCILA P., J. Caracterización de algunas propiedades físicas y factores de conversión del café durante el proceso de beneficio húmedo tradicional. Cenicafé 59(2):120-142. 2008.
- OLIVEROS T., C.E.; ROA M., G. Evaluación de dos cubiertas plásticas en el secador solar del café. p. 30-47. En: CENICAFÉ. Informe anual de actividades 2003 - 2004. Chinchiná : CENICAFÉ, 2004. 47 p.
- OLIVEROS T., C.E.; ROA M., G. Medidor rústico para café pergamino (CENICAFÉ-MH-2). Cenicafé 40(2):40-53. 1989.
- OLIVEROS T., C.E.; ROA M., G. Método para el monitoreo de la humedad del café en secadores solares. p. 29-32. En: CENICAFÉ. Informe anual de actividades 2000 - 2001. Chinchiná : CENICAFÉ, 2001. 32 p.
- OLIVEROS T., C.E.; ROA M., G. Pérdidas de presión por el paso del aire a través de café pergamino variedad Caturra, dispuesto a granel. Cenicafé 37(1):23-39. 1986.
- OLIVEROS T., C.E.; ROA M., G.; LÓPEZ P., U. Nuevos rastrillos para revolver café en proceso de secado al sol. Chinchiná : CENICAFÉ, 2006. 4 p. (Avances Técnicos No. 346).
- OLIVEROS T., C.E.; ROA M., G.; LÓPEZ V., L. Determinación del contenido de humedad del café durante el secado en silos. Cenicafé 61(2):108-118. 2010.
- OLIVEROS T., C.E.; ROA M., G.; PABÓN U., J.P. Validación en fincas de una metodología para la medición de la humedad del café durante el secado mecánico : Gravimet SM IPA. Chinchiná : CENICAFÉ, 2013. 27 p.

- OLIVEROS T., C.E.; ROA M., G.; PEÑUELA M., A.E. *Controle la humedad del café en el secado solar, utilizando el método GRAVIMET.* Chinchiná : CENICAFÉ, 2009. 8 p. (Avances Técnicos No. 387).
- OLIVEROS T., C.E.; RAMÍREZ G., C.A.; SANZ U., J.R.; PEÑUELA M., A.E. *Secador Parabólico Mejorado.* Chinchiná: CENICAFÉ, 2008, 8p. (Avances Técnicos No. 376)
- OLIVEROS T., C.E.; RAMÍREZ G., C.A.; SANZ U., J.R.; PEÑUELA M., A.E. *Secador solar de túnel para cafépergamino.* Chinchiná: CENICAFÉ, 2006, 8p. (Avances Técnicos No. 353)
- PARDO, E.; RAMOS, A.J.; SANCHIS, V.; MARÍN, S. *Modelling of effects of water activity and temperature on germination and growth of ochratoxigenic isolates of Aspergillus ochraceus on a green coffee-based medium.* *International journal of food microbiology* 98:1-9. 2005.
- PARRA C., A.; ROA M., G. *SECAFÉ: Recomendaciones para el manejo eficiente de los secadores mecánicos de café pergamino.* *Revista brasileira de engenharia agrícola e ambiental* 12(4):428-434. 2008.
- PUERTA Q., G.I. *Quality and safety of coffee processed by the wet method and dried in solar dryers.* Salvador [Brasil]: *Workshop improvement of coffee quality through prevention of mould growth*, 2005. 1 p.
- RAMÍREZ, C.A.; OLIVEROS T., C.E. *Construya el secador solar parabólico.* Chinchiná : CENICAFÉ, 2003. 8 p. (Avances Técnicos No. 305).
- ROA M., G. *Beneficio ecológico del café.* Chinchiná : CENICAFÉ, 1999. 300 p.
- ROA M., G.; OLIVEROS T., C.E. *Beneficio ecológico del café.* Chinchiná : CENICAFÉ, 1999. 300 p.
- SUÁREZ Q., M.L.; GONZÁLEZ, R.O.; BAREL, M.; GUYOT, B.; SCHORR G.S.; GUIRAUD, J.P. *Effect of chemical and environmental factors on Aspergillus ochraceus growth and toxigenesis in green coffee.* *Food microbiology* 21:629-634. 2004.
- TREJOS R., R.; ROA M., G. *Humedad de equilibrio y calor latente de vaporización del café pergamino y del café verde.* *Cenicafé* 40(1):5-15. 1989.
- URBANO, G.R.; TANIWAKI, M.H. *Productions of ochratoxin A in green coffee: Influence of water activity and temperature.* *Guaruja [Brasil] : International iupac symposium on mycotoxins and phycotoxins*, 2000. 200 p.