Federación Nacional de Cafeteros de Colombia

Cenicafé

Optimización operacional de secadores mecánicos para café pergamino

Alfonso Parra Coronado
Gonzalo Roa Mejía
Carlos Eugenio Oliveros Tascón
Juan Rodrigo Sanz Uribe

Ministro de Hacienda y Crédito Público
Mauricio Cárdenas Santamaría

Ministro de Agricultura y Desarrollo Rural
Juan Guillermo Zuluaga Cardona

Ministra de Comercio, Industria y Turismo
María Ximena Gutiérrez B.

Director del Departamento Nacional de Planeación

Luis Fernando Mejía

Representante del Gobierno en Asuntos Cafeteros
Nicolás Pérez Marulanda

COMITÉ NACIONAL

Período 1º enero/2015 - diciembre 31/2018
José Fernando Montoya Ortega
José Alirio Barreto Buitrago
Eugenio Vélez Uribe
Danilo Reinaldo Vivas Ramos
Pedro Gonzalo Carrillo Urariyu
Javier Bohórquez Bohórquez
Octavio Oliveros Collazos
Edilberto Rafael Álvarez Pineda
Jesús Armando Benavides Portilla
Alfredo Yáñez Carvajal
Carlos Alberto Cardona Cardona
Alejandro Corrales Escobar
Jorge Julián Santos Orduña
Luis Javier Trujillo Buitrago
Camilo Restrepo Osorio

Gerente General
ROBERTO VÉLEZ VALLEJO

Gerente Administrativo
CARLOS ALBERTO GONZÁLEZ ARBOLEDA

Gerente Financiero
JUAN CAMILO BECERRA BOTERO

Gerente Comercial
MARIO EDUARDO VEGA ROA (E)

Gerente Técnico
HERNANDO DUQUE ORREGO

Director Investigación Científica y Tecnológica

ÁLVARO LEÓN GAITÁN BUSTAMANTE

Comité Editorial Cenicafé

Álvaro Gaitán B.
Ph.D. Microbiólogo. Director, Cenicafé

Pablo Benavides M.
Ph.D. Ing. Agrónomo. Entomología, Cenicafé

Juan Rodrigo Sanz U.
Ph.D. Ing. Mecánico. Ingeniería Agrícola, Cenicafé

Carmenza Esther Góngora B.
Ph.D. Microbióloga. Entomología, Cenicafé

José Ricardo Acuña Z.
Ph.D. Biólogo. Mejoramiento Genético, Cenicafé

Siavosh Sadeghian Kh.
Ph.D. Ing. Agrónomo. Suelos, Cenicafé

Sandra Milena Marín L.
M.Sc. Ing. Agrónomo. Divulgación y Transferencia, Cenicafé

ISBN 978-958-8490-19-9
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.

© FNC - Cenicafé - 2017

Optimización operacional de secadores mecánicos para café pergamino

Alfonso Parra Coronado*
Gonzalo Roa Mejía**
Carlos Eugenio Oliveros Tascón***
Juan Rodrigo Sanz Uribe***

* Profesor Titular. Departamento de Ingeniería Civil y Agrícola, Facultad de Ingeniería Universidad Nacional de Colombia, Sede Bogotá D.C.

** Investigador Principal. Disciplina de Ingeniería Agrícola. Centro Nacional de Investigaciones de Café, Cenicafé. Manizales, Caldas, Colombia. (Hasta junio de 2004).

*** Investigador Principal e Investigador Científico III. Disciplina de Poscosecha. Centro Nacional de Investigaciones de Café, Cenicafé. Manizales, Caldas, Colombia

Prólogo

Cenicafé desarrolló el Silo Secador Cenicafé que consta de dos cámaras o cuartos sencillos, donde se colocan sobre mallas metálicas perforadas capas de café pergamino húmedo, que normalmente varían entre 20 a 40 cm de espesor.

El largo y el ancho de las cámaras son variables y atienden las necesidades de cualquier productor de café. Las dos cámaras están comunicadas por ventanas con compuertas a un túnel, del cual proviene el aire caliente forzado por el ventilador, y así mismo, se conectan entre sí y con el exterior para la salida del aire húmedo. La posición de compuertas permite que cada cámara con café pueda servir como cámara de secado o como cámara de pre-secado, utilizando en este último caso aire con capacidad de secado. Las compuertas también sirven para invertir la dirección de los caudales de aire en las capas de café y conseguir la uniformización de la humedad del café. Para su construcción se utilizan ladrillos, cemento y mano de obra local. Los elementos accesorios como el ventilador, el sistema de calentamiento del aire, las compuertas y el piso metálico perforado son adquiridos en talleres que se encuentran por toda Colombia.

Con este desarrollo, realizado en 1974, se cambió la historia del secado mecánico del café en Colombia, debido a que se dejaron de utilizar los únicos secadores que existían, tipo Guardiola, inventados en Centro-América en 1869, y comercializados inicialmente por firmas inglesas por todo el mundo cafetero. Éstos son secadores de tambores rotatorios metálicos, que giran a muy bajas rotaciones y se fabrican de todos los tamaños, según los requerimientos de las fincas. En este secador el aire caliente proviene del ventilador y de un generador de aire caliente, y es conducido por un tubo perforado concéntrico con el eje del tambor, es así como el aire atraviesa radialmente el cilindro secador y encuentra el grano de café en su camino, entregando parte de su energía sensible

y transportando la humedad desprendida del café al medio ambiente al atravesar el cilindro exterior que también es perforado. El café es colocado inicialmente dentro del cilindro, sin llenarlo completamente, de forma que al girar el tambor y ayudado por unos cangilones incrustados en sus paredes internas, levantan el café y lo dejan caer desde la altura máxima para que los granos y el aire caliente estén en contacto.

Desde finales del siglo XIX, los secadores tipo Guardiola fueron utilizados para secar café y hasta hoy son los secadores preferidos por muchos países, tanto para el café pergamino procesado por la vía húmeda como también para el café en fruto procesado por la vía seca. El mejor atributo por el cual es preferido este tipo de secador es por la buena uniformidad de la humedad final del café; sin embargo, fuera de este atributo no presenta otras grandes ventajas, por el contrario es un secador de muy alta inversión, de difícil mantenimiento y presenta una eficiencia térmica muy baja, porque el aire que sale al medio ambiente contiene mucha capacidad de secado, principalmente al final del proceso, que en el caso del café, es muy prolongado.

“Con el Silo Secador Cenicafé, se cambió la historia del secado mecánico del café en Colombia”

Colombia es un país de excepción en secado mecánico de café porque dejó de utilizar el secador tipo Guardiola (dinámico) y adoptó generalizadamente el Silo secador Cenicafé (capa estática), desde hace más de 38 años. La Federación Nacional de Cafeteros de Colombia aprobó en ese entonces el nuevo aporte de Cenicafé. A lo largo del tiempo el modelo original del Silo Secador Cenicafé ha sido modificado para hacerlo más práctico, más económico y de mayor capacidad dinámica, pero su sistema básico de secar el café en capas estáticas, con inversiones de la dirección del aire para uniformizar el contenido de humedad final se ha conservado fielmente.

Con este cambio de la tecnología de secado se logró satisfacer en gran medida al caficultor. El costo del secado del café pergamino en Colombia disminuyó sustancialmente, por la reducción de la inversión inicial en el secador y porque mejoró sustancialmente la eficiencia térmica, o sea mejoró el aprovechamiento de la energía sensible del aire caliente antes de ser entregado al aire ambiente.

En muchas fincas y en centrales de beneficio, por varios años, se comprobó que cuando se utilizaban los caudales del aire mínimos recomendados, que depen den de la cantidad de café con que se carga el secador, se manejaban bien las inversiones del sentido del aire, no se sobrepasaban las temperaturas recomendadas y se lograba efectivamente un café de muy buena calidad, capaz de cumplir con las rigurosas exigencias por parte de los compradores del café, tipo Federación. Pero también se detectó que era frecuente y en cantidades apreciables, que a la hora de las ventas se ofrecían cafés con humedades por fuera del rango requerido por la norma de compra (entre el 10% y el 12%). Normalmente, los cafés que no cumplían las exigencias estaban más húmedos y eran devueltos a los agricultores para concluir su secado y disminuir las diferencias de humedad. La causa de estos problemas la ocasionaba principalmente el uso de caudales de aire insuficientes por el funcionamiento anormal de los ventiladores que se dañaban debido a su precaria construcción o por ser mal seleccionados, o por el exceso de altura de las capas de café, o por uso de temperaturas por encima de los valores recomendados, que originan diferencias de humedades y otras formas de conducir mal el proceso del secado.

Es así como estos temas fueron tenidos en cuenta con la mayor prioridad para la preparación de los técnicos de la Federación de Cafeteros y los encargados de manejar los silos-secadores. Sin embargo, a pesar de lograr disminuir los problemas, todavía continúan ocurriendo, por una razón simple, y es que el secado de café en capas estáticas, que le permite obtener a los caficultores colombianos muchas ventajas económicas, es también de más difícil manejo que otros secadores mecánicos, como el tipo Guardiola.

En efecto, de acuerdo a las leyes físicas que rigen el fenómeno de secado, el proceso se inicia creando desuniformidades de humedad en las capas de café, y solamente mediante los buenos manejos recomendados para cada tipo de secador es posible disminuir esas diferencias paulatinamente, hasta que al final del proceso se logran obtener los valores de humedad exigidos. Por tanto, es necesario conocer bien cada tipo de secador, para detectar cuando está funcionando mal y qué debe hacerse para corregir los problemas del secador y/o de su operación. Lo más oportuno, para todos los casos, es que siempre se consigue la solución mediante el seguimiento de los procedimientos esenciales, sencillos pero necesarios, ya indicados.

Son dos los objetivos principales del presente libro, como bien lo indica su nombre: Optimización Operacional de Secadores Mecánicos para Café Pergamino.

El primer objetivo, proviene de la utilización de tecnologías de simulación matemática aplicadas al secado del café pergamino colombiano, desarrolladas en forma

continua en Cenicafé durante 20 años, con la ayuda de muchas universidades colombianas y en especial por el programa de Ingeniería Agrícola de la Universidad Nacional de Bogotá. Los algoritmos fueron instruidos para presentar las recomendaciones precisas de cómo deben manejarse los secadores de café, para cada una de las diferentes versiones que hoy existen en Colombia, de la manera que se operen en su forma más eficiente posible, tanto mecánica como térmicamente y siempre conservando la mejor calidad posible del café seco, incluyendo la uniformidad de la humedad, al menor costo. Para lograr estas recomendaciones se desarrolló una tecnología especial consistente en: 1) seleccionar los mejores modelos matemáticos existentes 2) obtener todas las propiedades físicas necesarias para el correcto modelamiento del secado del café pergamino para las variedades colombianas, 3) comprobar el correcto funcionamiento de los modelos matemáticos comparando sus predicciones con los resultados de campo, provenientes del secado experimental del café pergamino en todos los tipos de secadores, y 4) aplicar los modelos matemáticos de secado de acuerdo a las características físicas de cada uno de los secadores, para obtener en forma sistemática las recomendaciones ya anotadas.

El segundo objetivo, presentado en el último capítulo del libro, es una forma de facilitar la adopción de todas las recomendaciones presentadas en el primer objetivo y disminuir, aún más, los costos de secado, por el menor consumo de la energía eléctrica del ventilador, principalmente cuando se cargan los secadores con cantidades de café inferiores a su máxima capacidad, lo que es una práctica frecuente y muchas veces necesaria para evitar el deterioro del café, al inicio y final de las cosechas. Además, se presenta la solución al control de la temperatura del aire de secado, manteniéndola en su valor recomendado durante todo el proceso aún en las bajas temperaturas nocturnas y en las altas diurnas. Para esto se desarrolló un sistema de control de tecnología adaptada en Cenicafé para las características del café pergamino, para cualquier tipo de secado en capas fijas. Las lecturas por medio de sensores de temperatura y del caudal del aire (calculado por el valor de la pérdida de presión del aire en las capas de café) son analizados segundo a segundo por componentes electrónicos, para que cuando los valores leídos sean los valores pre-fijados, los motores que comandan el calentador del aire y el ventilador principal del aire varíen sus velocidades, aumentándolas o disminuyéndolas, para que el secado continúe en su rumbo correcto. Lo anterior es válido aun en el caso de que el secador se haya cargado con cualquier cantidad de café, incluyendo capas de solo 10 cm de espesor. En este último caso, el ahorro de la energía eléctrica del ventilador es ocho veces menor que lo que se gastaría con uno equipo convencional, sin su controlador moderno, como es el caso de todos los secadores de café existentes en Colombia. Optimizando de esta forma las condiciones de operación de los silos secadores existentes, se comprobará, ahora con muchos más beneficios de calidad y económicos, que fue muy acertada la decisión de la Federación Nacional de Cafeteros de Colombia, tomada en 1974, de sustituir las Guardiolas con los Silos-Secadores de capa fija desarrollados por su Centro de Investigación, Cenicafé.

Introducción

En el proceso de beneficio húmedo utilizado en Colombia y en otros países productores, se obtiene café pergamino lavado con un promedio de humedad de 53% en base húmeda-b.h. (17), retirando a los frutos dos estructuras que cubren los granos, el epicarpio o pulpa y el mesocarpio o mucílago, que representan el 44,75% y 16,06% en peso fresco del fruto (21), respectivamente.

Para conservar la calidad del café debe iniciarse el proceso de secado inmediatamente. Cuando el café pergamino lavado se deja por más de 48 h con la humedad inicial por retraso en el proceso de secado o cuando se almacena con contenidos de humedad superiores al 12% b.h. (debido a un proceso de secado deficiente), el riesgo de ser atacado por hongos y contaminado con micotoxinas es muy alto. La contaminación con hongos (mohos) y/o OTA[1] (7), hace que el grano pierda su calidad e inocuidad, ocasionando su rechazo en los mercados nacionales e internacionales, lo cual afecta los ingresos de los caficultores y del país.

En consideración a lo anterior, se plantea como principal tecnología, la más viable técnica y económicamente, el adecuado y oportuno proceso de secado de los granos, para lograr disminuir su contenido de humedad a niveles del 10% al 12%, que permita su almacenamiento por períodos prolongados.

En Colombia se utilizan diferentes sistemas de secado solar y secadores mecánicos provistos con ventiladores para forzar el aire a través de la capa de café. Los secadores solares son empleados como

[1] Ochratoxina A (OTA)", es una toxina producida por ciertos hongos en el grano, cuando éste es sometido a malas prácticas en el beneficio y secado, principalmente. La OTA es una sustancia carcinógena con potencial nefrotóxico (puede producir toxicidad en los tejidos renales), razón por la cual, muchos países importadores han empezado a establecer límites máximos permisibles de esta sustancia en los granos de café (5 ppb en Estados Unidos), con el fin de proteger la salud de los consumidores

única opción, principalmente en fincas con una producción anual inferior a 3.500 kg de café seco. También se utiliza el secado solar en fincas de mayor producción en días de menor flujo de cosecha. Para el secado solar, Cenicafé ha desarrollado tecnologías de relativo bajo costo, fáciles de construir y de operar, que se utilizan exitosamente en gran parte de las zonas cafeteras. Entre los secadores solares más utilizados en Colombia se tiene el secador parabólico que se presenta en la Figura 1 (32, 34), y el secador tipo túnel en la Figura 2 (24).

El secado natural se realiza por convección libre, aprovechando la energía natural del aire ambiente y la radiación solar que incide sobre la superficie de los granos, en capas de café con una altura máxima de 2,5 cm, que al ser mezclados durante el día y al ser recogidos por la tarde, con la gran mayoría de los que no reciben la radiación y convección, se logra la uniformidad deseada y la mayor eficiencia energética del proceso global del secado solar. En una capa de café de 2,5 cm de altura, el área que recibe radiación solar directa es solamente el 2,71% del área total de la superficie de los granos[2], 779,8 $m^2 .m^{-3}$ (34). En la Figura 3 se presenta una fotografía de la superficie de una capa de café, donde se observan las áreas que reciben radiación solar directa y áreas oscuras que no la reciben.

La capacidad, el tiempo de secado (generalmente prolongado) y la calidad final del producto dependen principalmente de las condiciones climáticas , las cuales varían de un lugar a otro y de tiempo en tiempo, haciendo que esta técnica de secado sea

[2] Contribución de la ingeniera Paula Jimena Ramos Giraldo, M.Sc.

Figura 1. Secador solar parabólico.

Figura 2. Secador solar tipo túnel.

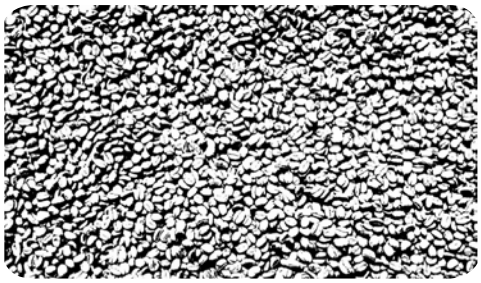


Figura 3. Superficie de una capa de café en secado solar. Se observan las áreas que reciben radiación solar directa.

altamente imprevisible, con alto riesgo de comprometer seriamente su calidad. Esta situación es especialmente crítica en la zona cafetera, donde se presentan lluvias permanentes y poca radiación solar durante la época de cosecha y beneficio del grano. Aunque en Colombia se ha venido produciendo café tipo exportación utilizando sistemas de secado natural, es necesario tener en cuenta sus limitantes, principalmente en épocas con la presencia del evento de La Niña cuando ocurre un incremento en la precipitación entre un 20% y un 40%, así como la disminución del brillo solar y de la temperatura en las regiones productoras de café (16). También, cuando aumenta la producción de las fincas por renovación de cafetales, mejor manejo de las plantaciones y aumento de la densidad de las plantaciones (número de árboles por hectárea). Con utilización del secado mecánico, especialmente en los días de mayor flujo de la cosecha, se obtienen ventajas como reducción de la mano de obra, disminución del tiempo de secado y conservación de la calidad, con menor riesgo para la calidad e inocuidad del café.

No se dispone de información actualizada sobre el número de secadores utilizados en Colombia para el café, la tecnología empleada y la capacidad de los equipos. Sin embargo, como una aproximación puede estimarse que se utiliza secado mecánico en 27.650 fincas con área sembrada en café superior a 5 ha, que en Colombia representan el 5% de los caficultores (12), las cuales responden por el 31% de la producción anual nacional.
En los sistemas de secado mecánico (artificial) de café logra reducirse el contenido de humedad del grano desde 52%–55% hasta el 10%-12% (b.h.), en un período de tiempo relativamente corto (18 a 32 h, dependiendo del tipo de secador y de las condiciones de operación del sistema), reduciendo así el riesgo de deterioro ocasionado por el ataque de hongos y de microorganismos. Sin embargo, si el secador no se diseña y opera adecuadamente, esto es, si a un determinado espesor de capa de grano no se le suministra la cantidad de aire necesaria a la temperatura adecuada, el secador no realizará eficientemente la remoción de humedad, pudiéndose comprometer la calidad del grano, aumentar el requerimiento de energía (térmica y eléctrica) y el costo de la mano de obra, incrementando así los costos del proceso de secado.

Los resultados de investigación de Cenicafé indican que para secadores en capa estática, con inversión de la dirección del flujo del aire, el caudal mínimo recomendado es de 38 $m^3.min^{-1}.m^{-3}$ de café pergamino (o sea, 100 $m^3.min^{-1}.t^{-1}$ de café pergamino seco-cps) y temperatura máxima del aire de secado de 50°C (31, 33).

Secadores mecánicos para café pergamino

Desde el inicio de la caficultura en Colombia se han utilizado secadores solares en los que se aprovecha la energía del sol y del aire para reducir la humedad del café desde un promedio de 53% b.h. hasta el rango requerido en su comercialización (10% a 12% b.h.). Sin embargo, el aumento de las productividades como producto de la investigación y la coincidencia de la época de cosecha con la época de lluvias, motivaron el uso de secadores mecánicos, con los cuales se aumenta la capacidad de secado, disminuye el tiempo y mejora el control del proceso.

Uno de los secadores mecánicos diseñado para café más reconocido es el Guardiola (Figura 4), diseñado en el año 1869 por el Ingeniero José Guardiola, un innovador y emprendedor de la industria del café en Guatemala en esa época (39). El sistema consta de un tambor perforado de grandes dimensiones, que rota muy lentamente sobre su eje (< 2 rpm), con un túnel central fijo, también perforado, por donde ingresa el aire caliente a la cámara de secado que se forma entre el ducto central y la carcasa del tambor. El café se deposita dentro del tambor, sin llenarlo completamente, mientras que la rotación favorece el movimiento y mezcla de los granos. Finalmente, el aire exhausto sale hacia el ambiente por las perforaciones del gran tambor. Aunque algunos secadores todavía se utilizan porque los usuarios argumentan una buena uniformidad final de la humedad, presentan desventajas como tiempo prolongado de secado, baja eficiencia térmica, gran requerimiento de mantenimiento, complejidad en su manejo y necesidad de presecado, entre otros.

El primer secador desarrollado para café en Colombia, del que se tenga reporte, fue el denominado Silo[3] Secador Cenicafé, el cual fue diseñado en la Sección de Beneficio de Cenicafé (hoy Disciplina de Poscosecha) a mediados de la década de los años 1970 (Figura 5). El secador está constituido por un túnel central donde, con la apertura y cierre de ocho compuertas, se distribuye el aire a dos cámaras de secado dispuestas en un mismo plano, como se indica en la Figura 5. Las compuertas también permiten cambiar la dirección del flujo de aire en cada cámara de secado, ascendente o descendente, con el fin de lograr una mejor uniformidad de la humedad final del producto. En estos secadores se dificultaba manejar las compuertas debido a que el operario tenía que ingresar al túnel, que era estrecho y estaba caliente. Adicionalmente, el caudal de aire de secado aumentaba notoriamente cuando se tenía solamente una cámara con café, lo cual aumentaba el consumo de combustible y de energía eléctrica en el secado y se dificultaba determinar la finalización del proceso.

Figura 4. Secador mecánico de café Guardiola.

Para superar las limitaciones mencionadas 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, operando de la siguiente manera: El aire caliente entra inicialmente

[3] El nombre de silo es equivocado para este dispositivo, debido a que éste es usado para secar y no para almacenar café; sin embargo, el nombre de silo se ha extendido en Colombia para estos equipos.

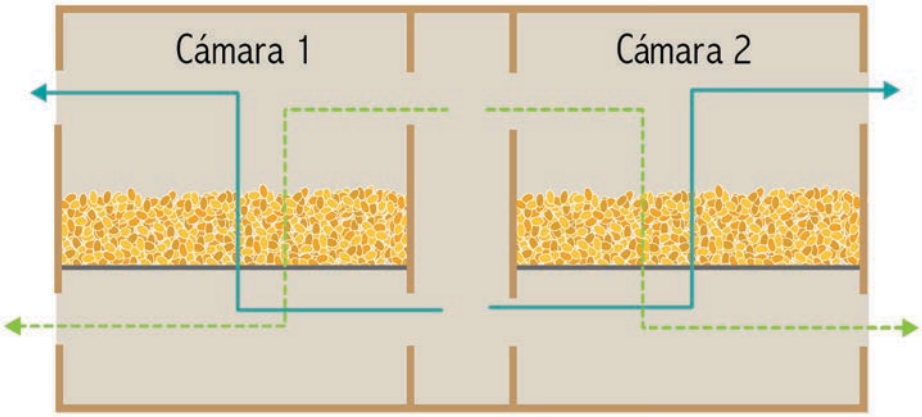


Figura 5. Esquema de funcionamiento de un Silo Secador Cenicafé de túnel central. Las flechas en línea continua indican el flujo de aire ascendente, el cual al cabo de unas horas y con la ayuda de las compuertas, se invierte para tener flujo de aire descendente (líneas con puntos).

por la parte superior de la masa de café ubicada en la cámara 1, como se muestra con la línea A de la Figura 6, iniciando el secado; si se desea obtener una mayor uniformidad en el contenido de humedad del grano, el flujo de aire se debe invertir periódicamente cada 6 a 12 horas (línea B) hasta obtener el contenido de humedad final deseado; una vez seco el grano, éste es removido de la cámara 1. Si se dispone de más café húmedo, se llena la cámara 1 y se hace pasar el aire de secado, primero por la cámara 2, invirtiendo periódicamente el flujo de aire, como lo indican las líneas C y D, hasta que esté seco el café de la cámara 2. Si se tiene más café para secar, éste se lleva a la cámara 2 y se inicia nuevamente el proceso de secado, invirtiendo el sentido del flujo del aire; el proceso se repite las veces que sea necesario.

Figura 7. Silo Secador para café, Cenicafé.

Aunque la modificación requirió de dos compuertas adicionales, se facilitó el manejo de éstas utilizando palancas accionadas externamente. Esta tecnología construida en mampostería y con materiales disponibles en la zona cafetera ha sido muy utilizada en Colombia (Figura 7).

A partir del Silo Secador Cenicafé modificado, la industria nacional ha diseñado nuevas tecnologías, procurando equipos de construcción más sencilla para reducir costos de producción, que permitan obtener mejor uniformidad de la humedad del café seco. La opción más simple es un secador pequeño de una sola capa, el cual dispone de un sistema de inversión del flujo del aire, para mejorar la uniformidad de la humedad final (Figura 8).

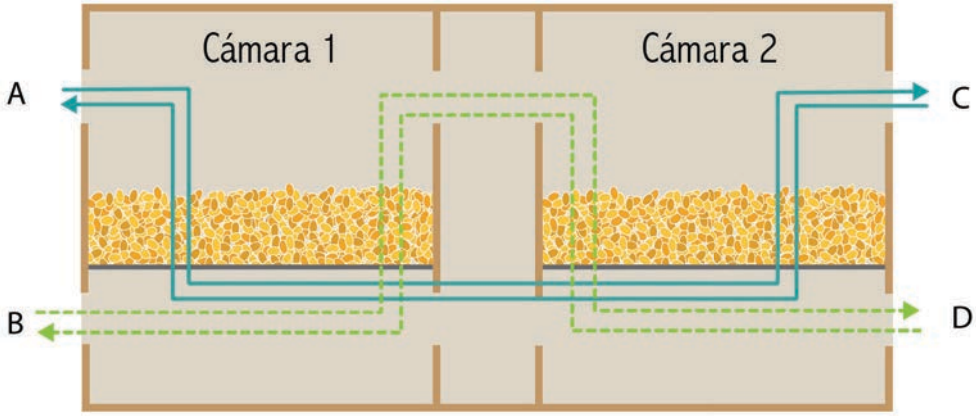


Figura 6. Esquema de funcionamiento de un Silo Secador Cenicafé modificado. Las flechas en línea continua indican el flujo de aire ascendente, el cual al cabo de unas horas y con la ayuda de las compuertas, se invierte para tener flujo de aire descendente (líneas con puntos).

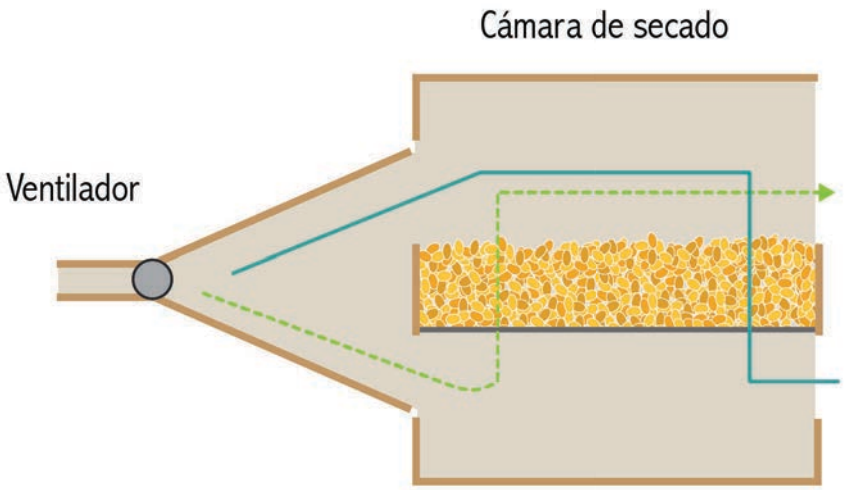


Figura 8. Esquema de funcionamiento de un secador de una sola capa con inversión de flujo de aire. La flecha en línea continua indica el flujo de aire descendente, el cual al cabo de unas horas y con la ayuda de las compuertas, se invierte para tener flujo de aire ascendente (línea discontinua).

Otras tecnologías fabricadas en Colombia son los secadores de dos o tres capas, dispuestas verticalmente. En la Figura 9 se muestra un esquema de un secador de dos cámaras verticales, en el cual se realiza la inversión de flujo de aire solamente en la inferior. Una vez que el café de la cámara inferior está seco se retira del secador y se pasa el café de la cámara superior a la cámara inferior, descargándolo con la ayuda de una regla de madera y utilizando una abertura central en el piso que sostiene el café, que normalmente está tapado con malla, primero el café de la parte más alta de la capa, el cual presenta mayor humedad, y por último el café inferior que está mas seco. De esta forma se logra invertir el orden del café en la capa descargada, lo cual facilita la obtención de la mayor uniformidad final del café. Posteriormente, la cámara superior se carga nuevamente con café lavado para establecer el ciclo de secado. El sistema requiere un ducto externo y compuertas para conducir el aire hacia la cámara de presecado.

El secador de tres pisos se ofrece con dos opciones: con inversión del flujo de aire en la cámara inferior o sin inversión de flujo de aire. La primera opción necesita además de un ducto externo y compuertas, una placa deslizante para removerla cuando el flujo de aire sea ascendente en la cámara de secado (Figura 10). La segunda opción no posee ni ducto externo, ni compuertas, ni placas deslizantes y basa la uniformidad del secado en un paso ordenado del café de una cámara a otra, igual a como fue descrito el procedimiento en el secador de dos capas. Esta última disposición es la más económica en cuanto a inversión inicial, pero es la que requiere más mano de obra.

En la Figura 11 se presentan algunos equipos fabricados por la industria colombiana para atender las necesidades de secado de café, en un amplio rango de producción anual. Los equipos constan de tres cámaras de secado. Para fincas con producción de 2.500 a 3.750 kg de café seco/año se ofrecen

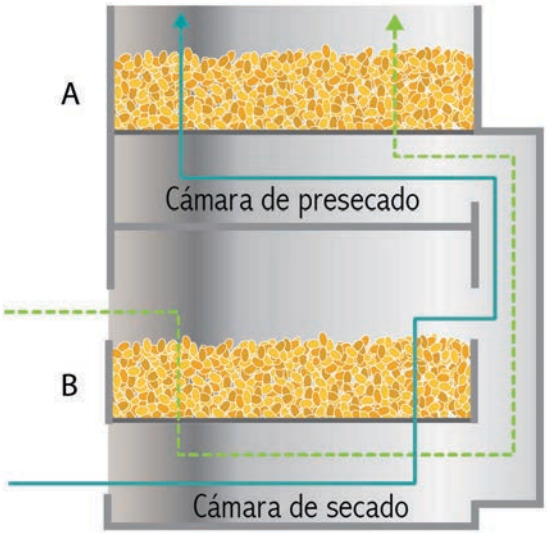


Figura 9. Esquema de funcionamiento de un secador de dos pisos con inversión de flujo de aire en la cámara inferior. Dirección del flujo de aire al iniciar el secado (flecha en línea continua), el cual se invierte al cabo de unas horas (flecha en línea discontinua).

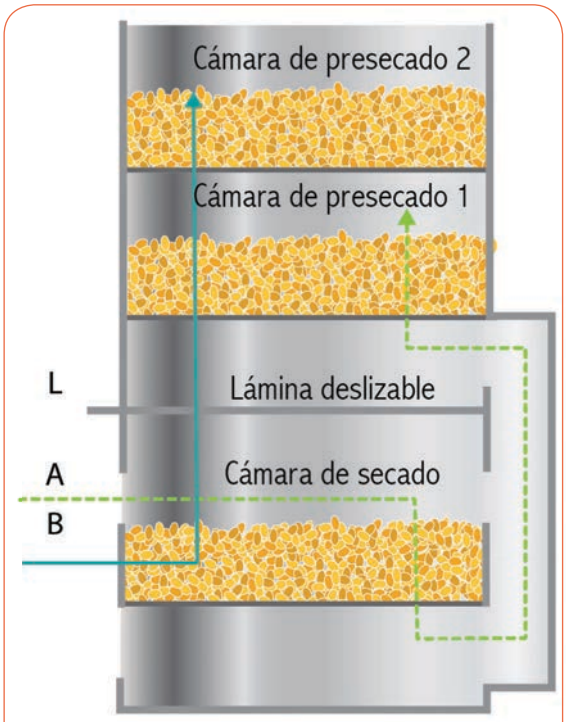


Figura 10. Esquema de funcionamiento de un secador de tres capas fijas dispuestas verticalmente, con inversión de flujo de aire en la cámara inferior. Dirección del flujo de aire al iniciar el secado (flecha en línea continua), el cual se invierte al cabo de unas horas (flecha en línea discontinua).

Figura 11. Equipos utilizados para el secado del café en Colombia. **a**. Secador de tres cámaras de secado, sin intercambiador de calor; **b.** Secador con intercambiador de calor y alimentador con tornillo sinfín para el transporte de cascarilla de café; **c.** Secador con intercambiador de calor y alimentación por gravedad de cascarilla de café; **d.** Secador con agitación mecánica del café en las cámaras y descarga con tornillo sinfín.

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 de hasta 10.000 kg de café seco/año se fabrican equipos con capacidad para secar 500 kg de café lavado (aprox. 262 kg de café pergamino seco), con intercambiador de calor, utilizando como combustible generalmente cisco o cascarilla de café, con alimentación mecánica o por gravedad.

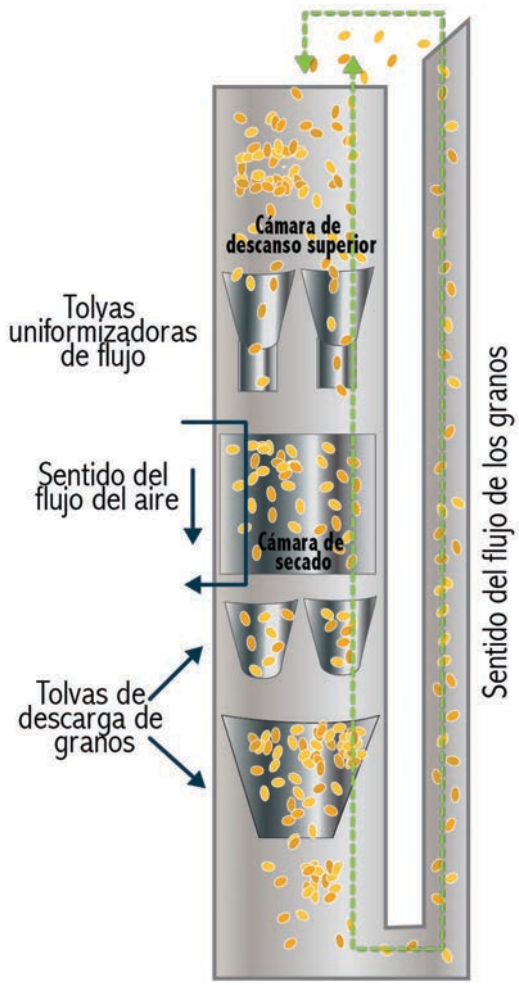


Figura 12. Esquema de un secador intermitente de flujos concurrentes para café.

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.

Con el fin de obtener un producto de mejor calidad, con mayor uniformidad en la humedad al final del proceso y mayor eficiencia energética, en Cenicafé se diseñó y evaluó un secador para café pergamino lavado, con las características presentadas en la Figura 12. El equipo consta de una cámara de reposo en la parte superior, conectada a una cámara de secado por medio de tolvas diseñadas para restringir el flujo ascendente del aire de secado; también permite la mezcla de la masa de café, contribuyendo a uniformizar su contenido de humedad. El café y el aire de secado fluyen en dirección descendente en la cámara de secado.

El aire exhausto es retirado de la cámara de secado por medio de ductos. El café pasa de la cámara de secado a la tolva de descarga por medio de tolvas internas de menor tamaño, diseñadas para permitir una velocidad similar de los granos en la sección del secador y así evitar que los granos se adhieran a la superficie interna de las paredes secador en esta sección, especialmente en las primeras etapas del proceso de secado, por la presencia de la película de humedad en su superficie. En las partes del secador donde los granos no están en contacto con el aire de secado, denominadas de reposo, los granos experimentan difusión de humedad del interior al exterior, facilitando su remoción al pasar por la etapa de secado. Este secador se denomina intermitente de flujos concurrentes (de granos y aire de secado), teniendo en cuenta la dirección del aire y de los granos en la cámara de secado y la intermitencia en el suministro de energía para el secado.

Modelos matemáticos para el secado mecánico de granos

Los modelos propuestos para predecir el comportamiento del secado de granos se clasifican como: de no-equilibrio, de equilibrio y de tipo logarítmico; sin embargo, esta clasificación no puede definirse en forma exacta, por lo cual debe tomarse en forma aproximada.

Los modelos de secado de granos de no-equilibrio son más exactos y más elaborados. En estos se desarrolla el modelo de secado como un sistema de ecuaciones diferenciales parciales a partir de los balances de transferencia de calor y de masa.

En los modelos de equilibrio para el secado de granos o modelos simplificados, el enfoque básico para la simulación consiste en calcular el secado en una capa delgada de granos por medio de balances de calor y masa (modelo de equilibrio), y mediante un proceso iterativo, se combinan muchas capas delgadas para formar la capa gruesa. La transferencia de calor entre el grano y el aire circundante ocurre rápidamente, y por lo tanto, la temperatura del grano se asume igual a la del aire que se encuentra próximo a él; además, el grano alcanza el contenido de humedad en equilibrio con las condiciones sicrométricas (temperatura y humedad relativa) del aire circundante. El contenido de humedad de equilibrio es uno de los factores que determinan la remoción de humedad de la capa de grano.

Los modelos logarítmicos de secado de granos se basan en la relación directa entre la tasa de secado de una capa de grano

$$\frac{\partial M}{\partial t}$$

y el gradiente de temperatura del aire que la atraviesa

$$\frac{\partial T}{\partial x}$$

Aunque estos modelos tienen una baja predicción del fenómeno de secado, han sido utilizados por muchos investigadores, en algunas aplicaciones, debido a su simplicidad.

A pesar de que se han desarrollado varios modelos para la simulación del secado de granos, los más utilizados son el modelo de Thompson (36) y el modelo MSU (Michigan State University) desarrollado por Bakker-Arkema et al. (2).

3.1. Modelo de Thompson

El modelo de Thompson es un modelo semiempírico de equilibrio que fue desarrollado originalmente para simular el secado de maíz desgranado (8, 30, 31, 36). En este modelo se considera la capa gruesa de granos constituida de capas de 2,5 cm de espesor cada una, colocadas una sobre otra. El enfoque básico para la simulación consiste en calcular el secado en una capa delgada de granos por medio de balances de calor y masa (modelo de equilibrio), y por medio de un proceso iterativo extenderlo a más capas delgadas para formar la capa gruesa de dimensiones iguales a las del producto en el secador. El secado de una capa delgada puede representarse normalmente por medio de una ecuación que representa el cambio de la humedad de los granos de la capa con respecto al tiempo, según las diferentes temperaturas y humedades del aire de secado.

La Figura 13 representa el paso del aire inicialmente a una temperatura (T) y a una razón de humedad (H), a través de la primera capa delgada de granos que tiene una humedad inicial (M_1) y una temperatura inicial (Tg_1). Después de un intervalo de tiempo (Δt), cierta cantidad de humedad (ΔM_1) se evapora de los granos, siendo transportada por el aire, el cual pasa a tener una mayor razón de humedad ($H+\Delta H_1$). Al mismo tiempo, el aire disminuye su temperatura a ($T-\Delta T_1$) en forma proporcional al aumento de temperatura del grano ($T_{g1}+\Delta T_{g1}$). Las condiciones de salida del aire de la primera capa delgada de grano (capa delgada 1), son las condiciones de entrada para la siguiente capa (capa delgada 2), y así sucesivamente se aumentan las capas, con el mismo análisis matemático, hasta completar la capa gruesa de grano (capa real, en la cámara del secador).

El modelo predice el secado final de la capa de grano mediante el uso de ecuaciones de equilibrio (balance antes y después del secado) y de ecuaciones semiempíricas tales como las del contenido de humedad en equilibrio, calor específico, calor latente de vaporización del agua contenida en el grano y la ecuación de secado en capa delgada, para lo cual deben considerarse las condiciones iniciales del aire y del grano. El balance de calor se completa al predecir las condiciones finales del aire y del grano. El modelo es flexible y permite integrar en él todas las variables y parámetros necesarios para simular el proceso de secado. Una vez se dispone del modelo completo es especialmente útil para el estudio de los diferentes sistemas de secado y para el diseño de equipos.

3.1.1 Balance antes del secado

En el modelo de Thompson se realiza un balance de calor sensible antes de iniciar el proceso de secado, el cual consiste en la determinación de la temperatura de equilibrio entre el aire y el grano. La temperatura de equilibrio (T_e) se determina

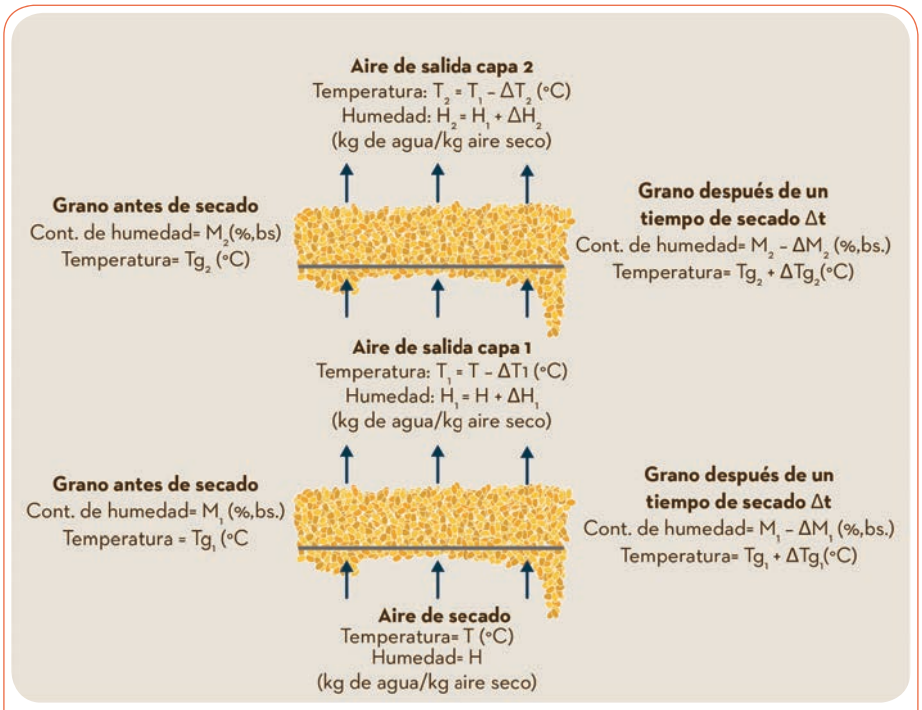


Figura 13. Esquema del modelo de simulación de secado en capa delgada de Thompson.

a partir de la razón de humedad y la temperatura del aire de secado (H y T respectivamente), y de la temperatura y el calor específico del grano (T_g y c_p respectivamente), como se indica en la Ecuación [1]

$$Te = \frac{(0{,}24 + 0{,}45H)T + c_p T_g}{0{,}24 + 0{,}45H + c_p}$$

[1]

3.1.2 Balance después del secado

La simulación del secado de la capa de grano se realiza utilizando las ecuaciones de contenido de humedad de equilibrio y de secado en capa delgada; además, se realizan los balances sicrométricos del aire de secado. El balance después del secado de una capa delgada consiste en determinar la temperatura del aire y del grano (T_f) una vez haya transcurrido el intervalo de tiempo Δt; para ello se considera el calor latente de vaporización del agua contenida en el grano, L. El grano habrá perdido humedad (ΔH), la cual habrá sido removida por el aire (incrementando su razón de humedad a H_f). El balance de calor después del secado se presenta en la Ecuación [2]

$$T_f = \frac{(0{,}24 + 0{,}45H_o)T_e - \Delta H(587{,}9 + L - T_e) + c_p T_e}{0{,}24 + 0{,}45H_f + c_p}$$

[2]

En los secadores continuos de flujos concurrentes el grano y el aire se mueven en la misma dirección. Se considera el grano en el secador como un conjunto de capas delgadas, con el aire de secado fluyendo hacia abajo por entre las capas de granos. Para cada intervalo de tiempo, una nueva capa de grano es localizada sobre la parte superior del secador y una capa es removida del fondo. El procedimiento para simplificar la simulación consiste en calcular los cambios de humedad de

una capa a medida que ésta se desplaza a través del secador. En otras palabras, si el intervalo de tiempo es seleccionado adecuadamente, el aire de salida de una capa en la primera posición durante el primer período de tiempo, es el de entrada para la misma capa, la cual está en la segunda posición durante el segundo período de tiempo y así sucesivamente, hasta obtener la profundidad deseada. Esta simulación representa el equilibrio o estado estable en procesos de secado de flujos concurrentes, con las condiciones iniciales del aire y del grano conocidas, y para una tasa de flujo de grano prestablecida. Para una determinada profundidad, la tasa del flujo de los granos determinará el contenido de humedad final.

Las variables utilizadas en las ecuaciones de los modelos de Thompson son las siguientes:

c_p: Calor específico del grano, kJ.kg^{1}.°C^{-1}
ΔH: Humedad removida por el aire durante el tiempo Δt, kg.h^{-1} de agua
H: Razón de humedad del aire, kg de vapor/kg de aire seco
H_0: Razón de humedad del aire antes de atravesar la capa de grano, kg de vapor/kg de aire seco
H_f: Razón de humedad del aire después de atravesar la capa de grano, kg de vapor/kg de aire seco
L: Calor latente de vaporización del agua del grano (kJ.kg^{-1})
T: Temperatura del aire de secado, °C
T_g: Temperatura del grano, °C
T_f: Temperatura final del aire de secado y del grano, °C
T_e: Temperatura de equilibrio del aire de secado y del grano, °C

3.2 Modelo MSU (*Michigan State University*).

El modelo MSU, desarrollado por Bakker-Arkema *et al.* (2, 3, 5, 8, 22, 30, 31), es un modelo teórico de no-equilibrio y se basa estrictamente en las leyes de transferencia de calor y de masa. El modelo MSU tiene el mismo enfoque básico que el modelo de Thompson, ya que divide el proceso de secado en pequeños incrementos de tiempo y espesor de grano, utilizando las condiciones de salida del aire de una capa como condiciones de entrada para la siguiente; calcula las condiciones del aire y del grano en cada incremento de tiempo y espesor de capa realizando cuatro balances:

Balance para la entalpía del aire
Balance para la humedad del aire
Balance para la entalpía del grano
Balance para la humedad del grano

Estos balances originan ecuaciones diferenciales parciales que se resuelven simultáneamente por integración numérica, usando en nuestro caso diferencias finitas, a partir de condiciones iniciales y de frontera (2). Con este modelo puede simularse el funcionamiento de secadores estacionarios, de flujos cruzados, de flujos concurrentes y en contracorriente.

3.2.1. Proceso de simulación en secadores estáticos utilizando el modelo MSU

El modelo MSU realiza los balances de masa y energía sobre un volumen diferencial (Sdx), localizado en una posición arbitraria dentro del secador estacionario. Las variables desconocidas en el modelo son: el contenido de humedad y la temperatura de cada grano, la razón de humedad y la temperatura del aire de secado en el secador.

Como resultado, el modelo para un secador de capa fija consiste en cuatro ecuaciones diferenciales parciales, provenientes de los balances de masa y energía del grano y del aire de secado y una ecuación de secado en capa delgada para el grano, a saber:

Balance para la entalpía del aire: La energía que sale es igual a la energía que

entra menos la energía transferida por convección (Ecuación [3]).

$$\frac{\partial T_a}{\partial x} = \frac{-h_a}{G_a c_a + G_a c_v H}(T_a - T)$$

[3]

Balance para la entalpía del producto: La energía transferida es igual al cambio en energía interna del producto menos la energía para evaporación (Ecuación [4]).

$$\frac{T}{t} = \frac{h_a}{\rho_p c_p + \rho_p c_w M}(T_a - T) + \frac{h_{fg} + c_v (T_a - T)}{\rho_p c_p + \rho_p c_w M} G_a \frac{\partial H}{\partial}$$

[4]

Balance para la razón de humedad del aire: La humedad transferida es igual a la humedad que entra menos la humedad que sale (Ecuación [5]).

$$\frac{\partial H}{\partial x} = -\frac{\rho_p}{G_a}\frac{\partial M}{\partial t}$$

[5]

Ecuación de secado en capa delgada del producto o de balance de humedad del grano, para la cual deberá utilizarse una ecuación apropiada de capa delgada. Deberá ser de la siguiente forma general (Ecuación [6]).

$$\frac{\partial M}{\partial t} = f(M, M_e, M_o, T, \ldots t)$$

[6]

Las cuatro ecuaciones anteriores constituyen el modelo de simulación para el secado en capa fija. Sin embargo, no se conoce una solución analítica del sistema de ecuaciones, por lo cual deberán usarse técnicas de solución aproximada, por diferencias o elementos finitos.

3.2.2. Proceso de simulación en secadores de flujos concurrentes utilizando el modelo MSU

De manera similar al modelo para secadores de capa estática, el modelo para secadores de flujos concurrentes realiza los balances de masa y energía sobre un volumen diferencial ($S\,dx$). Las Ecuaciones [7], [8] y [9] resultantes de los balances, se presentan a continuación:

$$\frac{dT_a}{dx} = \frac{-h_a}{G_a c_a + G_a c_v H}(T_a - T)$$

[7]

$$\frac{dT}{dx} = \frac{h_a}{G_p c_p + G_p c_w M}(T_a - T) - \frac{h_{fg} + c_v (T_a - T)}{G_p c_p + G_p c_w M} G_a \frac{dH}{dx}$$

[8]

$$\frac{dH}{dx} = -\frac{G_p}{G_a}\frac{dM}{dx}$$

[9]

Para capa delgada deberá utilizarse una ecuación,

$$\left(\frac{\mathrm{dM}}{\mathrm{dx}}\right)$$

de la forma general a la presentada en la Ecuación [6]

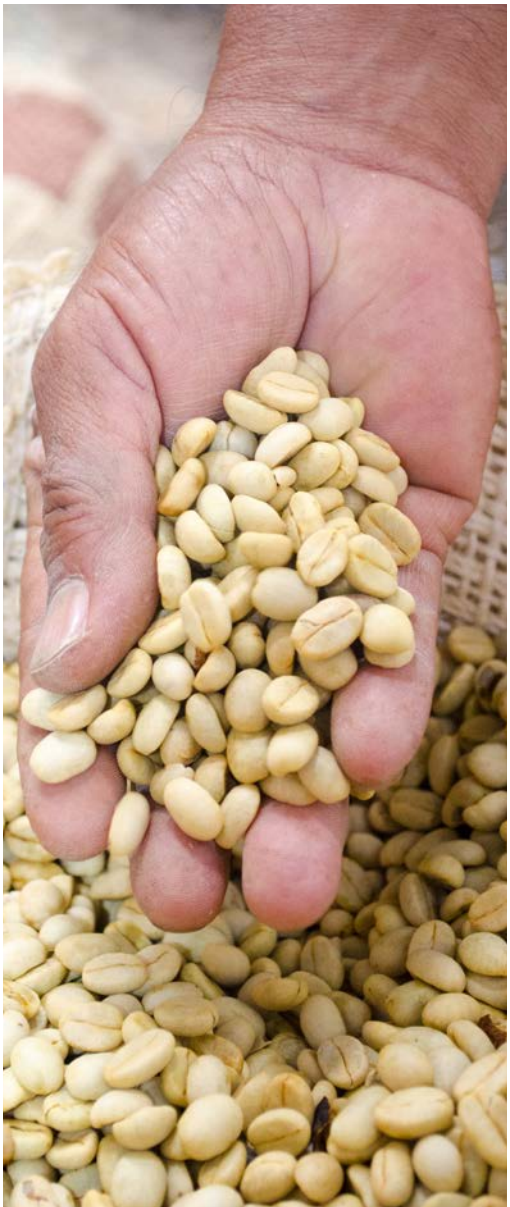
Las ecuaciones diferenciales en el modelo del secador de flujos concurrentes son ecuaciones diferenciales totales, mientras que en el modelo de secadores estáticos son ecuaciones diferenciales parciales (2).

La solución numérica de los modelos MSU requiere conocer las condiciones iniciales y de borde o contorno del grano y del aire de secado. Entre las condiciones iniciales del grano y del aire se tienen: temperatura y contenido de humedad iniciales del grano; temperatura y razón de humedad del aire de secado a la entrada.

Las variables utilizadas en las ecuaciones de los modelos MSU son las siguientes:

a: Área específica del producto, $m^2.m^{-3}$
c_a: Calor específico del aire, $kJ.kg^{-1}.°C^{-1}$
c_p: Calor específico del grano, $kJ.kg^{-1}.°C^{-1}$
c_v: Calor específico del vapor, $kJ.kg^{-1}.°C^{-1}$
c_w: Calor específico del agua, $kJ.kg^{-1}.°C^{-1}$
G_a: Flujo másico de aire por unidad de área, $kg.h^{-1}.m^{-2}$
G_p: Flujo másico del grano por unidad de área, $kg.h^{-1}.m^{-2}$
H: Razón de humedad del aire, kg de agua/kg de aire seco
h: Coeficiente de transferencia de calor por convección, $kJ.h^{-1}.m^{-2}.°C^{-1}$
h_{fg}: Calor latente de vaporización, $kJ.kg^{-1}$
M: Contenido de humedad local del grano, decimal bs.
P_p: Densidad expresada en base al peso seco del grano, $kg.m^{-3}$
t: Tiempo, h
S: Sección del secador perpendicular al flujo del aire, m^2
T_a: Temperatura del aire, °C
T: Temperatura del grano, °C
x: Coordenada dentro de la capa profunda de grano, m

Parámetros de los modelos de simulación del secado de café



Para la simulación matemática del secado es necesario conocer las características físicas del grano y las propiedades sicrométricas del aire de secado. En cuanto a las características físicas del grano se requiere conocer el peso específico aparente (densidad aparente), así como las ecuaciones de contenido de humedad en equilibrio, de calor específico, de calor latente de vaporización y de secado en capa delgada. Para el aire de secado deben establecerse la temperatura y humedad relativa o razón de humedad. Las ecuaciones y características del grano fueron determinadas en Cenicafé en diferentes trabajos de investigación (15, 18, 22, 30, 31, 37).

4.1. Coeficiente de transferencia de calor por convección entre el aire y el grano

Brooker *et al.* (3) desarrollaron la Ecuación [10] para el cálculo del coeficiente de transferencia de calor por convección en granos, que se utiliza en los modelos de simulación matemática de secado de la Universidad del Estado de Michigan (MSU).

$$h_c = Ac_a G_a \left(\frac{2r_0 G_a}{C + DT} \right)^B$$

[10]

Donde:
h_c: Coeficiente de transferencia de calor por convección, $W.m^{-2}.K^{-1}$
r_0: Radio equivalente de la partícula (grano de café), m
c_a: Calor específico del aire, $kJ.kg^{-1}.K^{-1}$
G_a: Flujo de aire, $kg.h^{-1}.m^{-2}$
T: Temperatura del aire, K
A: 0,2755
B: -0,34
C: 0,06175
D: 0,000165

4.2. Calor específico del café pergamino

Montoya *et al.* (22) utilizaron el método de las mezclas para determinar el calor específico del café pergamino en el rango de humedad del grano entre el 11% y el 45% b.h., obteniendo la Ecuación [11]:

$$c_p = 1{,}3556 + 5{,}7859\, M$$

[11]

Donde:
c_p: Calor específico, $kJ.kg^{-1}.K^{-1}$
M: Contenido de humedad, decimal, b.s.

4.3. Contenido de humedad en equilibrio del café pergamino

Trejos (37) utilizó el método dinámico, propuesto por Rossi y Roa (35), para la determinación del contenido de humedad de equilibrio para café pergamino (Ecuación [12]).

$$M_e = (P_1 H_R + P_2 H_R^{\ 2} + P_3 H_R^{\ 3})\, e^{(Q_1 H_R + Q_2 H_R^2 + Q_3 H_R^3)T}$$

[12]

Donde:
M_e: Contenido de humedad de equilibrio del café pergamino, % b.s.
H_R: Humedad relativa del aire, decimal
T: Temperatura del aire, °C
P_1 = 61,030848 Q_1 = -0,03049
P_2 = -108,37141 Q_2 = 0,070114
P_3 = 74,461059 Q_3 = -0,035177

Esta ecuación es válida para un rango de temperaturas de 10 a 56°C y humedades relativas entre 0% y 100%.

4.4. Calor latente de vaporización del café pergamino

Trejos (37), a partir de las isotermas de equilibrio higroscópico obtenidas para café pergamino, Ecuación [12], y aplicando el método de Othmer, determinó la Ecuación [13] de calor latente de vaporización del café pergamino, la cual tiene la siguiente forma:

$$L = (2.502{,}4 - 2{,}42958\, T)\left[1 + 1{,}44408\, e^{-21{,}5011\, M}\right]$$

[13]

Donde:
L: Calor latente de vaporización del café pergamino, $kJ.kg^{-1}$.
T: Temperatura del café, °C
M: Contenido de humedad del café, decimal, b.s.

4.5. Ecuación de secado en capa delgada

López y Ospina (18) utilizaron el método dinámico para la determinación de los coeficientes (***m, n*** y ***q***) de la ecuación de secado en capa delgada de Roa, para contenidos de humedad del café desde 55% b.h. hasta la humedad de equilibrio. Los coeficientes de la Ecuación [14] fueron determinados para tres rangos de temperatura del aire de secado.

$$\frac{\partial M}{\partial t} = -m\, q\, (M - M_e)(P_{vs} - P_v)^n\, t^{(q-1)}$$

[14]

Donde:

M: Contenido de humedad del grano en cualquier instante, decimal, b.s.

M_e: Contenido de humedad de equilibrio, decimal, b.s.

P_{vs}: Presión de vapor de saturación, kPa

P_v: Presión de vapor parcial, kPa

t: Tiempo de secado, h

Con base en simulaciones preliminares de secado realizadas por Parra-Coronado, Roa determinó los parámetros m, n, y q para la ecuación unificada de secado en capa delgada (30, 31), válida para los rangos de 10 a 70°C de temperatura y de 5% al 55% de humedad en b.h. (Figura 14).

$$m = 0{,}0143; \quad n = 0{,}87898; \quad q = 1{,}06439$$

4.6. Coeficiente de difusión de humedad

Montoya *et al.*, (22) obtuvieron una ecuación para el coeficiente de difusión de humedad en el café pergamino, en función de la humedad y la temperatura del grano. La expresión es válida para contenidos de humedad menores o iguales a 50% b.s. (33,33% b.h.) y se presenta en la Ecuación [15].

$$D = 4{,}1582 \times 10^{-8}\, e^{\left[(0{,}1346\, T_g + 2{,}2055)M - \frac{1.184}{T_g + 273{,}16}\right]}$$

[15].

Donde:

D: Coeficiente de difusión de humedad, $m^2.min^{-1}$

M: Contenido de humedad media del grano, decimal, b.s.

T_g: Temperatura del grano, °C

4.7. Área específica del café pergamino

Al considerar el grano de café como una esfera, Montoya *et al.*, (22) obtuvieron un área específica de 779,8 $m^2.m^{-3}$ para el café pergamino, en el rango de contenido de humedad del 10% al 25,6% b.h., la cual fue aplicada en el modelo MSU para un secador de flujos concurrentes IFC.

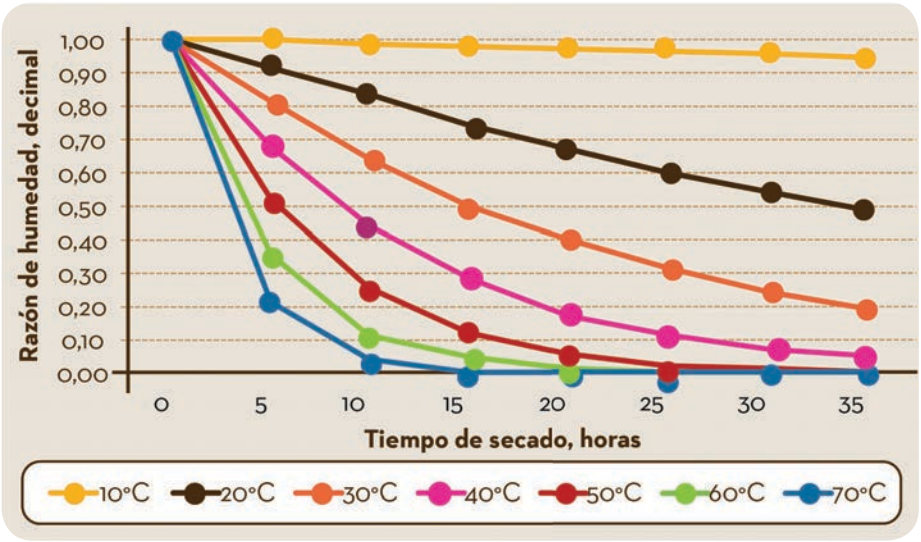


Figura 14. Curvas de capa delgada para secado y almacenamiento de café pergamino calculada con la Ecuación [14] con los parámetros: m = 0,01430; n = 0,87898; q = 1,06439.

4.8. Densidad aparente (Peso específico aparente) del café pergamino

A partir de la Ecuación [16] desarrollada por Montoya *et al*., (22) se estima la densidad aparente del café pergamino, en función del contenido de humedad:

$$\rho_a = 365{,}884 + 270{,}67\,M \quad [16]$$

Donde:

ρ_a : Densidad aparente, kg.m^{-3}

M : Contenido de humedad, decimal, b.s.

Simulación del secado

Los modelos de simulación matemática se desarrollaron e implementaron en lenguaje de programación MICROSOFT VISUAL BASIC 6.0, tomando como base los modelos de Thompson y MSU (*Michigan State University*), para lo cual se utilizaron los parámetros determinados en Cenicafé para la simulación matemática del secado de café pergamino (15, 22, 30, 34, 37). El software y el manual del usuario se incluyen en el texto para su uso.

Los modelos simulan el funcionamiento de cada uno de los secadores y estiman la capacidad dinámica y la eficiencia térmica del secador, así como la potencia requerida en el ventilador para vencer la resistencia de los granos al flujo del aire. Para el desarrollo de los modelos de los diferentes secadores, se tomaron como base los procedimientos de operación tradicionales para cada uno de ellos (31).

Para determinar la exactitud de los programas de simulación en la predicción del proceso de secado de café pergamino, se compararon los valores experimentales obtenidos en Cenicafé con los valores obtenidos mediante los modelos de simulación, utilizando el análisis gráfico de correspondencia durante el transcurso del secado (variación del contenido de humedad con respecto al tiempo) experimental y simulado; este análisis permite observar gráficamente la exactitud de cada uno de los modelos de simulación y las posibles etapas en las cuales el modelo subestima o sobrestima el proceso de secado. Estadísticamente se compararon las variaciones de humedad del grano, mediante correlación lineal entre los valores experimentales y los simulados.

Se validaron los programas desarrollados con base en los modelos de Thompson y MSU, comparando los resultados obtenidos mediante simulación con los valores experimentales obtenidos en Cenicafé para los siguientes secadores (31):

- **Secador de capa fija sin inversión del flujo del aire de secado:** Valores experimentales de Buitrago (4) y Ospina, reportados por Trejos (37). Se realizó la validación de los programas de computación correspondientes a siete pruebas diferentes.

- **Secador de capa fija con inversión del flujo del aire de secado:** Valores experimentales reportados por Montenegro (20). Se realizó la validación de los programas para tres pruebas diferentes.

- **Silo Secador Cenicafé Modificado:** Valores experimentales reportados por Correa (6) y Ospina (26). Se realizó la validación de los programas para cuatro pruebas diferentes.

- **Secador de dos pisos (Silo secador vertical):** Valores experimentales obtenidos por Parra-Coronado (30, 31). Se realizó la validación de los programas para cuatro pruebas diferentes.

- **Secador de tres pisos:** Valores experimentales obtenidos por Parra-Coronado (34). Se realizó la validación de los programas para cuatro pruebas diferentes.

- **Secador intermitente de flujos concurrentes "Cenicafé-IFC":** Valores experimentales reportados por Montoya *et al.*, (22) y Ospina (25). Se realizó la validación de los programas para 13 pruebas diferentes.

Se compararon los resultados correspondientes a la dinámica del proceso, o sea las variaciones del contenido de humedad de los granos a lo largo del tiempo de secado.

5.1. Optimización operacional

Una vez validados los modelos de simulación para los diferentes secadores, se procedió a optimizarlos operacionalmente, con el fin de obtener café pergamino seco con contenido de humedad final en el rango de 10% a 12% b.h. y predecir el tiempo de secado, la eficiencia térmica y el comportamiento del grano durante el proceso.

Teniendo en cuenta que el proceso de secado de granos se considera determinístico (3) y utilizando como criterios de optimización: 1) mínimo tiempo de secado, 2) mínimo coeficiente de variación del contenido de humedad final del grano y 3) máxima capacidad dinámica del secador, se realizaron diferentes combinaciones posibles de los parámetros de entrada (espesores de la capa de grano, caudales y temperaturas del aire de secado) para seleccionar la(s) combinación(es) que presentara(n) el mínimo tiempo de secado y/o mínimo coeficiente de variación del contenido de humedad final del grano y/o máxima capacidad dinámica del secador. En total, se realizaron 753 pruebas de simulación, lo cual corresponde a un promedio de 151 simulaciones para cada secador (31).

Los datos de entrada suministrados al programa de simulación seleccionado para la optimización de los secadores estáticos fueron:

Datos del Producto

Contenido de humedad inicial del café: 55,0% b.h.

Temperatura inicial del café: 21,0°C

Promedio del contenido de humedad al final del secado: 11,0% b.h.

Datos del lugar

Altitud (Chinchiná, Caldas):	1.310,0 m
Promedio de la temperatura ambiente:	21,0°C

Datos del Sistema

Sección transversal del silo secador:	1,0 m^2.
Espesor de la capa de grano en cada cámara:	Varió de 0,1 a 0,4 m, con incrementos de 0,1 m.

5.2. Datos del aire de secado

Temperatura: Se tomó como temperatura base del aire de secado el valor de 50°C. Posteriormente, se varió desde esta base hasta 30°C con incrementos negativos de 5°C, con el fin de determinar el incremento de tiempo de secado al disminuir la temperatura.

Humedad relativa: Se tomó como base el valor de 0,17 (17%), correspondiente a una temperatura de 50°C, para la razón de humedad normal del lugar del experimento. Posteriormente, el valor cambió de acuerdo a la variación de la temperatura, a razón de humedad constante.

Flujo del aire: Varió de 10 a 40 $m^3.min^{-1}.m^{-2}$, con incrementos de 5 $m^3.min^{-1}.m^{-2}$.

Con base en los resultados obtenidos de las optimizaciones, se elaboraron las recomendaciones para operar de la manera más eficiente cada uno de los secadores utilizados para café pergamino, teniendo en cuenta una humedad final media del 11% con un coeficiente de variación del contenido de humedad final inferior a 6,5%, que garantiza que la humedad final del grano esté en el rango del 10% al 12% b.h.. Además, se tuvo en cuenta que la manera recomendada para operar el secador fuera de fácil aplicación por parte del caficultor.

5.3. Programas de simulación matemática para secadores estáticos (modelo base: Thompson)

Las simulaciones realizadas inicialmente para el secador de bandejas móviles (carro secador) modificado para secado mecánico (4) y para el Silo Secador Cenicafé sin inversión del flujo de aire (26), utilizando el programa desarrollado con base en el modelo de Thompson, mostraron que los parámetros utilizados se ajustaron al proceso real de secado; solo se presentaron inconvenientes con la ecuación de secado en capa delgada. Esta ecuación originalmente se encontraba segmentada para tres diferentes intervalos de temperatura y sus parámetros (m, n y q) estaban definidos para intervalos de confianza del 95% (38). Para que el modelo de simulación desarrollado funcionara correctamente se realizaron varias simulaciones, con el fin de determinar los valores de los parámetros más adecuados (dentro de los intervalos de confianza) en cada uno de los segmentos de la ecuación de secado en capa delgada; una vez determinados estos parámetros se definieron los valores unificados de los coeficientes *m*, *n* y *q*, para la misma ecuación, que incluyera los tres intervalos de temperatura, dentro de todo el rango de humedad del café. El resultado de los trabajos de regresión dio los siguientes valores para la ecuación unificada de Roa (Ecuación [14]):

$$m = 0{,}0143; \quad n = 0{,}87898; \quad q = 1{,}06439$$

5.4. Programas de simulación matemática para secadores Cenicafé-IFC (modelo base: Thompson)

Las simulaciones realizadas inicialmente utilizando los datos experimentales de

Montoya *et al.,* (22), mostraron que el modelo desarrollado se ajustaba muy bien al proceso real de secado, pero solo cuando se le daba el valor adecuado de incremento de tiempo (DELT) en la simulación; el inconveniente radicaba en encontrar el valor correcto de DELT. Para que el modelo de simulación desarrollado funcionara correctamente, sin necesidad de encontrar el DELT por tanteos sucesivos manuales, se desarrolló una subrutina (Subrutina CalDelt) que lo calcula automáticamente dentro del mismo programa de simulación (30, 31). Para la implementación de la subrutina se consideraron todos los parámetros que pudieran afectar el valor DELT, tales como:

Características del aire de secado: caudal o flujo de aire y temperatura.
Características del café pergamino: peso específico aparente (densidad aparente), contenido de humedad y temperatura iniciales.
Características del sistema: dimensiones de la sección de secado (sección transversal y altura), flujo de café pergamino y espesor de la capa delgada de grano.

Con base en un algoritmo reportado por Bakker-Arkema *et al.,* (2) que permite encontrar los valores del incremento de espesor de capa en función del flujo de aire, necesario para la estabilidad de la integración numérica en secadores de capa fija y de flujo cruzado en el modelo MSU, Parra-Coronado (30) obtuvo la Ecuación [17] que estima el espesor de la capa delgada de grano para el secador de flujos concurrentes-IFC, la cual fue utilizada en la subrutina "CalDelt", con excelentes resultados.

$$\frac{1}{\Delta L} = -3{,}03\,\mathrm{Ln}\,(676{,}1035\frac{Q}{A} - 1.798{,}26) + 34{,}857$$

[17]

Donde:
ΔL: Espesor de capa delgada de grano, m.
Q/A: Flujo de aire, $m^3.min^{-1}.m^{-2}$

5.5. Resultados de la validación de los programas de simulación matemática para secado de café pergamino

Para determinar la bondad de los modelos de simulación en la predicción del proceso de secado de café pergamino, se compararon los valores experimentales obtenidos de los secadores reales operados en Cenicafé con los valores obtenidos mediante los programas de simulación. Para la validación se utilizó un análisis gráfico de correspondencia de las variaciones de los contenidos de humedad del café pergamino a lo largo del tiempo de secado, experimentales y simuladas; este análisis permitió observar gráficamente la exactitud de los modelos de simulación, incluyendo las etapas en las cuales los modelos subestiman o sobreestiman el proceso de secado. Estadísticamente se compararon las curvas de secado del grano, mediante correlación lineal entre los resultados experimentales y los simulados.

Para los programas de simulación evaluados, el análisis gráfico de correspondencia de las curvas de secado experimentales y simuladas, así como el análisis estadístico para cada uno de los tipos de secadores, indica que los modelos desarrollados predicen bien el comportamiento del secado del café pergamino (en el 99% de los casos $tc<tt$ en la prueba de dos colas), para un rango de variación del contenido de humedad del café del 56,3% al 8,1% en base húmeda. De igual manera, el coeficiente de determinación "R^2" es superior a 0,93 en el 92% de los casos, y mayor a 0,85 en el 99% de los casos, con un nivel de significación del 5%, lo cual indica que por lo menos el 93% de la variabilidad de los datos obtenidos experimentalmente en el proceso de secado, es explicada por los modelos de simulación.

A continuación se presentan las gráficas comparativas entre los resultados experimentales y los simulados para una

prueba típica de algunos de los secadores estudiados, así como su respectivo análisis.

La Figura 15 presenta los resultados obtenidos experimentalmente por Montenegro (20) y los de simulación desarrollados en este trabajo, para un secador de capa estática (sin cámara de presecado) con inversión del flujo de aire. Se observa que los programas predicen bien el proceso de secado en este tipo de secador, con un contenido de humedad mayor al experimental en 1,9% b.s., máxima diferencia para la capa media, cuando se utiliza el modelo de Thompson, y de 2,8% b.s., máxima diferencia para la capa superior, cuando se utiliza el modelo MSU, para un tiempo de secado de 24 h. La predicción de los datos experimentales mediante el modelo de Thompson está entre el 97% y 99% para las tres capas consideradas durante el ensayo, mientras que para el modelo MSU varía entre 95% y 97%. Durante el proceso, el café redujo su contenido de humedad promedio de 39,1% a 11,2% b.h., cuando se utilizó una capa de café de 0,3 m y un caudal de aire de 7,6 $m^3.min^{-1}.m^{-2}$ (456 $m^3.h^{-1}$) a una temperatura de 39,5°C.

En la Figura 16 se presentan los resultados obtenidos experimentalmente por Correa (6) y por los programas de simulación de Thompson y de MSU para un secador tipo Cenicafé. Las tres gráficas de la izquierda corresponden a la sección de secado y las de la derecha a la sección de pre-secado; se observa que los programas de simulación predicen bien el proceso de secado en este tipo de secador, con un promedio del contenido de humedad - para el grano ubicado en la cámara de secado - mayor al experimental en 3,8% b.s. y 5,4% b.s., para los programas de Thompson y de MSU, respectivamente. Para el grano ubicado en la cámara de presecado, el modelo de Thompson predice un promedio del contenido de humedad final superior al experimental en 0,69% b.s. y el modelo MSU predice un promedio del contenido de humedad final inferior al experimental en 2,47% b.s. Los tiempos de secado son de 22 y 34 h para el grano en la cámara de secado y de presecado, respectivamente. La predicción de los datos experimentales mediante el modelo de Thompson está entre el 95% y 97% para la cámara de secado y entre 92% y 97% para la cámara de presecado. Para el modelo MSU varía entre 94% y 98% para la cámara de secado y entre 85% y 90% para la cámara de presecado. Durante el proceso, el café redujo en promedio su contenido de humedad inicial de 54,2% b.h. a 7,9 y 10,4% b.h. para el grano ubicado en las cámaras de secado y de presecado, respectivamente, cuando se utilizó una altura de capa de café de 0,4 m/cámara y un flujo de aire de 45,25 $m^3.min^{-1}.m^{-2}$ (149,34 $m^3.min^{-1}.t^{-1}$) a una temperatura de 50,6°C, con inversión del sentido del flujo de aire cada 6 h.

En la Figura 17 se presentan los resultados obtenidos experimentalmente y mediante los programas de simulación para un secador de tres cámaras dispuestas verticalmente. Se observa que los programas de simulación predicen adecuadamente el proceso de secado en este tipo de secador. Para el grano ubicado en el primer piso (cámara de secado), los modelos de Thompson y MSU presentan un promedio del contenido de humedad mayor al experimental en 5,1% y 6,1% b.s., respectivamente. Para el grano ubicado en el segundo piso (cámara de presecado 1), el modelo de Thompson predice un promedio de contenido de humedad final superior al experimental en 5,4% b.s. y el modelo MSU predice un promedio del contenido de humedad final superior al experimental en 2,9% b.s. Para el grano ubicado en el tercer piso (cámara de presecado 2), el modelo de Thompson predice un promedio del contenido de humedad final superior al experimental en 4,9% b.s. y el modelo MSU predice un promedio del contenido de humedad final inferior al experimental en 1,9% b.s. Los tiempos de secado son de 15, 22 y 29 h para los granos de café ubicados en el primero, segundo y tercer

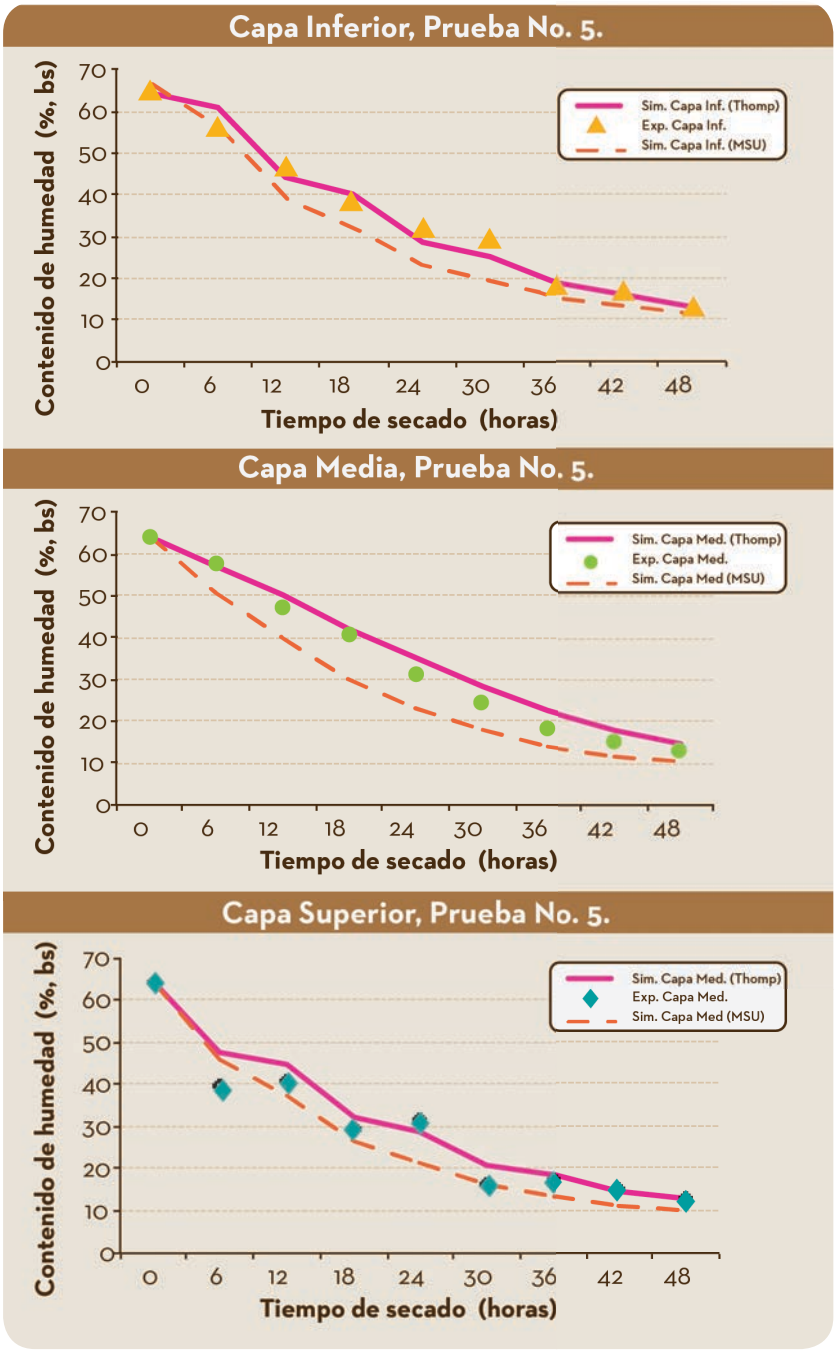


Figura 15. Curvas de secado para un secador de capa estática sin cámara de presecado y con inversión del flujo de aire. Comparación de los resultados obtenidos experimentalmente (20) con los obtenidos por los programas de simulación desarrollados con base en los modelos de Thompson y MSU.

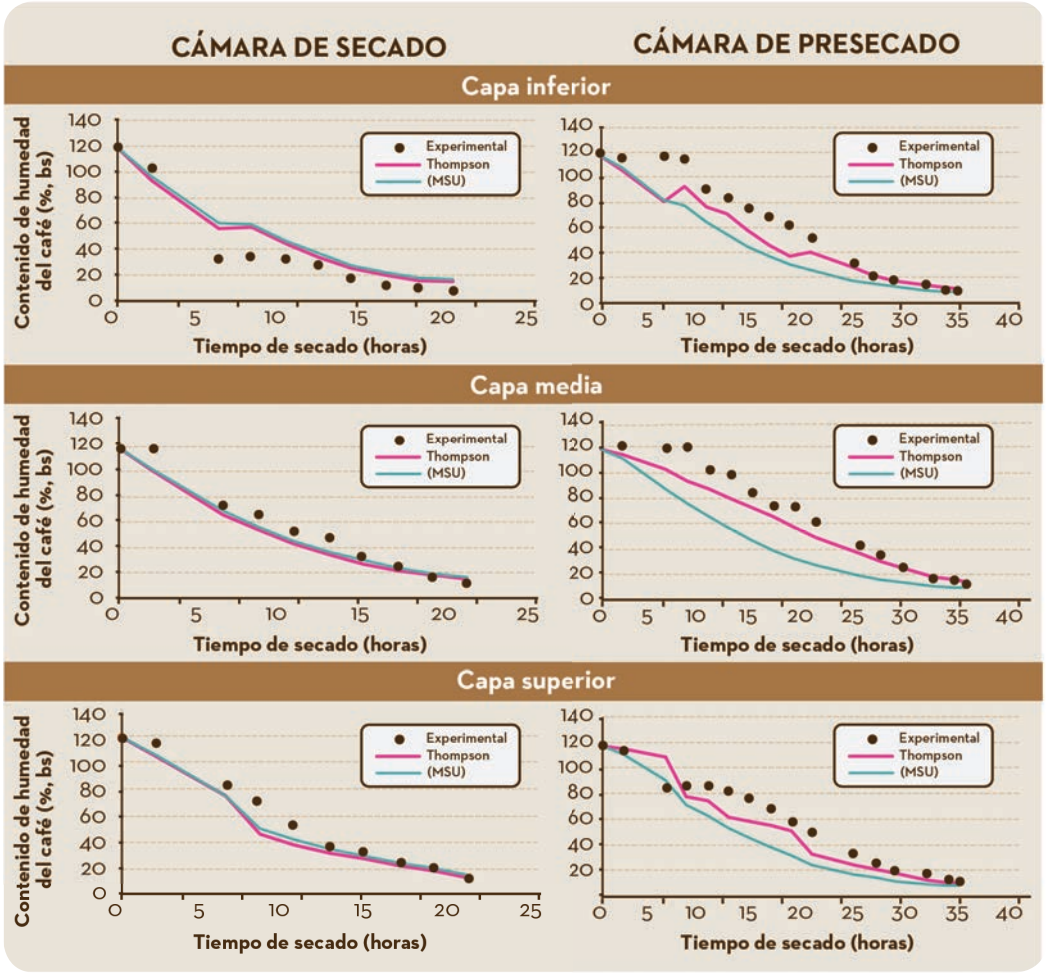


Figura 16. Curvas de secado para un Silo Secador Cenicafé modificado. Comparación de los resultados obtenidos experimentalmente (6) con los registrados por los programas de simulación desarrollados con base en los modelos de Thompson y MSU.

piso, respectivamente. Las predicciones de los datos experimentales mediante el modelo de Thompson son en promedio de 99%, 98,8% y 98,5% para el primero, segundo y tercer piso, respectivamente; para el modelo MSU son de 99%, 98% y 96% para el primero, segundo y tercer piso, respectivamente. Durante el proceso de secado el café redujo en promedio su contenido de humedad inicial de 55,1% a 11,6% b.h. para los granos ubicados en los tres pisos (cámaras de secado y de presecado), cuando se utilizó una altura de la capa de café de 0,13 m en cada cámara y un flujo de aire de 31,41 $m^3.min^{-1}.m^{-2}$ a una temperatura de 53,0°C, con un tiempo de traslado del grano de una cámara a otra de 4 h (Tipo de manejo: secuencial).

Las diferencias en los resultados obtenidos con cada uno de los modelos se deben fundamentalmente a que el modelo de Thompson es un modelo de equilibrio, mientras que el modelo MSU es de no-equilibrio; además los intervalos de simulación utilizados con fines de estabilidad y convergencia de los programas son diferentes, es así como el

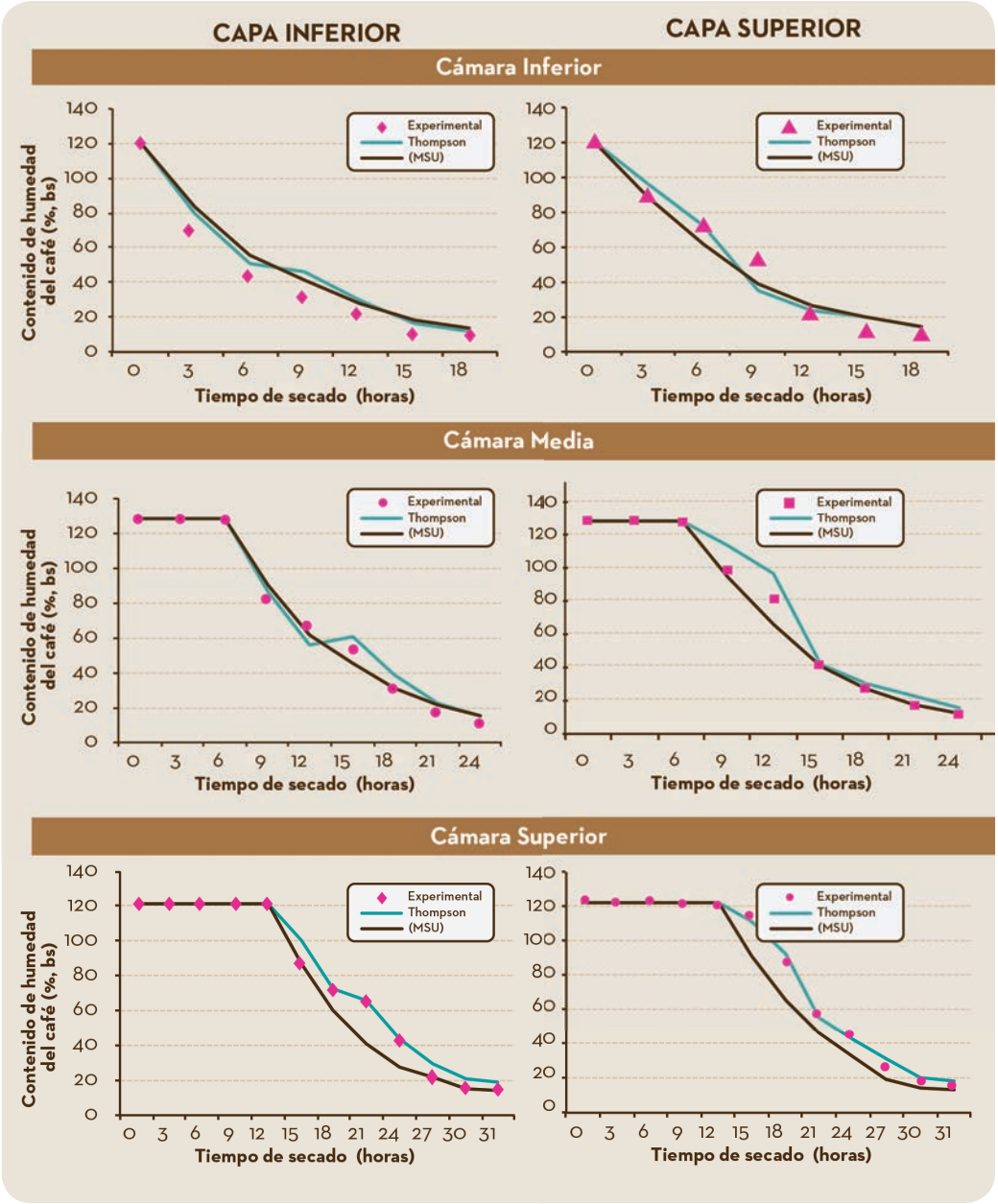


Figura 17. Curvas de secado para un secador de tres cámaras (pisos). Comparación de los resultados obtenidos experimentalmente (29) y con los modelos de Thompson y MSU. Prueba No. 2. Manejo secuencial

modelo de Thompson utiliza incrementos de tiempo de simulación de 1,0 h, mientras que el modelo MSU utiliza incrementos de 0,01 h.

La Figura 18 presenta los resultados obtenidos experimentalmente y mediante los programas de simulación desarrollados para un secador intermitente de flujos concurrentes "Cenicafé-IFC", con una

altura de la columna de secado de 0,87 m y sección transversal de 0,7 m x 0,7 m (Prueba No. 2). Se observa que los dos programas de simulación predicen adecuadamente el proceso de secado en este tipo de secador. El programa desarrollado con base en el modelo de Thompson predice un contenido de humedad final del grano inferior al experimental en 0,5% b.s., mientras que el programa desarrollado con base en los modelos Thompson- MSU predice un contenido de humedad final del grano superior al experimental en 1,4% b.s., para un tiempo de secado de 32,5 h. Durante el proceso, el café redujo en promedio su contenido de humedad de 52,4% b.h. (1,10 b.s.) a 11,1% b.h. (0,125 b.s.), cuando se utilizó un flujo de café de 1.200 $kg.h^{-1}.m^{-2}$ y un caudal de aire de 48 $m^3.min^{-1}.m^{-2}$ (1.411,2 $m^3.h^{-1}$) a una temperatura de aire de secado de 87°C.

De acuerdo con los resultados obtenidos durante la validación de los programas de simulación de secado de café pergamino desarrollados con base en los modelos de Thompson y MSU, puede concluirse que éstos se ajustan a los resultados experimentales para secadores de capa estática y para el secador intermitente de flujos concurrentes "Cenicafé-IFC"; los modelos pueden utilizarse como una herramienta muy útil para predecir el comportamiento del grano durante el proceso de secado, y por tanto, para diseñar nuevos secadores, de cualquier capacidad requerida.

5.6 Selección del programa de simulación para cada uno de los secadores utilizados para café pergamino

Aunque los programas desarrollados para los diferentes tipos de secadores de capa estática (uno con base en el modelo de Thompson y otro con base en el modelo MSU) predicen adecuadamente el proceso de secado de café pergamino, éstos muestran diferencias en los tiempos totales de secado (Tablas 1, 2 y 3), las cuales se deben fundamentalmente a los principios básicos de cada uno de los modelos utilizados.

De la Tabla 1 puede deducirse que para los secadores de capa estática sin cámara de presecado el modelo de Thompson predice el secado del café pergamino con mayor exactitud, teniendo en cuenta las diferencias absolutas entre los tiempos de secado simulados y experimentales, que son el 8,6%, frente al 16,9% del modelo MSU. Considerando que la diferencia del 8,6% del modelo de Thompson se presenta en forma reiterativa, podría indicarse que los tiempos de secado encontrados mediante el modelo de Thompson, son 8,6% mayores que los reales, por lo cual los valores encontrados mediante simulación podrían ser corregidos por este factor, si se desea obtener una mejor precisión de estimación del tiempo de secado total, para este caso en particular. Sin embargo, es importante

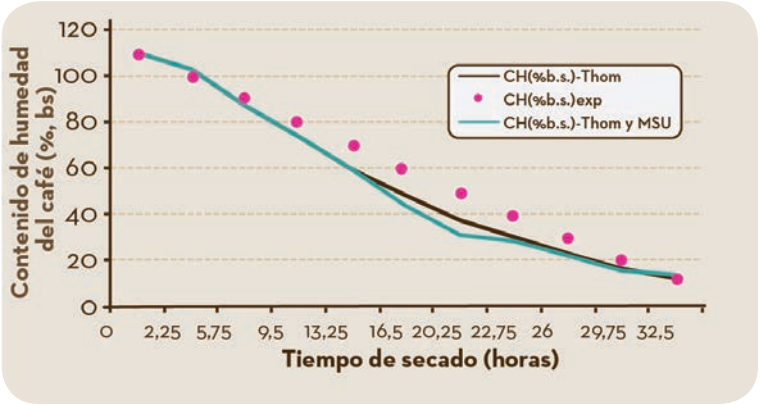


Figura 18. Curvas de secado para un secador intermitente de flujos concurrentes para café, "Cenicafé-IFC". Comparación de los resultados obtenidos experimentalmente (22) y los obtenidos con los programas de simulación desarrollados (Prueba No.2).

tener presente que la mayor utilidad de las simulaciones matemáticas, la mayoría de las veces, se da en estudios de tendencias, visualizaciones, diseños, comparaciones, sensibilidad, para lo cual los modelos desarrollados, sin correcciones, se consideran muy adecuados.

De la Tabla 2 puede deducirse que para el Silo Secador "Cenicafé" y para el silo secador vertical (dos pisos), el programa que predice el secado del café pergamino con mayor exactitud, teniendo en cuenta las diferencias absolutas entre los tiempos de secado simulados y los experimentales, es el desarrollado con base en el modelo MSU, ya que presenta una diferencia absoluta en el tiempo total de secado de 2,81%, frente a 12,56% del modelo de Thompson. Los tiempos de secado encontrados mediante el modelo MSU exceden a los experimentales en 12,3% y 2,81% para las cámaras de secado y de presecado, respectivamente, por lo cual los valores encontrados mediante simulación deben corregirse por estos factores, si se quiere hacer un mejor uso de ellos.

De la Tabla 3 puede deducirse que para el secador de tres cámaras, el programa que predice el secado del café pergamino con mayor exactitud, teniendo en cuenta las diferencias absolutas entre los tiempos de secado simulados y experimentales, es el desarrollado con base en el modelo MSU, ya que presenta una diferencia absoluta en el tiempo total de secado de 3,62% frente a 10,88% del modelo de Thompson. Los tiempos de secado encontrados mediante el modelo MSU exceden a los experimentales en 27,01% y 8,42% para el primero y segundo piso, respectivamente, mientras que para el tercer piso son inferiores a los experimentales en 3,62%. Si se requiere utilizar los resultados de simulación con mayor exactitud, los tiempos de secado encontrados mediante el programa deben corregirse por los factores anteriores para

Tabla 1. Tiempo de secado y diferencias absolutas entre los tiempos experimentales y simulados para secadores de capa estática sin cámara de presecado.

Prueba	Tiempo de secado (h)			Diferencia absoluta			
				Thompson		MSU	
	Exp.	Thom.	MSU	Horas (h)	%	Horas (h)	%
Carro secador modificado para secado mecánico							
1	24,0	26,0	27,2	2,0	8,33	3,2	13,33
2	20,0	20,0	20,6	0,0	0,00	0,6	3,00
3	24,0	26,0	29,0	2,0	8,33	5,0	20,83
4	24,0	28,0	31,5	4,0	16,67	7,5	31,25
5	24,0	26,0	26,5	2,0	8,33	2,5	10,42
6	20,0	18,0	22,9	2,0	10,00	2,9	14,50
Secador de capa estática con inversión del flujo de aire							
1	60,0	63,0	45,4	3,0	5,00	14,6	24,33
4	60,0	67,0	50,7	7,0	11,67	9,3	15,50
5	48,0	50,0	39,0	2,0	4,17	9,0	18,75
CEN 1*	24,0	26,0	28,0	2,0	8,33	4,0	16,67
CEN 2*	27,0	30,0	32,0	3,0	11,11	5,0	18,52
CEN 3*	27,0	30,0	31,1	3,0	11,11	4,1	15,19
Promedio general					**8,60[e]**		**16,90**

[e] Diferencias por exceso (tiempos encontrados mediante simulación, con valores mayores que los experimentales).
* Corresponde únicamente a los datos de la cámara de secado del Silo Secador Cenicafé.

cada una de las tandas (tanda 1: ubicada en el primer piso; tanda 2: ubicada en el segundo piso y tanda 3: ubicada en el tercer piso).

Para el secador intermitente de flujos concurrentes Cenicafé-IFC, el mejor programa para predecir el secado del café pergamino es el desarrollado con base conjunta en los dos modelos de simulación (Thompson y MSU), ya que además de predecir el proceso de secado simula el proceso de reposo del grano. El tiempo de reposo de los granos es el tiempo en que ellos no están sometidos a las corrientes del aire caliente, y permiten, evitando pérdidas de energías térmicas y mecánicas, que la humedad interna de los granos se traslade por difusión hacia las superficies externas, facilitando su extracción por efecto de las nuevas corrientes de aire caliente, en el nuevo ciclo de secado. El tiempo de reposo debe ser bien estimado para poder dimensionar correctamente los secadores Cenicafé-IFC, e indicar la mejor manera de operarlos. El programa desarrollado con base en el modelo de Thompson predice bien el proceso de secado del grano, pero no puede disponer de una ecuación de difusión que represente adecuadamente el proceso de reposo, razón por la cual no puede simular algún estado del grano que contemple la difusión del agua dentro del grano, es por esto que presenta limitaciones para el dimensionamiento de estos secadores.

5.7. Aplicación de los modelos de simulación desarrollados con base en los modelos de Thompson y de Michigan (MSU) para secado de café pergamino

Con base en los análisis anteriores, se desarrolló un programa unificado de simulación matemática de secado de café pergamino, conformado con las mejores opciones de los programas de Thompson, MSU y Thompson-MSU, para cada uno de los secadores estudiados. El programa está conformado por 22 subrutinas para el

Tabla 2. Tiempo de secado y diferencias absolutas entre los tiempos experimentales y simulados para el Silo Secador Cenicafé y el silo secador vertical.

Prueba	Tiempo de secado (h)			Diferencia absoluta			
				Thompson		MSU	
	Exp.	Thom.	MSU	Horas (h)	%	Horas (h)	%
Cámara de secado							
1	20,0	20,0	20,8	0,0	0,00	0,8	4,00
2	18,0	19,0	20,8	1,0	5,56	2,8	15,56
3	17,0	18,0	18,8	1,0	5,88	1,8	10,59
4	21,0	23,0	25,0	2,0	9,52	4,0	19,05
Promedio					5,24[e]		12,30[e]
Cámara de presecado**							
1	24,0	27,0	25,2	3,0	12,50	1,2	5,00
2	23,0	26,0	23,3	3,0	13,04	0,3	1,30
3	23,0	25,0	23,5	2,0	8,70	0,5	2,17
4	25,0	29,0	25,7	4,0	16,00	0,7	2,80
Promedio					12,56[e]		2,81[e]

[e] Diferencias por exceso (tiempos encontrados mediante simulación, con valores mayores que los experimentales).

** Los tiempos de secado del grano ubicado en la cámara de presecado, corresponden al tiempo total de secado del café ubicado en el secador.

Tabla 3. Tiempo de secado y diferencias absolutas entre los tiempos experimentales y simulados para el secador de tres pisos

Prueba	Tiempo de secado (h)			Diferencia absoluta			
				Thompson		MSU	
	Exp.	Thom.	MSU	Horas (h)	%	Horas (h)	%
Primer piso (cámara de secado)							
1	17,0	21,0	23,5	4,0	23,53	6,5	38,23
2	15,0	18,0	19,4	3,0	20,00	4,4	29,33
3	18,0	21,0	21,6	3,0	16,67	3,6	20,00
4	21,0	23,0	25,3	2,0	9,52	4,3	20,48
Promedio					17,43[e]		**27,01[e]**
Segundo piso (cámara de presecado 1)							
1	22,0	24,0	23,1	2,0	9,09	1,1	5,00
2	22,0	26,0	25,4	4,0	18,18	3,4	15,45
3	24,0	28,0	25,8	4,0	16,67	1,8	7,50
4	26,0	28,0	27,5	2,0	7,69	1,5	5,76
Promedio					12,91[e]		**8,42[e]**
Tercer piso (cámara de presecado 2)**							
1	28,0	30,0	26,4	2,0	7,14	1,6	5,71
2	29,0	33,0	29,2	4,0	13,79	0,2	0,69
3	31,0	35,0	31,1	4,0	12,90	0,1	0,32
4	31,0	34,0	28,6	3,0	9,68	2,4	7,74
Promedio					10,88[e]		3,62[d]

[e] Diferencias por exceso (tiempos encontrados mediante simulación, con valores mayores que los experimentales).
[d] Diferencias por defecto (tiempos encontrados mediante simulación, con valores menores que los experimentales).
** Los tiempos de secado de los granos de café ubicados en el tercer piso (cámara de presecado 2), corresponden al tiempo total de secado del café ubicado en el secador.

secador intermitente de flujos concurrentes Cenicafé-IFC y de 27 subrutinas para los secadores de capa estática. En total se realizaron 753 simulaciones para todas las condiciones de secado, distribuidas así:

- Para el secador de capa estática sin cámaras de presecado, se realizaron 272 simulaciones.
- Para el Silo Secador Cenicafé y silo secador vertical se realizaron 212 simulaciones.
- Para el secador de tres cámaras (pisos) se realizaron 117 simulaciones.
- Para el secador intermitente de flujos concurrentes Cenicafé-IFC, se realizaron en total 152 simulaciones.
- Para el secador de tres cámaras, las simulaciones se realizaron con dos tipos de manejo. El primer manejo o simultáneo, consistió en cargar las tres capas simultáneamente, tomando la precaución de secar el café de la cámara de secado, con inversiones de la dirección del flujo del aire para uniformizar su contenido de humedad final. En el segundo tipo de manejo o manejo secuencial, se cargó inicialmente la segunda cámara de presecado (cámara superior) y cuando el promedio del café estuvo seco de agua, éste se trasladó a la primera cámara de presecado (cámara media), y se cargó nuevamente la cámara superior; de forma similar, se trasladó el café de la cámara media a la inferior, y de la superior a la media, y se cargó la capa superior cuando el café de la cámara superior estuvo seco de agua. A partir de este momento el sistema entró en régimen normal.

De manera general, se observa que el tipo de manejo simultáneo presentó tiempos de secado similares al tipo de manejo secuencial; además, se registraron mayores coeficientes de variación del contenido de humedad final del grano (menor uniformidad para las tandas 2 y 3) que el tipo de manejo secuencial, por lo que requiere de un mecanismo para la inversión del flujo de aire. Por estas razones, es más aconsejable el tipo de manejo secuencial.

5.7.1. Operación adecuada de secadores de capa estática

A continuación se indica la manera de usar los diagramas obtenidos por simulación matemática, para los diferentes tipos de secadores mecánicos utilizados para café pergamino, para lo cual se toma como ejemplo la operación de un Silo Secador Cenicafé o silo secador vertical, con 0,4 m de altura de capa de café pergamino húmedo, tanto para la cámara de secado como para la cámara de presecado. El ventilador suministra un caudal de aire de 30 $m^3.min^{-1}.m^{-2}$ y la temperatura del aire de secado se mantiene en promedio en 50°C.

5.7.2. Determinación del tiempo de secado

En las Figuras 19 y 20 se presentan los tiempos finales de secado en función del caudal de aire y del espesor de la capa de café, para los granos ubicados en la cámara de secado y en la cámara de presecado. En los diagramas la curva correspondiente al espesor capa de grano de 0,4 m (localizada en la parte superior de los diagramas) y el valor del caudal de aire de 30 $m^3.min^{-1}.m^{-2}$, se encuentra un tiempo de secado para los granos ubicados en la cámara de secado de 23 h y de 32 h para los granos ubicados en la cámara de presecado (el grano en la cámara de presecado sale del secador 8 h después que el café ubicado inicialmente en la cámara de secado).

5.7.3. Capacidad dinámica de secado y eficiencia térmica del secador (estimadas)

En las Figuras 21 y 22 se presentan la capacidad dinámica de secado y la eficiencia térmica global en función del

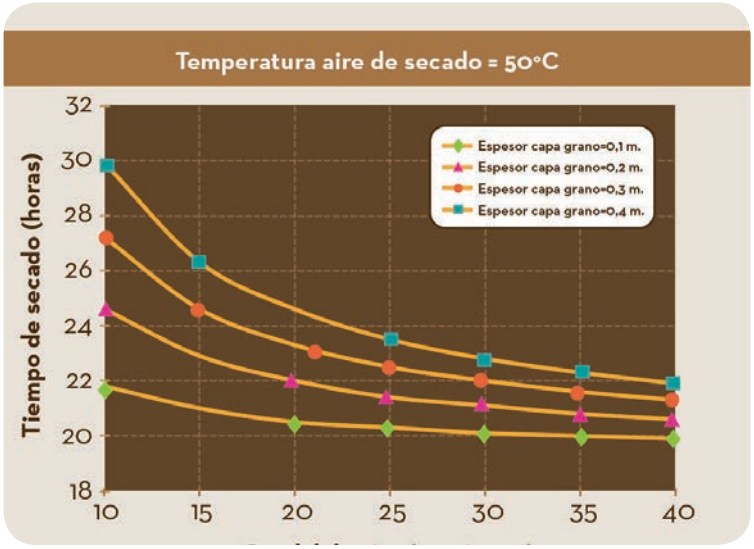


Figura 19. Tiempos de secado para el Silo Secador Cenicafé y silo secador vertical (dos pisos) en función del caudal de aire y del espesor de la capa de grano para el café ubicado en la cámara de secado.

caudal de aire y del espesor de la capa de grano, respectivamente, para el Silo Secador Cenicafé y el silo secador vertical de dos pisos. Al localizar en los diagramas la curva correspondiente a espesor de la capa de grano = 0,4 m (localizada en la parte superior de los diagramas) y el valor del caudal de aire de 30 $m^3.min^{-1}.m^{-2}$, se encuentra que el sistema de secado tiene una capacidad dinámica estimada de 4,4 $kg.h^{-1}.m^{-2}$ y una eficiencia térmica global estimada del 22%.

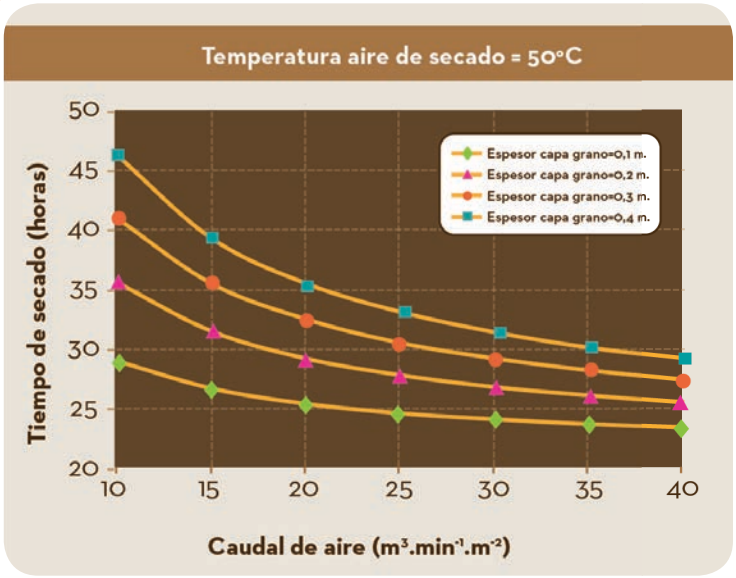


Figura 20. Tiempos de secado calculados para el Silo Secador Cenicafé y Silo secador vertical en función del caudal de aire y del espesor de la capa de grano para el café ubicado en la cámara de presecado.

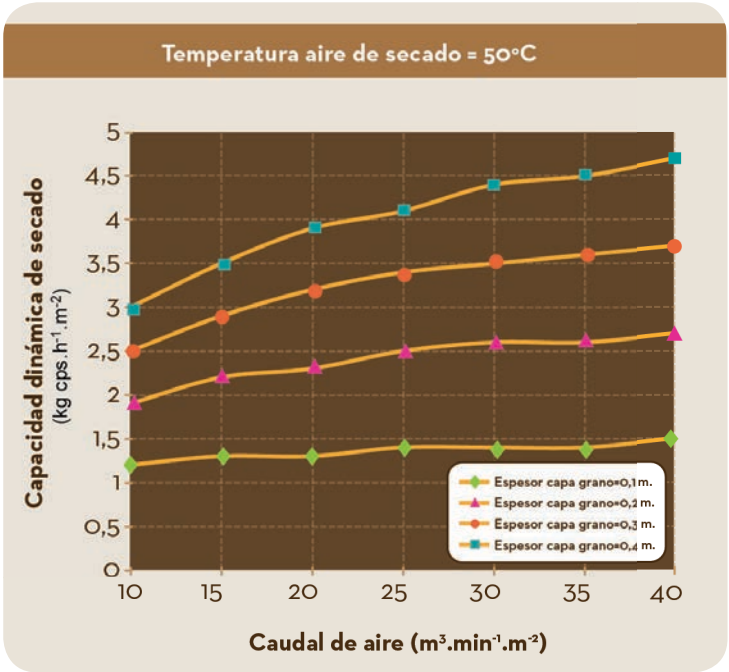


Figura 21. Cálculo de la capacidad dinámica del Silo Secador Cenicafé y el silo secador vertical. Capacidad dinámica de secado estimada en función del caudal de aire utilizado y del espesor de la capa de grano.

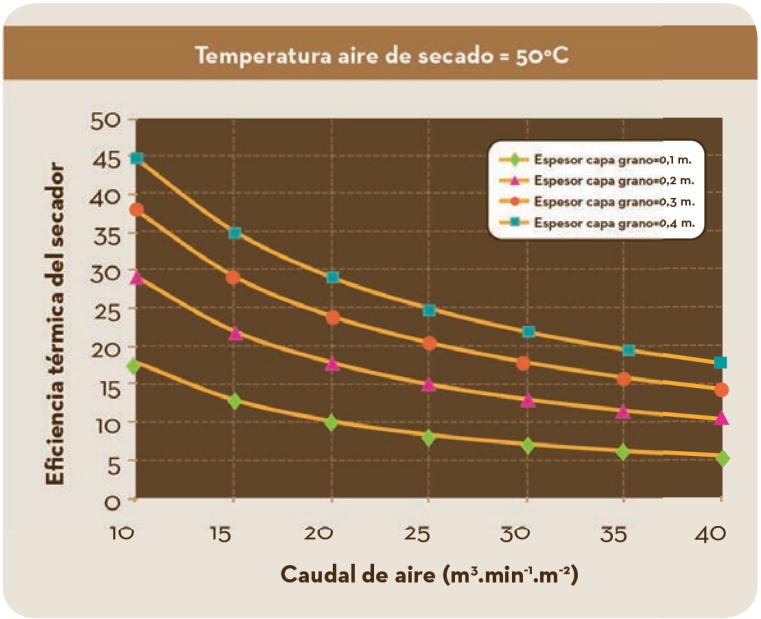


Figura 22. Cálculo de la eficiencia térmica global del Silo Secador Cenicafé y del silo secador vertical en función del caudal de aire utilizado y del espesor de la capa de grano.

5.7.4. Intervalo de tiempo adecuado para la inversión del sentido del flujo de aire

En la Tabla 4 se presenta la información correspondiente a los intervalos de tiempo más adecuados, junto con el coeficiente de variación del contenido de humedad final en porcentaje (%), para realizar la inversión del sentido del flujo de aire en el Silo Secador tipo Cenicafé, de tal manera que se logre obtener un producto con uniformidad en el contenido de humedad final dentro del rango de 10% a 12% b.h.. Es así como para un caudal de aire de 30 $m^3.min^{-1}.m^{-2}$ y un espesor de capa de grano de 0,4 m en cada una de las cámaras (secado y presecado), el intervalo de tiempo más adecuado para realizar la inversión del sentido del flujo de aire está entre 4 y 14 h. Por tanto, puede realizarse la inversión del sentido del flujo de aire cada 8, 10 ó 12 h, según la conveniencia del operario.

5.7.5 Incremento del tiempo de secado cuando la temperatura del aire es inferior a 50°C

Si la temperatura del aire de secado no es de 50°C sino de 40°C, se obtiene una mayor uniformidad en el contenido de humedad final del grano (disminuye el coeficiente de variación), pero aumenta el tiempo de secado. La Figura 23 permite determinar el valor en el cual se incrementa el tiempo de secado (para los granos en las cámaras de secado y de presecado), cuando la temperatura del aire de secado es inferior a 50°C. De acuerdo con el diagrama, para una temperatura de 40°C el tiempo de secado se incrementa en 17 y 20 h para las cámaras de secado y de presecado, respectivamente. En otros términos, si el tiempo de secado a 50°C es de 23 y 31 h para el grano ubicado en las cámaras de secado y de presecado, respectivamente, éstos se incrementan a 40 y 51 h cuando se utiliza una temperatura del aire de secado de 40°C.

Los resultados obtenidos mediante el programa unificado de simulación permiten presentar las siguientes tendencias generales para los diferentes secadores de capa estática utilizados para café pergamino:

- A medida que aumenta el caudal de aire y disminuye el espesor de la capa de grano, los tiempos de secado se hacen menores (Figuras 19 y 20). El contenido de humedad final del grano es más uniforme (disminuye el coeficiente de variación), los tiempos óptimos de inversión del flujo de aire se hacen menores (Tabla 4) y la eficiencia térmica global del secado disminuye (aprovechamiento menos eficiente de la energía utilizada para el secado) (Figura 22).

- La capacidad dinámica de secado aumenta a medida que aumentan el caudal de aire y el espesor de la capa de grano en cada cámara del secador, lo cual es más notorio para espesores de capa superiores a 0,2 m (Figura 21), razón por la que no es muy aconsejable operar los secadores estáticos con espesores de capa de grano inferiores a 0,2 m, si no se dispone de tecnología para ajustar el caudal específico de aire y mantenerlo cercano a 100 $m^3.min-1.t^{-1}$ de café seco, con cualquier altura de capa de granos.

Tabla 4. Manejo óptimo del silo secador "Cenicafé" y del silo secador vertical (dos pisos) según los intervalos de tiempo (en horas) más adecuados para la inversión del sentido del flujo de aire.

Caudal de aire ($m^3.min^{-1}.m^{-2}$) \ Espesor capa de grano (m)	0,4	0,3	0,2	0,1
10	6 - 9 (4,8 – 9,7)*	4 - 8 (3,3 – 7,5)	4 – 12 (2,2 – 6,5)	4 – 12 (0,7 – 4,2)
15	4 – 8 (3,3 – 6,3)	4 – 12 (2,2 – 6,6)	4 – 14 (1,0 – 6,6)	4 – 16 (0,1 – 5,2)
20	4 – 12 (2,1 – 6,6)	4 – 14 (1,0 – 6.9)	4 – 16 (0,8 – 7,2)	Sin Inversión (4,7 – 5,6)
25	4 – 14 (1,5 – 7,0)	4 – 14 (0,8 – 6,4)	4 – 16 (0,9 – 6,3)	Sin Inversión (3,9 – 4,5)
30	4 – 14 (0,9 – 6,7)	4 – 16 (0,8 – 7,2)	4 – 18 (0,3 – 6,2)	Sin Inversión (3,3 – 3,8)
35	4 – 14 (0,7 – 6,3)	4 – 16 (0,9 – 6,6)	Sin Inversión (5,7 – 6,7)	Sin Inversión (2,9 – 3,3)
40	4 – 16 (0,8 – 7,3)	4 – 18 (0,4 – 6,8)	Sin Inversión (5,1 – 5,9)	Sin Inversión (2,5 – 2,9)

El intervalo de tiempo para la inversión del flujo de aire varía entre 4 y 8 h
El intervalo de tiempo para la inversión del flujo de aire varía entre 4 y 12 h
El intervalo de tiempo para la inversión del flujo de aire varía entre 4 y 14 h
El intervalo de tiempo para la inversión del flujo de aire varía entre 4 y 16 h
El intervalo de tiempo para la inversión del flujo de aire varía entre 4 y 18 h
No debe realizarse la inversión del sentido del flujo de aire

Notas: El silo secador vertical (dos pisos) opera con la misma tabla para la cámara de secado (primera tanda o carga). Al pasar el grano que se encuentra en la cámara de presecado a la cámara de secado; deben invertirse las capas de grano y no realizar inversión del flujo de aire posteriormente.

A menor tiempo de inversión del flujo de aire menor es el coeficiente de variación del contenido de humedad final (mayor uniformidad en el contenido de humedad final del grano). Para coeficientes de variación menores a 7,3%, el contenido de humedad final del grano se encuentra en el rango de 10% a 12% b.h.

- En las simulaciones realizadas se observaron las siguientes características para los secadores intermitentes de flujos concurrentes Cenicafé-IFC:

- Cuando se realizaron simulaciones con alturas de la cámara de secado superiores a 0,65 m, se observó que ocurrían variaciones mínimas en el contenido de humedad y temperatura final del grano, así como en el tiempo total de secado. Este mismo comportamiento fue observado por Montoya *et al.,* (26), para una altura de la columna de secado de 0,6 m, quienes sugieren una altura adecuada de columna de secado de 0,65 m. Se recomienda usar la mínima altura (0,65m) para disminuir los requerimientos de potencia del ventilador.

- Las simulaciones mostraron que existen diferentes combinaciones de caudal de aire y temperatura del aire de secado, bajo las cuales el secador opera más eficientemente, para entregar el grano con una temperatura inferior o igual a 50°C al final del secado. Para las diferentes combinaciones de flujo y temperatura del aire de secado se obtuvieron diferencias máximas absolutas de 4 h en los tiempos totales de secado. De acuerdo con los resultados obtenidos con el modelo de simulación, puede utilizarse cualquiera de las combinaciones de flujo y temperatura del aire de secado, con el fin de obtener café pergamino seco con temperaturas inferiores a 50°C y contenidos finales de humedad entre 10% y 12% b.h.

- De las combinaciones de flujo y temperatura del aire de secado que se consideran adecuadas para dimensionar y operar un secador intermitente de flujos concurrentes Cenicafé-IFC, aquella que arroja los mejores resultados al variar los flujos de café húmedo a través del secador, es la correspondiente a una temperatura del aire de secado de 80°C y un flujo de aire de 50 $m^3.min^{-1}.m^{-2}$, con las siguientes condiciones para la operación del secador, cuando el contenido de humedad del café se reduce de 54,0% a 10,5% b.h. (29, 31):

Temperatura del aire de secado : 80°C

Flujo de aire : 50 $m^3.min^{-1}.m^{-2}$

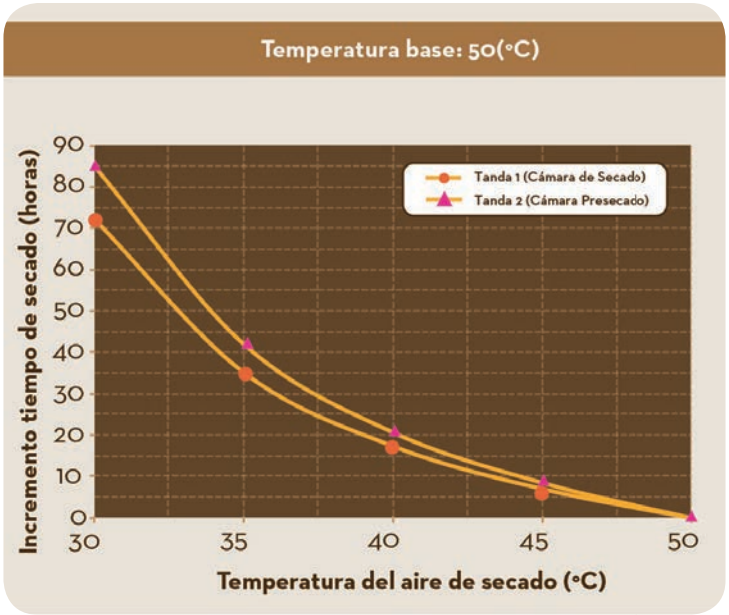


Figura 23. Incremento del tiempo de secado en el Silo Secador Cenicafé y en el silo secador vertical en función de temperaturas del aire inferiores a 50°C.

Flujo de café pergamino	:800 $m^3.h^{-1}m^{-2}$
Longitud de la columna de secado	: 0,65 m
Longitud sección de reposo (para índice de redistribución de 0,75)	: 1,2 m
Tiempo estimado de secado	: 23,5 h
Número de vueltas (veces que el grano pasa por la sección de secado	: 14

Control de la temperatura y del caudal del aire en los secadores de capa fija de café pergamino utilizados en Colombia

En capítulos anteriores se han presentado con detalle los modelos matemáticos para el secado del café pergamino, para simular la dinámica del proceso de secado cuando los granos de café son sometidos a diferentes condiciones de flujo y temperatura de aire, y se ha demostrado su capacidad de predecir con muy buena exactitud el desempeño de los secadores utilizados para el secado del café pergamino en Colombia. A partir de estos resultados se proponen condiciones de operación de los equipos que permitan obtener un producto final con mayor uniformidad de humedad, en menor tiempo, con mejor aprovechamiento de las energías eléctrica y térmica.

En este capítulo se describe el comportamiento mecánico de los sistemas de secado desde el punto de vista de sus partes integrales principales, el ventilador y el generador del aire caliente, para que el aire de secado presente las mejores características para obtener un buen secado de café. Adicionalmente, se presenta un sistema de control automático que permite optimizar la energía eléctrica y el consumo de combustible con cualquier altura de capa de granos que sea colocada en el secador, para obtener café seco con

alta uniformidad de la humedad y costo unitario ($/kg) similar al obtenido cuando el secador se emplea a máxima capacidad.

6.1 Componentes de un secador mecánico

Un sistema de secado mecánico comprende un ventilador, un dispositivo para el calentamiento del aire, el cuerpo del secador donde se encuentran las cámaras que contienen el café mientras pierde humedad y una serie de accesorios como ductos y compuertas, entre otros, que conducen y direccionan el aire. La Figura 24 muestra un esquema de un sistema de secado mecánico y sus partes principales.

6.1.1. Ventiladores

Un ventilador es una turbomáquina que convierte la energía mecánica de un motor en energía neumática (presión y caudal), a través de un rotor con aspas o álabes, que le imprimen energía cinética al aire. El ventilador es el componente encargado de suministrar el aire con las condiciones de caudal y presión estática requeridas, con aprovechamiento eficiente de la potencia suministrada por el sistema motriz.

Los ventiladores centrífugos, en los cuales el aire entra paralelo al eje del rotor y sale expulsado de manera perpendicular (Figura 25), son los más usados en el proceso de secado de granos, mientras que los ventiladores axiales son usados solamente en aplicaciones donde las capas son más delgadas, ya que son aptos solamente para caudales altos a presiones bajas. Cuando el rotor gira, el aire entra a través de la abertura central de la carcasa, paralelo al eje del rotor, por efecto de la presión negativa que se genera en la base de los álabes. Los ventiladores centrífugos se clasifican según la curvatura y disposición de los álabes, en ventiladores centrífugos de álabes inclinados hacia adelante, de álabes radiales y de álabes inclinados hacia atrás. En general, los ventiladores más usados en secado de granos son los de rotor con álabes inclinados hacia

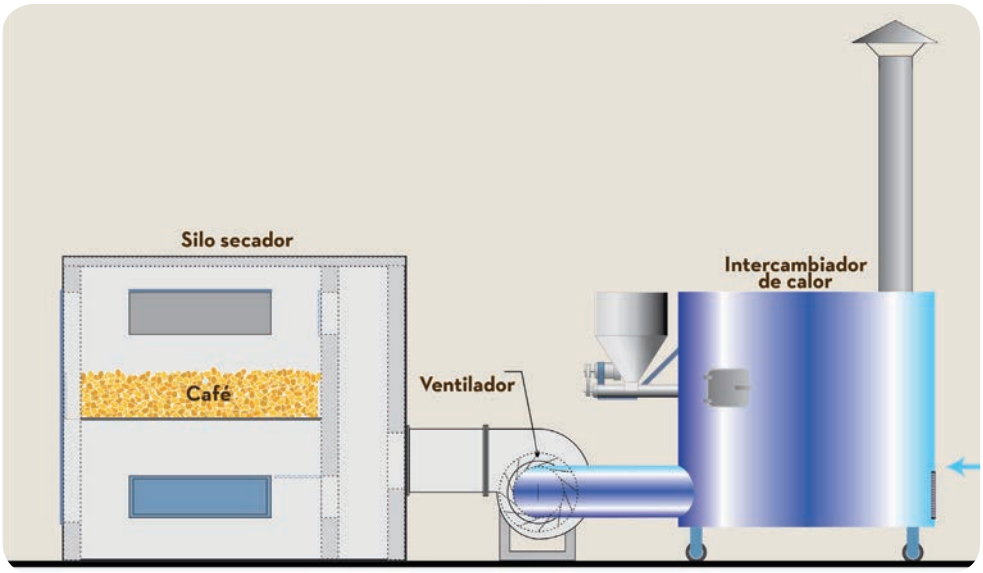


Figura 24. Componentes principales de un secador mecánico

Figura 25. Ventilador centrífugo.

atrás, porque tienen la mayor eficiencia estática. Los de rotor con álabes radiales o inclinados hacia adelante se usan en menor medida porque presentan sobrecarga a altas presiones y mayor nivel de ruido.

En la selección de un ventilador deben tenerse en cuenta el caudal de aire necesario y las pérdidas totales de presión del sistema, conformadas por las caídas de presión a través del intercambiador de calor, la capa de granos, las compuertas, los cambios bruscos de dirección y los ductos, en general. Adicionalmente, en la selección de un ventilador existen otros factores para tener en cuenta, como la eficiencia mecánica y el nivel de ruido, para lo que es importante el balanceo estático y dinámico de los rotores y su configuración. La inadecuada selección del ventilador conduce a tiempos excesivos de secado, desuniformidad en la humedad final del café y alto consumo de combustible.

Las relaciones entre el caudal y la presión de un ventilador centrífugo típico se representan en el diagrama de la Figura 26. La mayor presión del aire a la salida del ventilador se presenta cuando el caudal es prácticamente cero, lo que se lograría al tener la salida completamente cerrada, y el caudal aumenta a medida que se disminuye la resistencia al paso del aire. También se observa que pueden lograrse grandes cambios en el caudal con pequeños cambios en la presión. Este efecto es menos notorio cuando los caudales son altos.

6.1.2. Generadores de aire caliente

El generador de aire caliente o intercambiador de calor es un sistema mecánico por medio del cual el aire aumenta su temperatura al entrar en contacto con las superficies calentadas por la quema de un combustible, sea sólido,

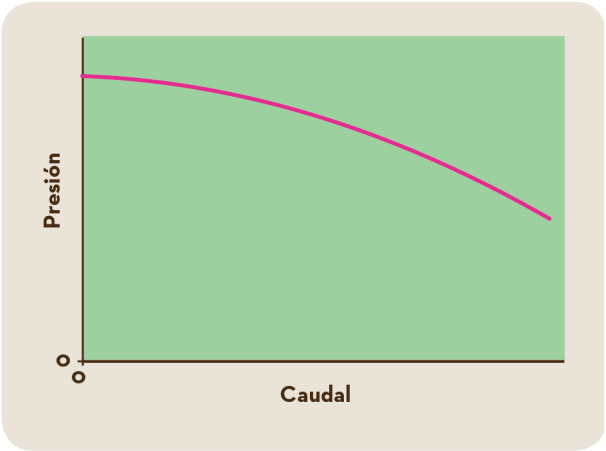


Figura 26. Curva característica de un ventilador centrífugo.

líquido o gaseoso. El aire que se está calentando no debe entrar en contacto con los productos de la combustión, para que no haya contaminación del producto al secarse. El intercambio de calor debe ser lo más eficiente posible, con el fin de que el gasto de combustible y el ruido sean los menores posibles.

La Figura 27 presenta un esquema de un generador de aire caliente y sus principales partes. El generador está constituido por una tolva de almacenamiento de combustible sólido, un alimentador de tornillo sinfín, el hogar donde se efectúa la combustión, un sistema de ductos metálicos que conforman el intercambiador de calor, un conducto para los productos de la combustión y una entrada y una salida de aire caliente hacia el ventilador. El intercambiador de calor es de tipo pirotubular, porque los gases calientes son conducidos por un único tubo, en este caso particular, y de tipo contracorriente porque el flujo de los gases calientes es en sentido contrario al flujo del aire. Para aumentar el área de transferencia de calor, el intercambiador debe tener aletas soldadas (no mostradas en la figura) a las superficies calientes. Además, es recomendable incluir elementos como el tabique (Figura 27), para promover la turbulencia del aire y así hacer aún más eficiente el intercambio.

6.2. Pérdidas de presión a través de un sistema de secado

El aire al pasar por cada uno de los componentes del secador mencionados anteriormente, experimenta pérdidas de presión que deben ser tenidas en cuenta para lograr el cálculo correcto del caudal

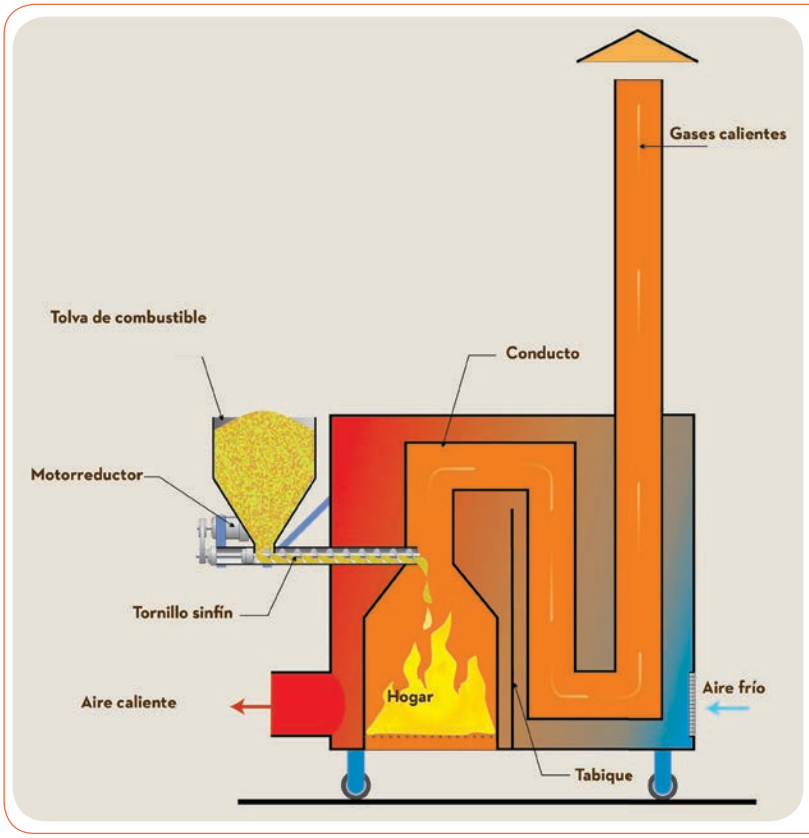


Figura 27. Esquema de un generador de aire caliente o intercambiador de calor para el secado de café.

a la presión estática requerida para una determinada condición de operación del secador.

6.2.1 Pérdida de presión estática por el paso del aire a través de la masa del café pergamino

El suministro de la cantidad de aire adecuado para la masa de café que se desea secar es de la mayor importancia para el éxito de la operación de secado. El aire que circula por el espacio intergranular es el responsable de entregar la energía para producir la evaporación del agua contenida en el grano y retirar el vapor de agua resultante. La resistencia ofrecida por unidad de longitud en la dirección del flujo del aire es función del caudal por unidad de área y se manifiesta por una pérdida de presión estática. La relación entre todas estas variables fue determinada para el caso del café pergamino (23), mediante la Ecuación [18] que permite estimar para café pergamino el caudal por unidad de área de piso de secador en función de la pérdida de presión entre dos puntos localizados en la capa de granos a diferente altura.

$$\frac{Q}{A} = (9{,}523 - 0{,}0476M)\left|\frac{\Delta p}{\Delta L}\right|^{0{,}676} \quad [18]$$

Donde:

Q = Caudal de aire, ($m^3.min^{-1}$).
A = Área transversal al flujo del aire, (m^2)
M = Contenido de humedad del café, base húmeda, (%)
Δp = Caída de presión en secciones distantes a una altura, ΔL (cm de columna de agua).
ΔL = Distancia entre mediciones de la pérdida de presión Δp, (m).

6.2.1 Pérdida de presión estática por el paso del aire a través del generador de aire caliente

Gutiérrez (14), determinó las curvas características de diferentes intercambiadores de calor para el secado de café, utilizados en Colombia. Los resultados obtenidos para diferentes marcas, capacidades y modelos se presentan en la Figura 28.

Para la selección de un generador de aire caliente debe tenerse en cuenta que existe un compromiso entre la pérdida de presión estática y la mejor eficiencia térmica de intercambio. Lo deseable es disponer del menor valor de la pérdida de presión estática y la mejor eficiencia térmica,

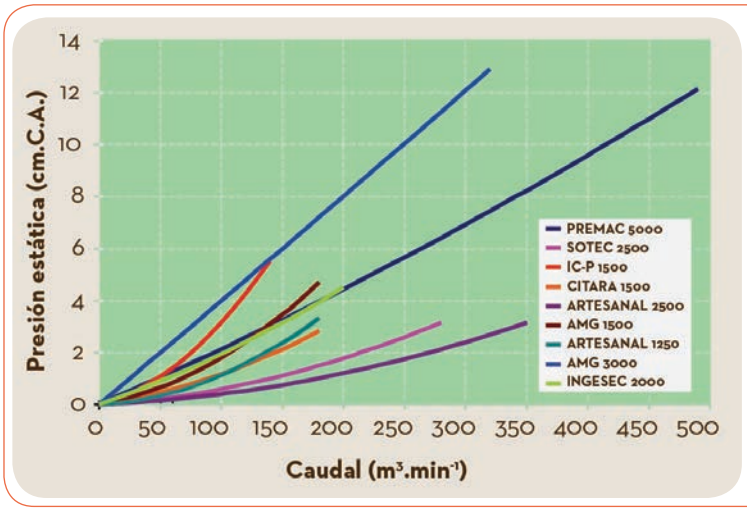


Figura 28. Curvas características de diferentes intercambiadores de calor para el secado de café.

pero la mayor eficiencia térmica se logra normalmente aumentando las superficies de intercambio e induciendo turbulencias para obtener mayores intercambios de calor, que aumentan las pérdidas de presión estática. La selección apropiada deberá estar en un rango aceptable de eficiencia térmica y de pérdida de presión. Además, no puede dejarse de considerar que los intercambiadores de calor tienden a deteriorarse rápidamente por la oxidación de sus partes, principalmente las expuestas a altas temperaturas y al ambiente libre. En los tres casos considerados anteriormente influye en forma importante, la evaluación de costos de inversión y de mantenimiento.

6.2.2 Pérdidas a través del sistema de secado

Las pérdidas de presión ocasionadas por los componentes del sistema de circulación del aire en los secadores presentan un comportamiento no lineal, que depende del caudal que pasa a través de ellos. La Figura 29 muestra un sistema de secado real donde se presenta la curva característica (A) del secador, la cual integra principalmente las pérdidas que presentan las mallas, las compuertas y los ductos de un secador que se diseñó cumpliendo con una velocidad máxima del aire de 7 $m.s^{-1}$ en los ductos, ángulos menores a 15° en las transiciones de los ductos, área de las compuertas iguales o mayores a 1,5 para el área de la succión del ventilador, cámaras plénum con altura mínima de 50 cm y área perforada de las mallas mayor o igual al 20%. En la Figura 29 también se presenta una curva característica (B) de las pérdidas causadas por café pergamino seco obtenida con la Ecuación [18] y se presenta una curva característica de un intercambiador de calor (C). Finalmente, se presenta la curva característica del sistema (A+B+C) igual a la suma de las pérdidas en el generador de aire caliente o intercambiador de calor, la capa de café que tiene que atravesar y el secador.

Cuando se acopla un ventilador a un secador, el sistema funciona en el punto de operación del sistema, que es el punto común de la curva característica del ventilador y del sistema (A+B+C), como se presenta en la Figura 29. Si el café, el intercambiador de calor o el secador ocasionaran menor resistencia al paso del aire, el ventilador entregaría un caudal

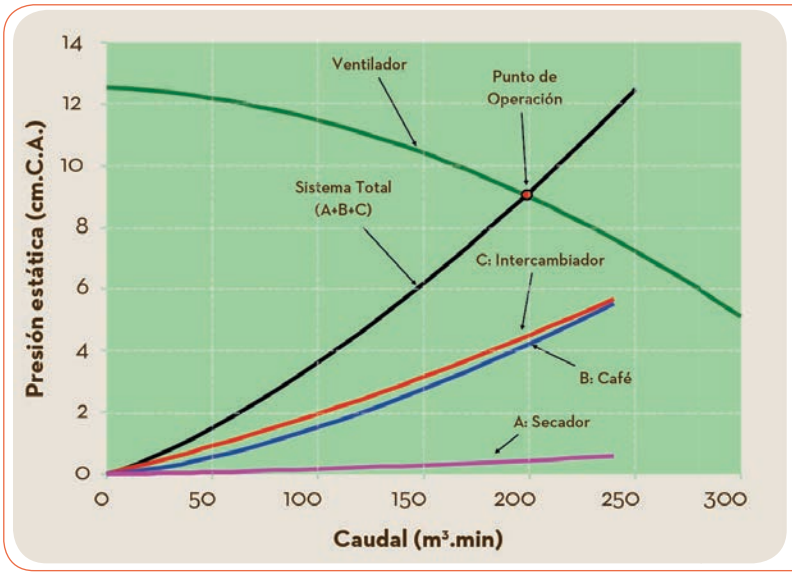


Figura 29. Curva general del sistema de secado mecánico de café.

mayor, debido a que el punto de corte entre las curvas se correría hacia la derecha. Si se genera mayor resistencia al paso del aire, el punto de corte se correría hacia la izquierda, causando que el ventilador entregara menor cantidad de aire a través del café y las partes del sistema de secado.

Los secadores de café se seleccionan generalmente considerando el día de mayor flujo de cosecha del año, el cual se conoce como día "pico", en el cual se procesa una cantidad que varía entre el 1,5% y 4,0% de la producción total anual, dependiendo de la ubicación de la finca y de las condiciones climáticas. Sin embargo, este criterio de diseño basado en el día pico es inadecuado cuando la producción no es suficiente para llenar el secador a su máxima capacidad, ya que se incurre en mayores gastos de combustible y energía eléctrica para su operación.

La Figura 30 muestra un ejemplo real de un secador funcionando con 70, 50, 30 y 10 cm de altura de capa de café, valores que corresponden a la suma de las dos o tres capas dispuestas en serie en el secador seleccionado. Cuando se coloca una capa de 70 cm la resistencia ofrecida al paso del aire es mayor que cuando se dispone de capas más delgadas, lo que se refleja en excesos de aire que requieren más energía para calentarlo y para forzarlo a través del sistema de secado.

En la Tabla 5 puede observarse la magnitud de la cantidad extra de aire que se debe calentar. Para capas que sumen 50 cm de espesor, el exceso de aire es de 44,26%; para capas que sumen 30 cm el exceso de aire es 1,5 veces el caudal ideal; y cuando las capas suman 10 cm de espesor, el exceso de aire es 6,8 veces el caudal ideal. El consumo específico de combustible crece a la misma razón.

De manera más marcada, la potencia eléctrica que se requiere en el ventilador se hace mucho mayor en razón al aumento del caudal de aire, ya que la potencia es el producto de dos factores que aumentan (el caudal y las pérdidas de presión) y a que los nuevos caudales caen en puntos de menor eficiencia del ventilador (no mostrada en la gráfica). Para capas de 50 cm se obtiene un requerimiento de 9,8% más de potencia comparado con una capa de 70 cm de espesor, para capas de 30 cm un 20,9% y para capas de 10 cm un 34,3% adicional, que se refleja en la factura de energía eléctrica.

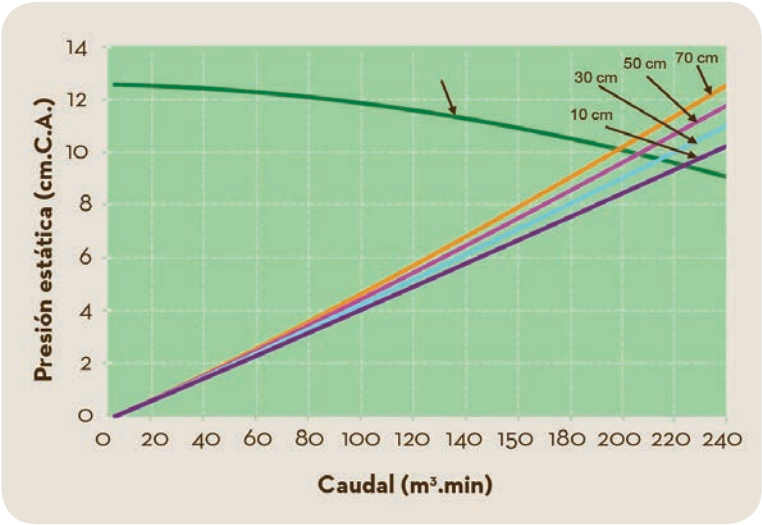


Figura 30. Curva general del sistema de secado mecánico con diferentes capas de café.

Por otro lado el café presenta mayor resistencia al paso del aire cuando está húmedo que cuando está seco. Esto se refleja también en un 5,0% de aumento del caudal de aire entre el principio y el final del secado, el cual también se convierte en un aumento en el consumo de combustible del mismo orden.

6.3 Comportamiento de la temperatura en un calentador de aire

En un sistema de transferencia de calor por convección forzada, como el utilizado para calentar el aire en los secadores mecánicos de café, la temperatura necesaria del aire de secado puede obtenerse a partir de la Ecuación [19], la cual define la eficiencia térmica del sistema como la relación entre el calor recibido por el aire de secado sobre el calor entregado por el combustible.

$$\eta_T = \frac{\dot{m}_a \, c_p \, (T_s - T_a)}{\dot{m}_c \, (-\Delta h_0)}$$

[19]

Donde:

η_T :Eficiencia térmica del sistema
$\dot{m}_a$:Flujo másico de aire
c_p :Calor específico del aire a presión constante
T_s :Temperatura del aire de secado
T_a :Temperatura del aire ambiente
$\dot{m}_c$:El flujo másico de combustible, y
$(-\Delta h_0)$:Poder calorífico del combustible

El flujo másico de aire $(\dot{m}_a)$ Ecuación [20] es función de la masa de café en el secador (m_{cps}) y del caudal específico (q), teniendo en cuenta el valor recomendado para café pergamino de 100 $m^3.min^{-1}.t^{-1}$ de c.p.s. (30, 31, 32) y de la densidad del aire (ρ_a).

$$\dot{m}_a = q \, m_{cps} \, \rho_a$$

[20]

A partir de las Ecuaciones [19] y [20] se obtiene la temperatura de secado o , como se expresa en la Ecuación [21], en función del flujo másico de combustible $(-\dot{m}_c)$. Las demás variables de dicha ecuación son datos conocidos o pueden hallarse experimentalmente.

$$T_s = \frac{\eta_T \, (-\Delta h_0)}{q \, m_{cps} \, \rho_a \, c_p} \dot{m}_c - T_a$$

[21]

La Figura 31 muestra una gráfica de un sistema de calentamiento durante 25 h, sin control de temperatura en un secador, con un suministro constante de combustible, que fue calibrado a 50°C al inicio de la operación, cuando la temperatura ambiente se encontraba a 22,0°C. En estas condiciones las variaciones de la temperatura del aire de secado solo se debieron a las variaciones de temperatura del aire ambiente. La gráfica corresponde a un día con temperatura ambiente mínima de 17,0°C y máxima de 26,6°C. La temperatura del aire de secado durante el tiempo

Tabla 5. Presión, caudal de aire y potencia en función del espesor de la capa de secado para un caso particular.

Espesor total (cm)	Presión (cm c.a.)	Caudal de aire ($m^3.min^{-1}$)	Caudal ideal ($m^3.min^{-1}$)	Potencia eléctrica ventilador (kW)
70	9,94	198,4	200,0	4,61
50	9,76	206,0	142,8	5,06
30	9,54	214,2	85,7	5,57
10	9,33	223,0	28,6	6,18

considerado presenta un perfil similar al de la temperatura ambiente. Cuando ésta es inferior a la temperatura de calibración (22°C), la temperatura de secado es inferior a la temperatura deseada. Así mismo, cuando la temperatura ambiente es alta, la temperatura del aire de secado supera la esperada (50°C) y en etapas finales del proceso podría causar daños a la calidad del café.

6.4. Controles tradicionales de temperatura en secadores mecánicos de café

La temperatura de los secadores mecánicos de café en Colombia normalmente se controla con un interruptor de corriente eléctrica de dos posiciones, "on-off", el cual tiene dos puntos de ajuste: el bajo, que corresponde al valor de temperatura en el cual se enciende el suministro de combustible y el punto de ajuste alto que corresponde al valor de temperatura al cual se suspende el suministro de combustible. Este sistema es el más sencillo que puede obtenerse de un sistema de control de lazo cerrado, el cual tiene un sistema de realimentación, en este caso un sensor de temperatura (Figura 32). La temperatura de referencia realmente son los puntos correspondientes a los ajustes alto y bajo. La Figura 33 muestra la dinámica de la temperatura con el control mencionado actuando sobre un intercambiador de calor con cisco de café como combustible, cuando los puntos de ajuste bajo y alto fueron 48°C y 52°C, respectivamente. Puede observarse que aunque se logra un valor promedio de temperatura del aire de secado de aproximadamente 50°C, por la inercia térmica propia del sistema de calentamiento del aire se obtienen temperaturas de hasta 58°C. Estas altas temperaturas pueden ser dañinas en la etapa final del secado porque los granos pueden sufrir daños de calidad al alcanzar temperaturas superiores a 50°C.

Otro control de temperatura muy utilizado es el sistema de control temporizado de lazo abierto, que consiste en mantener encendido el suministro de combustible durante un tiempo predeterminado, y apagado durante otro tiempo también predeterminado, siendo mucho más prolongado el primero, dada la inercia térmica de los sistemas de calentamiento con combustibles sólidos. En la Figura 34 se muestra el diagrama de bloques de lazo abierto con temporizador, utilizado para el control de temperatura en el secado mecánico de café.

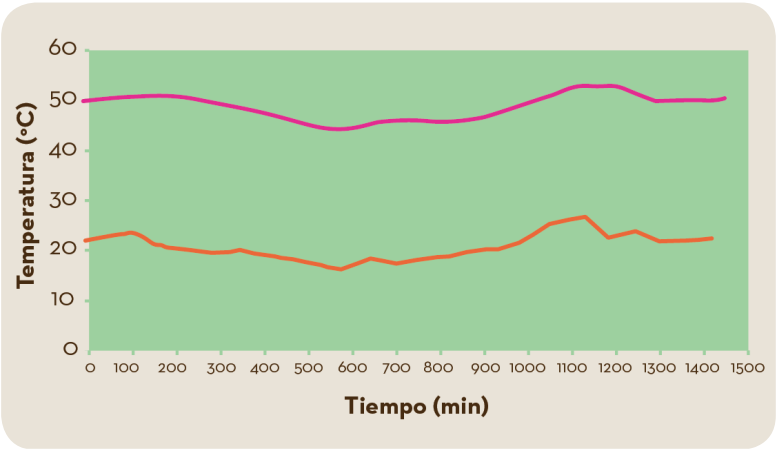


Figura 31. Dinámica de la temperatura de secado con un suministro constante de combustible.

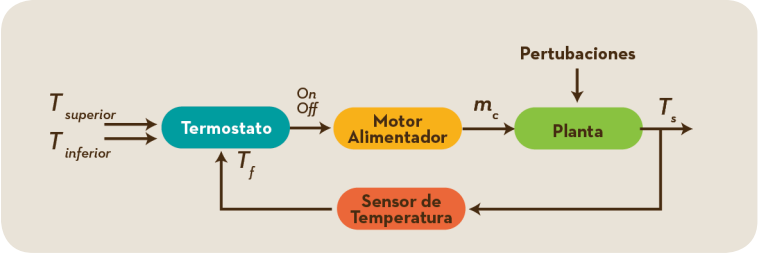


Figura 32. Diagrama de bloques de un sistema de control de dos posiciones (on-off).

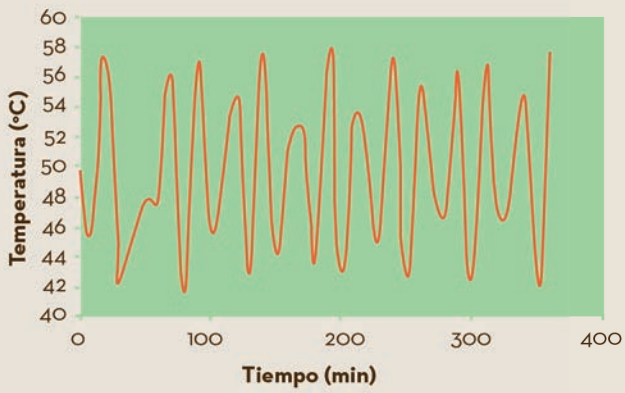


Figura 33. Dinámica de la temperatura con un control de temperatura on-off y combustible sólido.

En la Figura 35 se muestra la dinámica de la temperatura del aire de secado (T_s) cuando se usa un sistema de control temporizado, calibrado para una temperatura deseada de 50°C, en el momento en que la temperatura ambiente es de 22°C. Se observa que el promedio de la temperatura del aire de secado fue menor de 45°C cuando la temperatura ambiente fue más baja (durante la noche) y alcanzó 55°C aproximadamente en las horas más calientes del día. En este caso, se hace evidente el peligro de deterioro de la calidad del producto en que se incurre en las horas más calientes del día, cuando los valores máximos de temperatura alcanzan valores superiores a los 60°C. Para el ejemplo, el alimentador tuvo un ciclo de 90 segundos encendido y 18 minutos apagado.

El sistema temporizado también es sensible a los cambios de la calidad y condiciones del combustible; a mejor calidad, menor contenido de impurezas y menor humedad, mayor poder calorífico. Por esta razón, un sistema calibrado para un determinado combustible, presenta diferentes desempeños cuando se alimenta con combustibles diferentes.

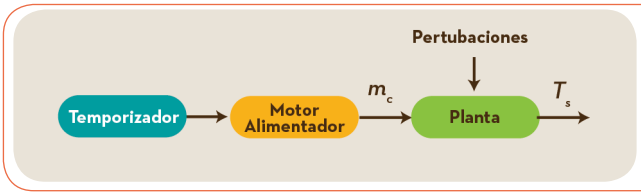


Figura 34. Sistema de control de lazo abierto conformado por un temporizador.

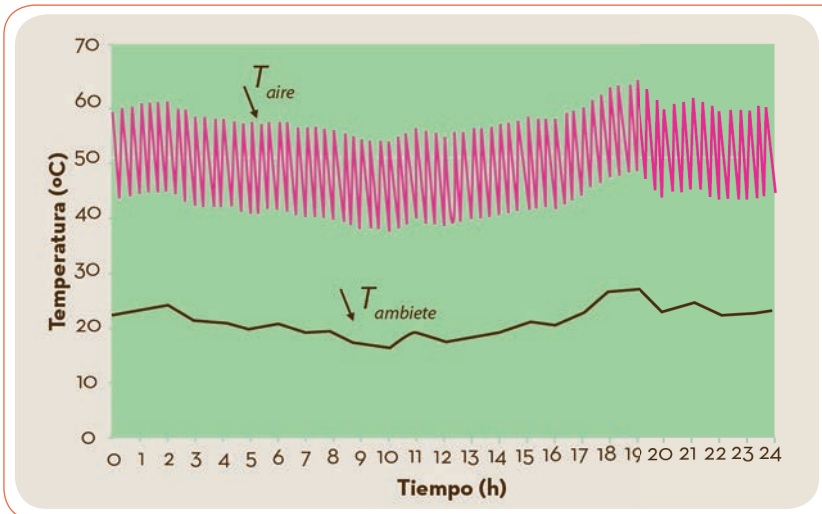


Figura 35. Dinámica de la temperatura del aire de secado cuando se tiene un control temporizado.

6.5. Sistemas de control realimentados

Una de las características más destacadas del desarrollo industrial es el control automático de procesos. Gracias a esto hoy se logra obtener mayor precisión y control en planta, aumentar la producción y dignificar y calificar la mano de obra, convirtiéndose de esta forma en un parámetro importante para el desarrollo económico, en general. Si bien los sistemas que se han mencionado son automáticos, no realiza adecuadamente la tarea de mantener la temperatura cerca de la temperatura ideal.

Existen sistemas de control de lazo cerrado más elaborados que los mostrados con anterioridad, los cuales realizan la tarea de mantener la temperatura cerca de la temperatura deseada, sin tener que detener completamente o arrancar a velocidad máxima el alimentador de combustible. En la Figura 36 puede observarse el diagrama de bloque de uno de estos sistemas, los cuales basan su funcionamiento en la estrategia de control que se utilice.

El controlador tiene dos entradas y una salida. Una de las entradas es la temperatura de referencia (T_r), la cual ingresa el usuario y corresponde a la temperatura deseada para el aire de secado. La otra entrada es la señal de realimentación que viene del sensor de temperatura (T_f). Estas dos entradas se comparan y como consecuencia se produce una señal de error (e), dentro del controlador, la cual es

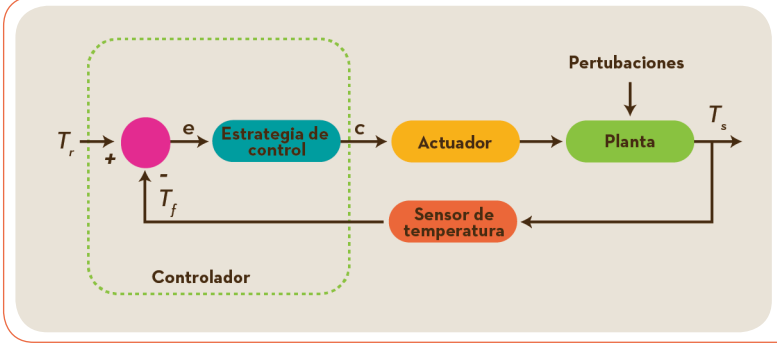


Figura 36.
Sistema de control de lazo cerrado

modificada a través de una estrategia de control desde donde se obtiene la salida (*c*), que controla el actuador dentro de un rango. El actuador en este caso es el alimentador de combustible sólido.

En el control clásico existen diferentes estrategias de control que han generado importantes avances en la industria desde principios del siglo XX, y que aún continúan vigentes. La más sencilla de todas consiste en hacer que el actuador trabaje de manera proporcional a la señal de error. Esto quiere decir que a errores grandes movimientos grandes y viceversa. La estrategia de control proporcional obedece a la Ecuación [22]:

$$c(t) = k_p \; e(t)$$

[22]

Donde:

$c(t)$: Señal de alimentación del actuador
k_p : Constante de proporcionalidad
$e(t)$: Señal interna de error dentro de controlador

La estrategia de control proporcional funciona aceptablemente en la mayoría de los casos, sin embargo, tiene limitaciones entre las que pueden mencionarse baja velocidad de respuesta, error en estado estable y sobrepaso inicial muy alto al inicio del proceso de control. Para resolver estas limitaciones se tienen otras funciones complementarias que mejoran sustancialmente el desempeño. Una de ellas es la función derivativa, la cual le mejora la velocidad de respuesta y disminuye el sobrepaso. Esta función tiene la forma mostrada en la Ecuación [23].

$$c(t) = k_d \; \frac{d\; e(t)}{dt}$$

[23]

Donde:
k_d : Constante derivativa.

Así mismo, existe la función integral que disminuye el error en estado estable al mínimo, y también mejora la velocidad de respuesta y disminuye el tiempo de establecimiento. La función integral es de la forma mostrada en la Ecuación [24].

$$c(t) = k_i \int e(t)\, dt$$

[24]

Donde:
k_i : Constante integral

De esa manera, pueden existir las combinaciones Proporcional-Integral (PI), Proporcional-Derivativa (PD) o Proporcional-Integral-Derivativa (PID), dependiendo de la aplicación.

6.6 Actuadores

En control se conocen como actuadores a aquellos elementos mecánicos, neumáticos, eléctricos o electrónicos que reciben la señal del controlador y de acuerdo a ella manejan directa o indirectamente la variable a controlar.

Actualmente la mayoría de las máquinas industriales son accionadas a través de motores eléctricos los cuales operan a velocidades aproximadamente constantes, con valores que dependen del voltaje, frecuencia y forma de alimentación eléctrica, lo mismo que de las características propias del motor, las cuales son inmodificables. Los motores más usados en la industria son los trifásicos, porque son más eficientes que los monofásicos, pueden llevar mayor potencia por línea y no necesitan ayuda para el arranque. Por tal razón, se hace deseable que los dispositivos eléctricos usados en las fincas cafeteras sean movidos por motores de este tipo.

Para regular la velocidad de giro en máquinas se emplean dispositivos mecánicos, hidráulicos, eléctricos o electrónicos. Actualmente la industria se está inclinando hacia el uso de variadores electrónicos de frecuencia por sus diversos beneficios, entre ellos el control de procesos, la reducción del requerimiento de energía eléctrica, la protección de los motores, la facilidad de manejo y programación, la sencillez del montaje y mantenimiento, y últimamente su bajo costo. Las ventajas mencionadas de los variadores electrónicos de frecuencia han hecho posible que sean considerados, junto con los motores trifásicos, como actuadores idóneos para el control de la temperatura del aire de secado y del flujo de aire en secadores mecánicos de café pergamino. La Figura 37 muestra un diagrama de bloques de un variador electrónico de frecuencia y un motor, en el que este último gira a una velocidad proporcional a la señal de entrada del variador de electrónico de frecuencia. La ecuación que rige la velocidad de giro del motor se presenta en la Ecuación [25].

$$N = \frac{f}{p_p} \qquad [25]$$

Donde:
N: Velocidad de giro en revoluciones/s
f: Frecuencia de alimentación de la energía eléctrica en Hz
p_p: Número de pares de polos del motor.

6.7 Sensor de caudal de aire

Al igual que la temperatura, el caudal de aire puede ser mantenido en el valor deseado a través de un sistema de control con realimentación como se muestra en la Figura 36. Sin embargo, el sistema de realimentación debe ser algún tipo

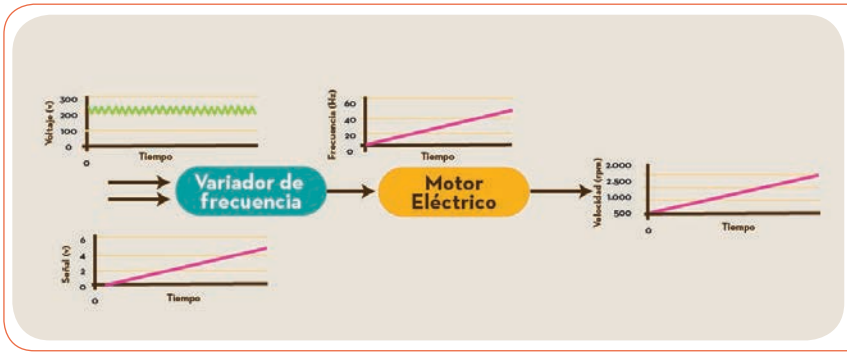


Figura 37. Actuador conformado por un variador electrónico de frecuencia y un motor eléctrico.

de sensor del flujo de aire, los cuales se caracterizan por su complejidad, alto costo y por ser accesorios voluminosos para su correcta instalación, como un túnel de viento. Sin embargo, el desarrollo de la Ecuación [18] (23) facilitó la medición del caudal de aire por medio de la determinación de las pérdidas de presión a través de la capa de café (23). De esta manera, puede utilizarse un sistema piezoeléctrico para la medición de presión diferencial de fácil adquisición e instalación, con toma de presión a la salida del ventilador (Figura 38). Con esta presión, el área transversal del secador, la altura de capa y la humedad del café pergamino, se obtiene el caudal de aire que pasa a través de todo el sistema, con adecuada exactitud.

6.8 Secado de café con control simultáneo de caudal y temperatura del aire

Con el objetivo de garantizar el menor consumo específico de combustible posible y un requerimiento de energía eléctrica constante, independiente de la carga que se introduzca en el secador, se desarrolló el sistema de control simultáneo de caudal de aire y de temperatura de las Figuras 39 y 40, denominado SISCAT (13). El sistema de control solicita tres datos de entrada del usuario, la suma de las dos o tres alturas de las capas del secador (h en m), el área transversal de las capas (A en m^2) que es invariable, la temperatura deseada para el aire de secado o temperatura de referencia (T_r en °C), la cual también se considera constante durante el proceso de secado, y dos salidas que son la temperatura real del aire de secado (T_s) y la diferencia de presión (Δp) tomada a la salida del ventilador, que indica el caudal de aire calculado con la Ecuación [18].

El sistema tiene dos controladores, uno para la temperatura de secado y el otro para el caudal de aire. Los controladores actúan, cada uno, sobre un variador de frecuencia que controla la velocidad de giro de un motor eléctrico trifásico. El sistema de realimentación del controlador de caudal es un sensor de presión y el del controlador de temperatura es un sensor de temperatura. Los controladores están interconectados entre sí, como puede verse en el diagrama de bloques de la Figura 39. Los dos controladores están provistos de componentes Proporcional e Integral (PI). Para determinar el efecto del sistema de control en la reducción del requerimiento de energía eléctrica y de combustible, se realizaron ensayos con alturas de capa de 20, 30, 40 y 54 cm. Para

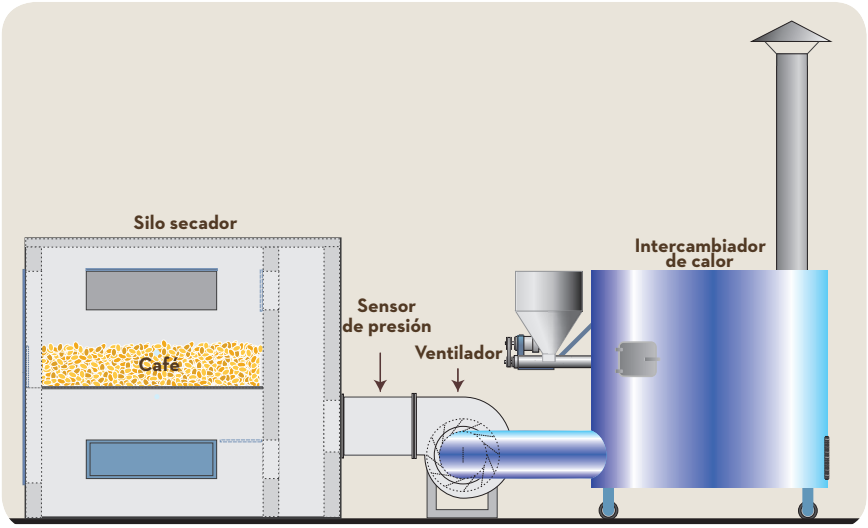


Figura 38. Ubicación del sensor de presión a la salida del ventilador para determinar el caudal de aire de secado.

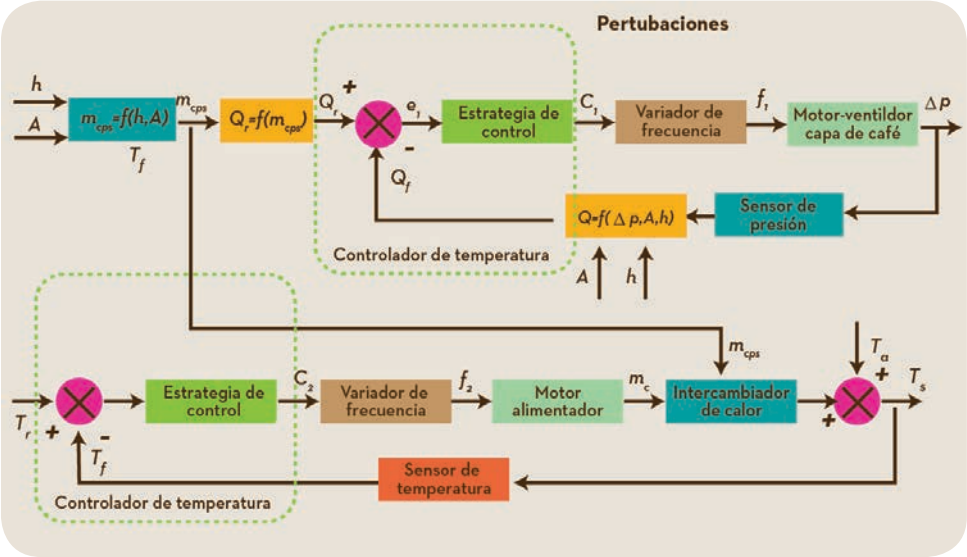


Figura 39. Diagrama de bloques del control simultáneo de caudal de aire y de temperatura para secado de café - SISCAT.

cada una de ellas se efectuó una prueba utilizando el dispositivo SISCAT y otra sin control (convencional), como testigo. Se utilizó semilla de café Variedad Castillo® y un promedio de temperatura de aire de secado de 38°C, con la cual el tiempo para secar el café hasta 10% – 12% (b.h.) es mayor que cuando se utiliza temperatura de 50°C en las fincas cafeteras.

La Figura 40 muestra el efecto del uso del control SISCAT sobre la temperatura. Se observa que el error es aceptable y se evita el comportamiento sinusoidal que se tiene con el sistema de control termostático y el efecto de la temperatura ambiente de los sistemas temporizados.

La Figura 41 muestra el comportamiento del caudal específico de aire de secado con capas de café que suman 54 cm de espesor con control de caudal y sin él. El caudal específico de aire del sistema controlado permaneció por debajo del caudal específico del sistema sin control, lo que significa menor consumo específico de combustible y requerimiento de energía eléctrica por el ventilador. El análisis estadístico para la variable caudal específico de aire de secado, determinó que existe diferencia entre el tratamiento con control y el testigo.

Para todas las pruebas existió una diferencia a favor del tratamiento con control en cuanto a la reducción del consumo de combustible, debido que en una capa más delgada se requiere menos caudal de aire cuando se tiene control y, por consiguiente, menos combustible. La Figura 42 muestra los consumos específicos de combustible, en kilogramos de combustible (cisco de café) por kilogramos de café pergamino seco, para las diferentes capas evaluadas. Se indican reducciones de consumo de combustible que van desde el 40% (capa de 20 cm) hasta el 5% para capas de 54 cm de café.

En la Figura 43 se presenta el efecto del uso del dispositivo SISCAT en la potencia empleada para operar el secador, para diferentes alturas de capas de café. Se logra una disminución desde el 18% para capas de 54 cm hasta un 88% para capas de 20 cm de café. Este resultado se atribuye

a los menores caudales de aire empleados con menores alturas de capa de granos, lo cual se logra con el variador de frecuencia.

Después de determinar el consumo específico de combustible y el requerimiento de potencia eléctrica por capa, se determinó el costo del secado debido al combustible (cisco de café) utilizado y la energía eléctrica correspondiente. El promedio del tiempo para los tratamientos con y sin control de caudal fue de 49 h, sin presentar diferencias significativas para alguno de ellos, dado que el sistema controlado trabaja con un caudal específico aproximado al óptimo hallado por Parra-Coronado *et al.* (30, 31). El tiempo de secado se extendió al doble en ambos casos por tratarse de café destinado a semilla, en el cual la temperatura del aire de secado no debe exceder 38°C con la tecnología de capa estática utilizada. Se partió de la base de un costo de $300 por kW.h y un costo de $100 por kilogramo de cisco, obteniendo los costos mostrados en la Figura 44.

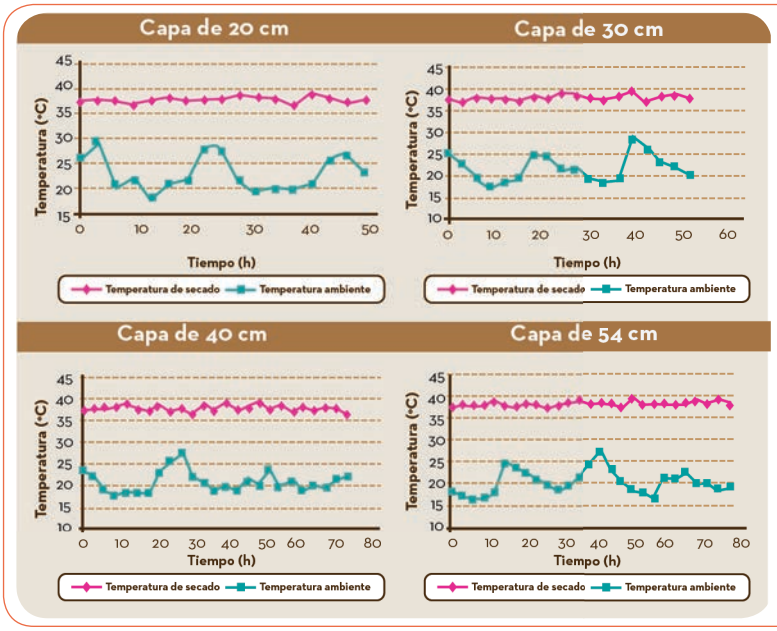


Figura 40. Dinámica de la temperatura de secado y de la temperatura ambiente durante las pruebas de secado para diferentes capas de café.

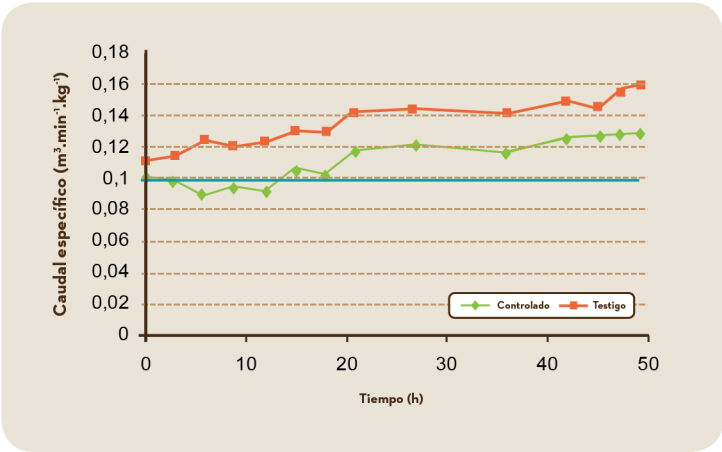


Figura 41. Desempeño del control de caudal de aire de secado con respecto al testigo, sin control, para una capa de 54 cm de espesor.

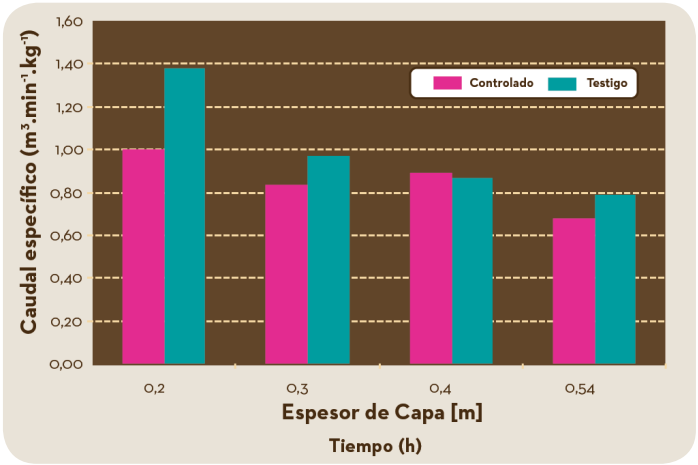


Figura 42. Reducción del consumo específico de combustible promedio por el uso del equipo controlador.

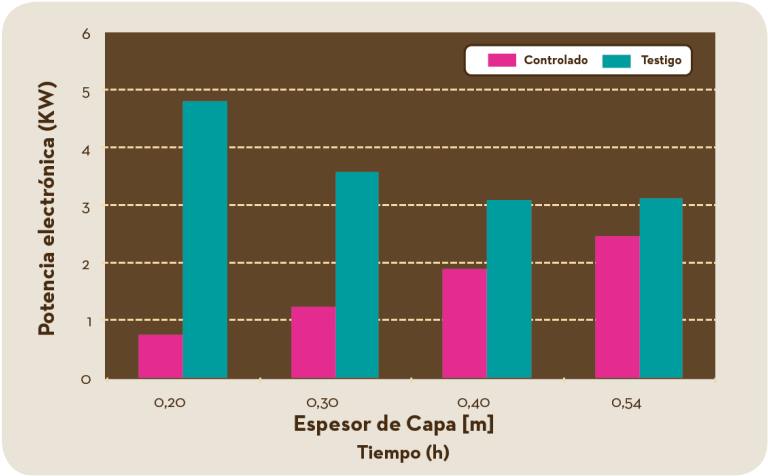


Figura 43. Reducción de la potencia eléctrica, con control, para las diferentes capas de café.

En el análisis de costos no se tuvo en cuenta la contribución de la mano de obra en los costos variables. Sin embargo, dado que los pequeños volúmenes requieren gran cantidad de mano de obra si se secan al sol, si se venden húmedos (empaque y transporte) o si se secan en un secador mecánico con control de caudal y temperatura, los costos de la mano de obra se pueden asumir iguales. Almacenar café de varios días hasta completar la carga del secador no se considera viable, por ser una práctica en la cual se deteriora la calidad del café.

No se consideró la depreciación del equipo diseñado para controlar el caudal y la temperatura del aire de secado por tratarse de un modelo experimental de costo elevado con relación al que tendría un equipo fabricado comercialmente.

En la Figura 44 puede observarse un aumento del costo específico a medida que disminuye la altura de la capa de café a secar, para los tratamientos que no usaron control de caudal de aire de secado. El costo específico utilizando control permaneció aproximadamente

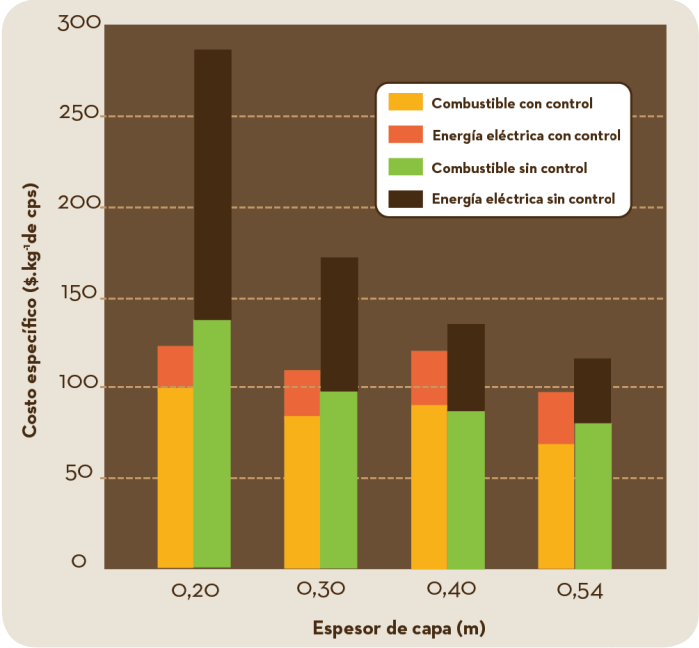


Figura 44. Costos específicos para las diferentes capas evaluadas con y sin control de caudal de aire.

constante, variando los promedios entre $96,77 y $123,46 por kilogramo de café pergamino seco, lo que indica que no se incurre en mayores costos de secado si se usa el secador con cargas menores que la nominal con el control desarrollado. La reducción de costo obtenida en la menor capa cuando se utilizó control fue de 57,17%, en la capa de 30 cm de espesor fue de 36,50%, en la capa de 40 cm fue de 11,92% y en la capa de 54 cm fue de 15,96%.

Con el sistema SISCAT se logró obtener un control de temperatura sin el comportamiento sinusoidal que se tiene con el sistema de control termostático y sin el efecto de la temperatura ambiente de los sistemas temporizados, con un error muy pequeño.

Con el control simultáneo de caudal y temperatura se lograron reducciones de consumo de combustible que llegaron hasta el 27,62% para la capa de café más delgada. Con el sistema de control simultáneo de caudal y temperatura se lograron reducciones en el requerimiento de energía eléctrica que llegaron hasta el 84,38% en la capa más delgada (20 cm). Con el sistema de control simultáneo de caudal y temperatura se lograron reducciones totales de costos de 57,17% en la capa de 20 cm, de 36,50% en la capa de 30 cm de espesor, de 11,92% en la capa de 40 cm y de 15,96% en la capa de 54,0 cm, comparado con un sistema sin control de caudal y en las condiciones de secado de semilla. Con el sistema de control simultáneo de caudal y temperatura se logró un promedio del costo específico que varió entre $96,77 y $123,46 por kilogramo de café pergamino seco, lo que indica que puede usarse secado mecánico del café con cargas menores a la nominal sin incurrir en mayores costos.

Anexo

PROGRAMA SecCafPer 7.4

PARA LA SIMULACIÓN MATEMÁTICA DEL SECADO DE CAFÉ PERGAMINO

MANUAL DEL USUARIO

Instalación
del programa

Para instalar el Programa de simulación matemática del secado de café pergamino "SecCafPer 7.4" en su PC, siga los siguientes pasos:

- Introduzca el CD o USB en la unidad lectora. Abra la carpeta "Ejecutable Secafé 7.4" y Pulse dos veces sobre "Setup"(Figura 1).

- Verifique que aparezca el mensaje ¿Desea permitir que este programa de un editor desconocido realice cambios en el equipo? Pulse sobre el botón "Sí", después aparecerá la ventana "Instalación de SecCafPer 7.4" de clic en Aceptar (Figura 2).

- Al abrirse la ventana para iniciar la instalación del Programa se muestra la ruta del "Directorio" en el cual va a quedar instalado; si desea cambiarla, pulse sobre el botón "Cambiar directorio" y seleccione el directorio donde desea instalar el programa. de lo contrario pulse el botón "Continúe" y regresará a la ventana para iniciar la instalación (Figura 3).

- La siguente ventana muestra el grupo de programas que quedarán en la instalación, dar clic en continuar (Figura 4) y sobre el botón para instalar el software, en el directorio de destino especificado.

- Luego, la ventana mostrará que la instalación se ha completado. Pulse el botón "Aceptar" para salir del programa de instalación (Figura 5). Finalmente el programa querdará instalado.

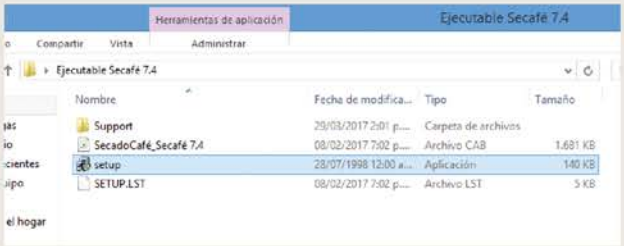


Figura 1. Carpeta con el ejecutable del programa "SecCafPer 7.4"

Figura 2. Programa de Instalación

Figura 3. Ventana para iniciar la instalación del Programa

Figura 4. Selección del "Grupo de Programas" donde se desea instalar el Programa "SecCafPer".

Figura 5. Finalización de la instalación

Una vez instalado el programa en su PC puede proceder a realizar las simulaciones para los diferentes secadores mecánicos para café pergamino existentes en Colombia, bajo las condiciones de secado que desee establecer.

Ejecución
del programa

Al abrir el programa "SeCafPer 7.4" aparece el menú principal (Sistemas de Secado para Café Pergamino) mostrado en la Figura 6, en el cual podrá seleccionar entre dos opciones a saber:

1. Secadores de capa fija (secadores estáticos).
2. Secador intermitente de flujos concurrentes "Cenicafé_IFC".

1. Secadores de capa fija

Si pulsa sobre la primera opción, aparecerá en la pantalla el menú correspondiente a **"Secadores de Capa Fija"**, tal como se muestra en la Figura 6 y 7.

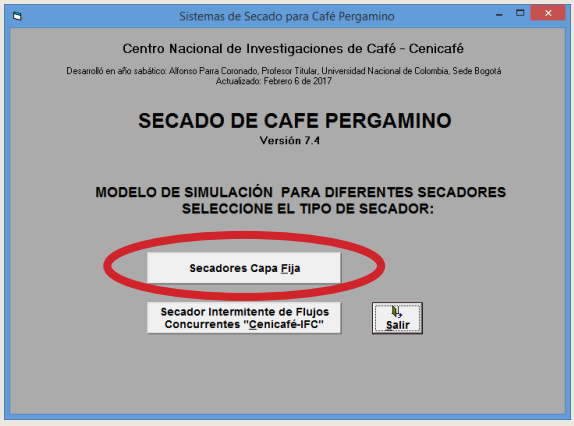


Figura 6. Menú principal del programa de simulación matemática para el secado de café pergamino.

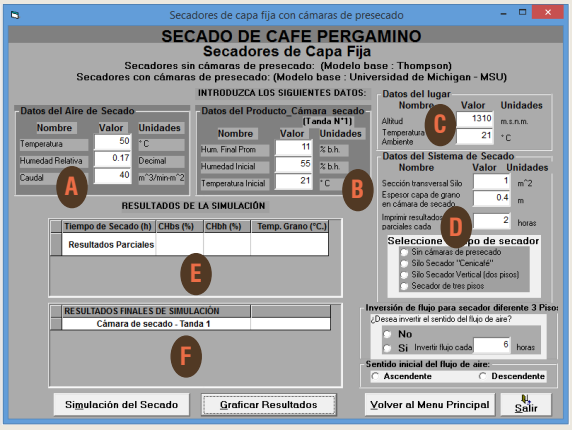
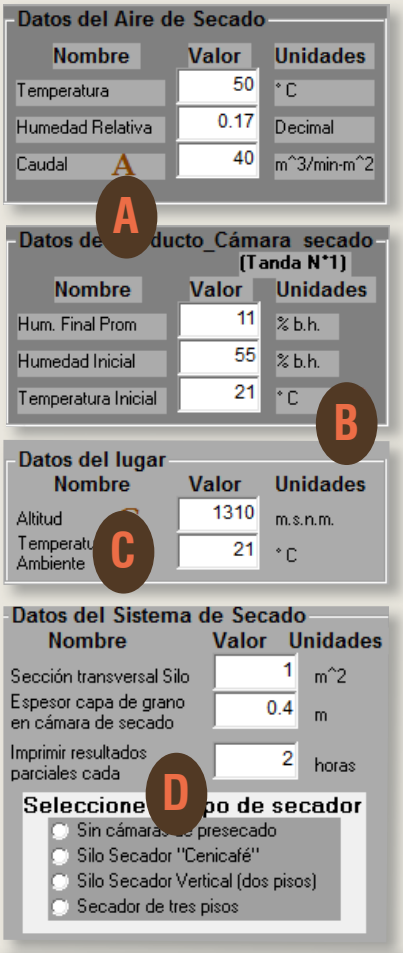
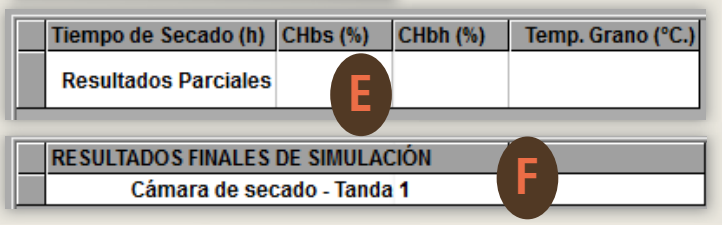


Figura 7. Menú para secadores de capa fija.





En la **Sección A** de la Figura 7, deberán introducirse los "**Datos del Aire de Secado**" correspondientes a:

- Temperatura, en grados centígrados (°C).
- Humedad relativa, decimal.
- Caudal, en $m^3.min.m^2$ de sección transversal del secador.

En la **Sección B** debe introducir los "**datos del producto ubicado en la cámara de secado (Tanda 1)**", correspondientes a:

- Promedio de la humedad final de la masa de granos (al final del secado), en porcentaje base húmeda (% b.h.).
- Humedad inicial de la masa de granos, en porcentaje base húmeda (% b.h.).
- Temperatura inicial de la masa de granos, en grados centígrados (°C)

En la **Sección C** deben introducirse los **"datos del lugar"**, correspondientes a:

- Altitud, en metros sobre el nivel del mar.
- Temperatura ambiente, en grados centígrados (°C)

En la **Sección D** se introducen los **"datos del Sistema de Secado"**, correspondientes a:

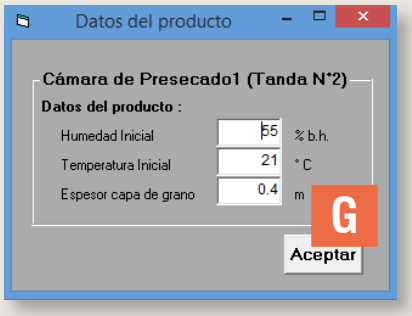
- Sección transversal del silo, en m^2.
- Espesor de la capa de grano en la cámara de secado, en metros.
- Imprimir resultados parciales, en este espacio se introduce el intervalo de tiempo, en horas, en que se desea que muestren los resultados de simulación.

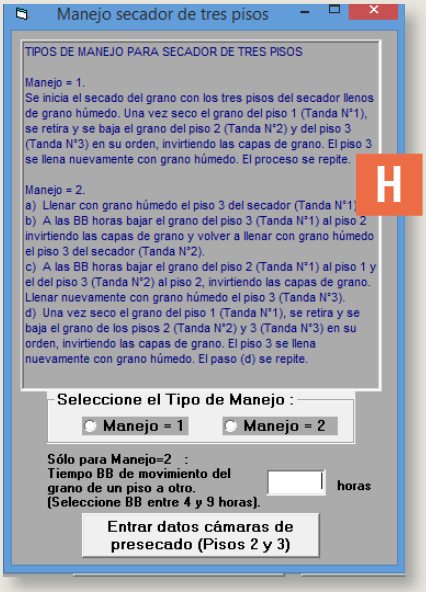
En la **Sección D** deberá seleccionar el **tipo de secador,** entre los cuales se encuentran:

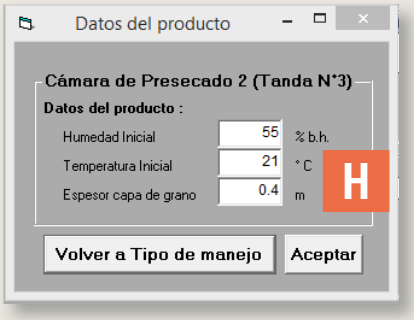
- Sin cámaras de presecado
- Silo Secador "Cenicafé"
- Silo secador vertical (dos pisos)Secador de tres pisos

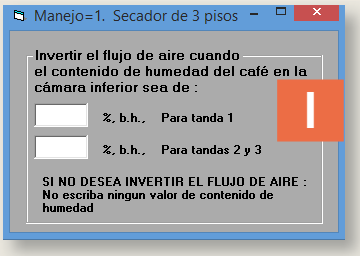
Si selecciona un secador diferente al de tres pisos, deberá indicar al final de la Sección D, si desea o no "invertir el sentido del flujo de aire". Si selecciona "Si invertir cada...", introduzca en la casilla el valor del intervalo, en horas, en que desea invertir el flujo. Enseguida seleccione el "sentido inicial del flujo de aire" (ascendente o descendente).

Si selecciona el secador "sin cámaras de presecado", la información necesaria es la solicitada en el menú correspondiente a secadores de capa fija (Figura 7).









Si selecciona el **"Silo Secador Cenicafé"** o el **"silo secador vertical"**, además de la información solicitada en el menú correspondiente a secadores de capa fija, en la ventana G deberá suministrar los **"Datos del producto ubicado en la cámara de presecado 1 (Tanda 2)"**, que corresponden a:

- Humedad inicial de la masa de granos, en porcentaje base húmeda (% b.h.)
- Temperatura inicial de la masa de granos, en grados centígrados (°C)
- Espesor de la capa de grano, en metros.

Si selecciona el **"secador de tres pisos"**, aparecerá La ventana H (**"Manejo secador de tres pisos"**), en la cual se explican los dos tipos de manejo para este secador. Si selecciona el **"tipo de manejo=1"** y pulsa en "entrar datos cámaras de presecado (pisos 2 y 3)", aparecerán las ventanas G, I e J; en las ventanas G y I deberá suministrar los **"datos del producto"** ubicado en la Cámara de Presecado 1 (Tanda 2) y Cámara de Presecado 2 (Tanda 3), respectivamente, correspondientes a:

- Humedad inicial de la masa de granos, en porcentaje base húmeda (% b.h.)
- Temperatura inicial de la masa de granos, en grados centígrados (°C)
- Espesor de la capa de grano, en metros.

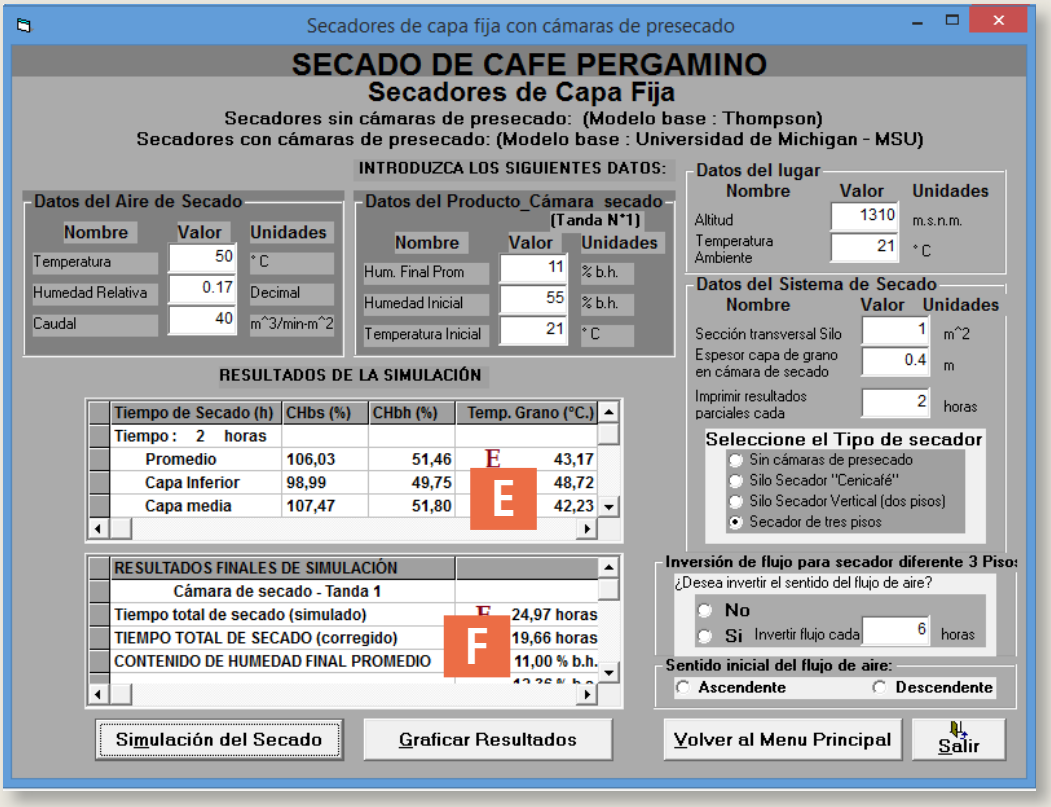
En la ventana J **introduzca el valor del promedio del contenido de humedad del café ubicado en la cámara inferior** (cámara de secado), en base húmeda, a la cual desea invertir el sentido del flujo de aire. Puede escribir este valor para la Tanda 1 y para las Tandas 2 y 3. Si no desea invertir el flujo del aire, no escriba algún valor de contenido de humedad en las casillas.

Si en el **"secador de tres pisos**" seleccionó el **"tipo de manejo = 2"**, introduzca en la ventana J el valor correspondiente a **"tiempo BB de movimiento del grano de un piso a otro"**; seleccione un valor entre 4 y 9 h, que corresponde al intervalo más adecuado para operar el secador bajo este tipo de manejo. Pulse en **"entrar datos cámaras de presecado (Pisos 2 y 3)"**, luego de lo cual aparecerán las ventanas G y I, correspondientes a los datos del producto ubicado en las cámaras de presecado 1 y 2, respectivamente. Introduzca los datos solicitados (En este tipo de manejo, no aparece la ventana J).

Tan pronto introduzca los datos para cada tipo de secador a simular y después de verificar que éstos

son correctos, pulse **“aceptar”** en las **ventanas G e I**, las cuales desaparecerán de la pantalla. Posteriormente, pulse **“simulación del secado”** para iniciar la ejecución del programa de secado. Al cabo de 30 s o de 3 min., aproximadamente, dependiendo de la capacidad de su PC, el programa habrá simulado el proceso de secado con los datos introducidos inicialmente. En las **ventanas E y F** aparecerán los **“resultados parciales”** y los **“resultados finales de la simulación”**, respectivamente (Figura 8).

Figura 8. Resultados de la simulación presentados por pantalla.



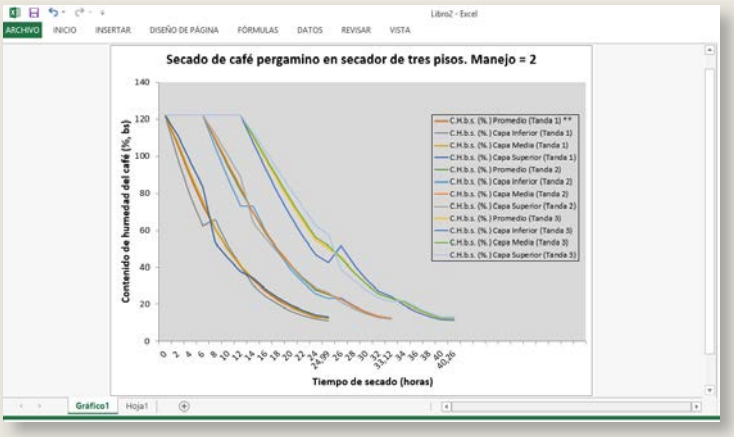


Figura 9. Salida de los resultados de simulación del secado de café pergamino en secadores de capa estáticos, en forma gráfica a una hoja de Excel.

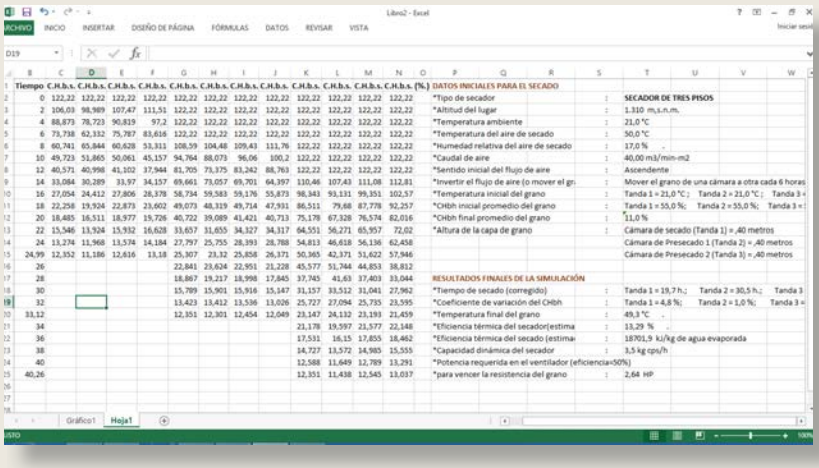
Una vez ejecutado el programa, además de suministrar los resultados por pantalla en las **ventanas E y F**, éstos son llevados a una hoja electrónica de Excel, al pulsar en "Graficar resultados". De la hoja de Excel son tomados los resultados de tiempo de secado y de contenido de humedad de la masa de café a diferentes profundidades para ser representados gráficamente. Por defecto, la gráfica aparece en estilo de "columnas", el cual puede cambiarse a líneas utilizando las "herramientas de gráficos de Excel" (Figura 9). En la pantalla del computador aparecerá la ventana "Guardar como", la cual proporciona la posibilidad de guardar los datos iniciales y los resultados de la simulación en el archivo que desee. La gráfica de tiempo de secado vs. contenido de humedad del café (% base seca) podrá ser modificada utilizando las herramientas de Excel.

Si en la Figura 10 pulsa sobre "Hoja1", aparecerán los resultados numéricos de la simulación del secado, correspondientes al contenido de humedad del grano (% base seca) a través del tiempo de secado, los cuales irán de la columna B a la columna N para el secador de tres pisos; de la columna B a la columna J para el Silo Secador "Cenicafé" y para el silo secador vertical; y de la columna B a la columna F para el secador sin cámaras de presecado.

A partir de la columna P, aparecen los datos iniciales para el secado y los resultados finales de la simulación. Estos últimos corresponden a las siguientes variables:

- Tiempo de secado (corregido) para cada tanda, en horas (h)
- Coeficiente de variación del contenido de humedad en base húmeda para cada tanda
- Eficiencia térmica del secador (estimada), en %
- Eficiencia térmica del secado (estimada), en $kJ.kg^{-1}$ de agua evaporada
- Capacidad dinámica del secado, en $kg.h^{-1}$
- Potencia requerida en el ventilador (eficiencia = 50%) para vencer la resistencia del grano, en HP.

Al salir de la hoja de Excel, se retorna al programa de simulación, el cual tiene la posibilidad de realizar nuevas simulaciones para diferentes secadores o para el mismo secador. Además, tiene las posibilidades de "volver al menú principal (sistemas de secado para café pergamino)" o "salir" del programa.



Tiempo	C.H.b.s.	C.H.b.s.	C.H.b.s.	C.H.b.s.	C.H.b.s.	C.H.b.s.	C.H.b.s.	C.H.b.s.	C.H.b.s.	C.H.b.s.	C.H.b.s.	C.H.b.s.	C.H.b.s.	C.H.b.s.	C.H.b.s. (%)
0	122,22	122,22	122,22	122,22	122,22	122,22	122,22	122,22	122,22	122,22	122,22	122,22	122,22	122,22	122,22
2	106,03	98,989	107,47	111,51	122,22	122,22	122,22	122,22	122,22	122,22	122,22	122,22	122,22	122,22	122,22
4	88,873	78,723	90,819	97,2	122,22	122,22	122,22	122,22	122,22	122,22	122,22	122,22	122,22	122,22	122,22
6	73,738	62,332	75,787	83,616	122,22	122,22	122,22	122,22	122,22	122,22	122,22	122,22	122,22	122,22	122,22
8	60,741	65,844	60,628	53,311	108,59	104,48	109,43	111,76	122,22	122,22	122,22	122,22	122,22	122,22	122,22
10	49,723	51,865	50,061	45,157	94,764	88,073	96,06	100,2	122,22	122,22	122,22	122,22	122,22	122,22	122,22
12	40,571	40,998	41,102	37,944	81,705	73,375	83,242	88,763	122,22	122,22	122,22	122,22	122,22	122,22	122,22
14	33,084	30,289	33,97	34,157	69,661	73,057	69,701	64,397	110,46	107,43	111,08	112,81	122,22	122,22	122,22
16	27,054	24,412	27,806	28,378	58,734	59,583	59,176	55,873	98,343	93,131	99,351	102,57	122,22	122,22	122,22
18	22,258	19,924	22,873	23,602	49,073	48,319	49,714	47,931	86,511	79,68	87,778	92,257	122,22	122,22	122,22
20	18,485	16,511	18,977	15,726	40,722	39,089	41,421	40,713	75,178	67,328	76,574	82,016	122,22	122,22	122,22
22	15,546	13,924	15,932	16,628	33,657	31,655	34,327	34,317	64,551	56,271	65,957	72,02	122,22	122,22	122,22
24	13,274	11,968	13,574	14,184	27,797	25,755	28,393	28,788	54,813	46,618	56,136	62,458	122,22	122,22	122,22
24,99	12,352	11,186	12,616	13,18	25,307	23,32	25,858	26,371	50,365	42,371	51,622	57,946	122,22	122,22	122,22
26					22,841	23,624	22,951	21,228	45,577	51,744	44,853	38,812	122,22	122,22	122,22
28					18,867	19,217	18,998	17,845	37,745	41,63	37,403	33,044	122,22	122,22	122,22
30					15,789	15,901	15,916	15,147	31,157	33,512	31,041	27,962	122,22	122,22	122,22
32					13,423	13,412	13,536	13,026	25,727	27,094	25,735	23,595	122,22	122,22	122,22
33,12					12,351	12,301	12,454	12,049	23,147	24,112	23,193	21,459	122,22	122,22	122,22
34									21,178	19,597	21,577	22,148	122,22	122,22	122,22
36									17,531	16,15	17,855	18,462	122,22	122,22	122,22
38									14,727	13,572	14,885	15,555	122,22	122,22	122,22
40									12,588	11,649	12,789	13,291	122,22	122,22	122,22
40,26									12,351	11,438	12,545	13,037	122,22	122,22	122,22

DATOS INICIALES PARA EL SECADO		
*Tipo de secador	:	SECADOR DE TRES PISOS
*Altitud del lugar	:	1.310 m.s.n.m.
*Temperatura ambiente	:	21,0 °C
*Temperatura del aire de secado	:	50,0 °C
*Humedad relativa del aire de secado	:	17,0 %
*Caudal de aire	:	40,00 m3/min-m2
*Sentido inicial del flujo de aire	:	Ascendente
*Invertir el flujo de aire (o mover el gr	:	Mover el grano de una cámara a otra cada 6 horas
*Temperatura inicial del grano	:	Tanda 1 = 21,0 °C ; Tanda 2 = 21,0 °C ; Tanda 3 =
*CHbh inicial promedio del grano	:	Tanda 1 = 55,0 %; Tanda 2 = 55,0 %; Tanda 3 =
*CHbh final promedio del grano	:	11,0 %
*Altura de la capa de grano	:	Cámara de secado (Tanda 1) = ,40 metros
		Cámara de Presecado 1 (Tanda 2) = ,40 metros
		Cámara de Presecado 2 (Tanda 3) = ,40 metros
RESULTADOS FINALES DE LA SIMULACIÓN		
*Tiempo de secado (corregido)	:	Tanda 1 = 19,7 h.; Tanda 2 = 30,5 h.; Tanda 3
*Coeficiente de variación del CHbh	:	Tanda 1 = 4,8 %; Tanda 2 = 1,0 %; Tanda 3 =
*Temperatura final del grano	:	49,3 °C
*Eficiencia térmica del secador(estima	:	13,29 %
*Eficiencia térmica del secado (estima	:	18701,9 kJ/kg de agua evaporada
*Capacidad dinámica del secador	:	3,5 kg cps/h
*Potencia requerida en el ventilador (eficiencia=50%)		
*para vencer la resistencia del grano	:	2,64 HP

Figura 10. Resultados numéricos de la simulación y datos iniciales para el secado de café pergamino en secadores estáticos.

2. Secador intermitente de flujos concurrentes "Cenicafé_IFC"

Si en el Menú Principal pulsó sobre **"Secador intermitente de flujos concurrentes Cenicafé_IFC"**, aparecerá en la pantalla el menú correspondiente al "secador intermitente de flujos concurrentes Cenicafé_IFC", tal como se muestra en la Figura 11.

En la Sección A de la Figura 11, debe introducir los "datos del producto (café pergamino), correspondientes a:

- Humedad inicial de la masa de granos, en porcentaje base húmeda (% bh).
- Temperatura inicial de la masa de granos, en grados centígrados (°C)
- Humedad final promedio de la masa de granos (al final del secado), en porcentaje base húmeda (% b.h.).
- Flujo de café pergamino húmedo, en kg.h-m^2 de sección transversal del secador.

En la Sección B de la Figura A.9, deben introducirse los "datos del lugar", correspondientes a:

Altitud, en metros sobre el nivel del mar.
Temperatura ambiente, en grados centígrados (°C)

En la Sección C de la Figura 11, deberán introducirse los "datos del aire de secado" correspondientes a:

- Temperatura, en grados centígrados (°C).
- Humedad relativa, decimal.
- Caudal, en m^3.min-m^2 de sección transversal del secador.

En la Sección D se introducen los "datos del sistema de secado", correspondientes a:

- Sección transversal del secador, en m^2.
- Altura de la columna de secado, en m.
- Imprimir resultados parciales, para lo cual debe introducirse el intervalo de tiempo, en horas, en que se desea que muestre los resultados de simulación.

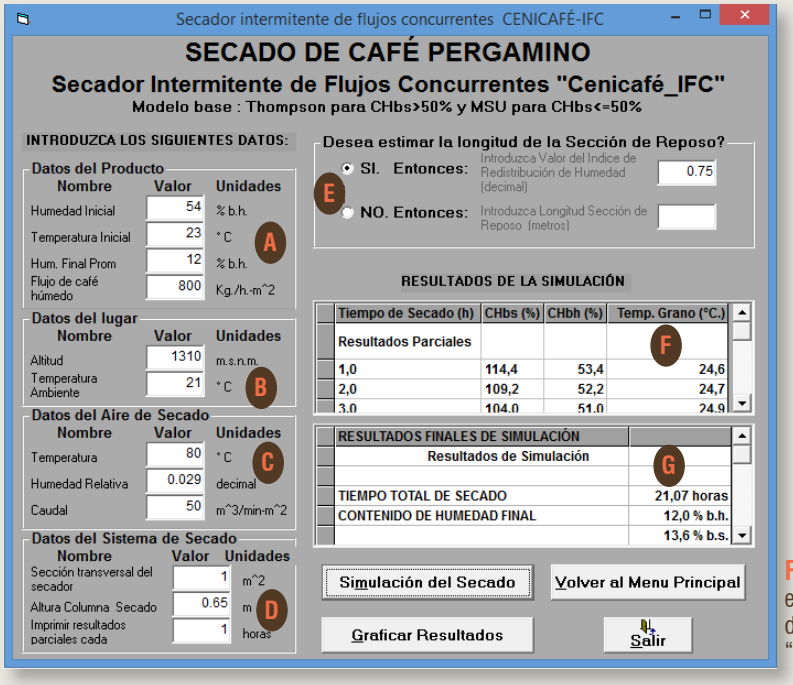


Figura 11. Menú para el secador intermitente de flujos concurrentes "Cenicafé_IFC"

En la Sección E deberá elegir si desea o no “estimar la longitud de la sección de reposo”. Si elige “Sí”, deberá introducir el valor del “índice de redistribución de humedad” (decimal, adimensional). Si elige “No”, deberá introducir el valor de la “longitud de la sección de reposo” (en m).

Tan pronto introduzca los datos requeridos para la simulación y haya verificado que éstos son correctos, pulse en “simulación del secado” para iniciar la ejecución del programa de secado para el secador intermitente de flujos concurrentes “Cenicafé_IFC”. Al cabo de 5 s o de 2 min aproximadamente, dependiendo de la capacidad de su PC, el programa habrá simulado el proceso de secado con los datos que haya introducido inicialmente. En las **ventanas F y G** de la Figura 11, aparecerán los “resultados parciales” y los “resultados finales de la simulación” respectivamente.

Gráfica de contenido de humedad del café vs. tiempo de secado y salida de resultados.

Una vez ejecutado el programa, además de suministrar los resultados por pantalla en las ventanas F y G, éstos son llevados a una hoja electrónica de Excel, al pulsar en “graficar resultados”. De la hoja de Excel son tomados los resultados de tiempo de secado y de contenido de humedad de la masa de café, para ser representados gráficamente (Figura 12). En la pantalla del computador aparecerá la ventana “guardar como”, la cual proporciona la posibilidad de guardar los datos iniciales y los resultados de la simulación en el archivo que desee. La gráfica de tiempo de secado vs. el contenido de humedad del café (% base seca) podrá ser modificada utilizando las herramientas de Excel.

Si en la Figura 12 pulsa sobre “Hoja1”, aparecerán los resultados numéricos de la simulación del secado, correspondientes al contenido de humedad del grano (% base seca) a través del tiempo de secado (ver Figura 13), los cuales estarán ubicados en las columnas B y C. A partir de la columna E, aparecen los datos iniciales para el secado y los resultados finales de la simulación.

Al salir de la hoja de Excel, se retorna al programa de simulación, el cual tiene la posibilidad de realizar nuevas simulaciones para el secador intermitente de flujos concurrentes “Cenicafé_IFC”. Además, tiene las posibilidades de “volver al menú principal (sistemas de secado para café pergamino)” o “salir” del programa.

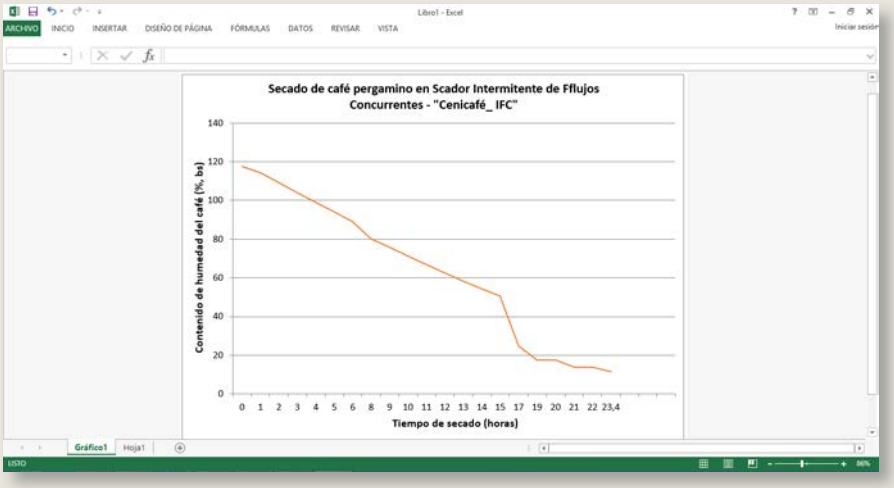
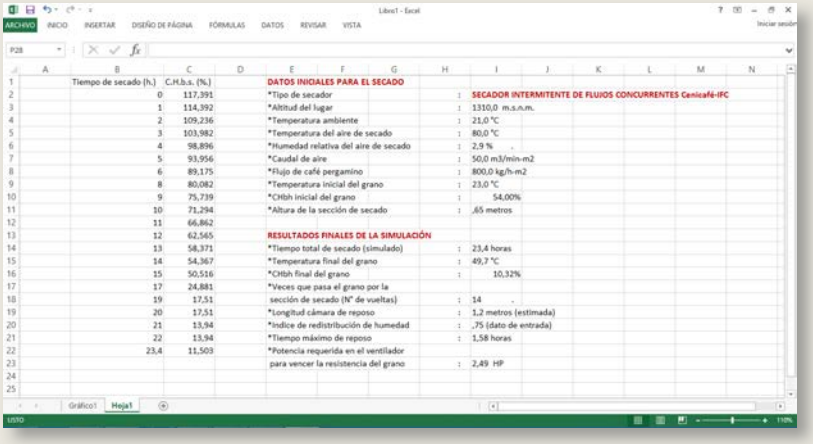


Figura 12. Salida de los resultados de simulación del secado de café pergamino en el secador intermitente de flujos concurrentes “Cenicafé_IFC”, en forma gráfica a una hoja de Excel



Tiempo de secado (h.)	C.H.b.s. (%.)
0	117,391
1	114,392
2	109,236
3	103,982
4	98,896
5	93,956
6	89,175
8	80,082
9	75,739
10	71,294
11	66,862
12	62,565
13	58,371
14	54,367
15	50,516
17	24,881
19	17,51
20	17,51
21	13,94
22	13,94
23,4	11,503

DATOS INICIALES PARA EL SECADO		
*Tipo de secador	:	SECADOR INTERMITENTE DE FLUJOS CONCURRENTES Cenicafé-IFC
*Altitud del lugar	:	1310,0 m.s.n.m.
*Temperatura ambiente	:	21,0 °C
*Temperatura del aire de secado	:	80,0 °C
*Humedad relativa del aire de secado	:	2,9 %
*Caudal de aire	:	50,0 m3/min-m2
*Flujo de café pergamino	:	800,0 kg/h-m2
*Temperatura inicial del grano	:	23,0 °C
*CHbh inicial del grano	:	54,00%
*Altura de la sección de secado	:	,65 metros
RESULTADOS FINALES DE LA SIMULACIÓN		
*Tiempo total de secado (simulado)	:	23,4 horas
*Temperatura final del grano	:	49,7 °C
*CHbh final del grano	:	10,32%
*Veces que pasa el grano por la sección de secado (N° de vueltas)	:	14
*Longitud cámara de reposo	:	1,2 metros (estimada)
*Indice de redistribución de humedad	:	,75 (dato de entrada)
*Tiempo máximo de reposo	:	1,58 horas
*Potencia requerida en el ventilador para vencer la resistencia del grano	:	2,49 HP

Figura 13. Resultados numéricos de la simulación y datos iniciales para el secado de café pergamino en secador intermitente de flujos concurrentes “Cenicafé_IFC”.

Literatura citada

1. ALZATE, J.G. Optimización operacional del silo secador. Medellín : Universidad Nacional de Colombia. Facultad de ciencias agropecuarias, 1992. 240 p. Tesis ingeniero agrícola

2 BAKKER A., T.W.; LEREW, L.E.; DE BOER, S.F.; ROTH, M.C. Grain drying simulation. Michigan : Michigan state university, 1974. 80 p.

3. BROOKER, D.B.; BAKKER A., F.W.; HALL, C.W. Drying and storage of grains and oilseeds: An AVI book. New York : Van Nostrand Reinhold, 1992. 450 p.

4. BUITRAGO, O. Implementación del secado mecánico de café en carros secadores. Bogotá : Universidad Nacional de Colombia. Facultad de ingeniería, 1991. 184 p. Tesis: Ingeniero agrícola.

5. CENKOWSKI, S.; JAYAS, D.S.; PABIS, S. Deep-bed grain drying: A review of particular theories. Drying technology 11(7):1553-1581. 1993.

6. CORREA, A. Evaluación del secado de café - *coffea Arabica* - en un secador intermitente de flujos concurrentes. Medellín : Universidad Nacional de Colombia. Facultad de agronomía, 1987. 258 p. Tesis: Ingeniero agrícola.

7. CFC. Enhancement of coffee quality through prevention of mould formation: Appraisal report. Amsterdam : CFC, 1999. 44 p.

8. DOMÍNGUEZ, J.; PARRA, A. Estudio del potencial de secado con aire natural y energía solar de una región. Bogotá : Universidad Nacional de Colombia. Facultad de ingeniería, 1.982. 135 p. Tesis: Ingeniero agrícola.

9. DOMÍNGUEZ, J.; PARRA, A.; VILLA, L. G. Simulación matemática y optimización del secado de productos agropecuarios con aire natural y energía solar. Ingeniería e investigación 2(3):57-62. 1983.

10. ESTÉVEZ, J.P.; REYES, V.R. Secador por deshumidificación de aire e inversión de flujo, diseño y evaluación: Proyecto de grado ingeniería mecánica. Bucaramanga : Universidad industrial de Santander. Facultad de ingeniería mecánica, 1990. 255 p.

11. ESTRADA R., S.M.; PINEDA C., A.; VÉLEZ V., J.F. Diseño, construcción y evaluación de una secadora de café con recirculación de aire. Medellín : Universidad Pontificia Bolivariana. Facultad de ingeniería mecánica, 1993. 208 p. Tesis: Ingeniero mecánico.

12. FNC. Análisis de la encuesta sobre beneficio y calidades de café: Documento interno de la sección ingeniería agrícola. Manizales : Cenicafé, 1984.

13. GONZÁLEZ S., C.A. Control de temperatura y caudal de aire para optimización del secado mecánico de café. Cali : Universidad del Valle. Facultad de Ingeniería, 2008. 86 p. Tesis: Ingeniero mecánico.

14. GUTIÉRREZ F., J.M. Metodologías 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.

15. JARAMILLO, B.G. Propiedades físicas del café pergamino. Bogotá : Universidad Nacional de Colombia. Facultad de ciencias, 1989. 190 p. Tesis: Maestría en física.

16. JARAMILLO R., A.; ARCILA P., J. Variabilidad climática en la zona cafetera asociada con el evento de La Niña y su efecto en la caficultura colombiana. Manizales : Cenicafé, 2009. 8 p. (Avances Técnicos No. 389).

17. JURADO C., J.M.; MONTOYA R., E.C.; OLIVEROS T., C.E.; GARCÍA A., J. Método para medir el contenido de humedad del café pergamino en el secado solar. Cenicafé 60(2):135-147. 2009.

18. LÓPEZ, J.; OSPINA, J. Ecuación de capa delgada para el café pergamino: Informe de año sabático. Chinchiná : Cenicafé, 1990. 183 p.

19. MARTÍNEZ T., D.G. Aprovechamiento de la energía calórica no utilizada en las estufas

campesinas para el secado mecánico del café. Manizales : Cenicafé, 2000. 75 p.

20. MONTENEGRO, J.Y. Secador eléctrico estático para café de baja capacidad, inversión de flujo y recirculación de aire. Bogotá : Universidad Nacional de Colombia. Facultad de ingeniería, 1992. 161 p. Tesis: Ingeniero agrícola

21. MONTILLA P., J.; ARCILA P., J.; ARISTIZÁBAL L., M.; MONTOYA R., E.C.; PUERTA Q., G.I.; OLIVEROS T., C.E.; CADENA G., G. Caracterización de algunas propiedades físicas y factores de conversión del café durante el proceso de beneficio húmedo tradicional. Cenicafé 59(2):120-142. 2008.

22. MONTOYA R.,E.C.; OLIVEROS T.,C.E.; ROA M., G. Optimización Operacional del Secador Intermitente de Flujos Concurrentes para Café Pergamino. Cenicafé 41(1): 19-33. 1990.

23. OLIVEROS T., C.E.; ROA M., G. Pérdidas de presión por el paso del aire a través del café pergamino, variedad Caturra, dispuesto a granel. Cenicafé 37(1):23-37. 1986.

24. OLIVEROS T., C.E.; RAMÍREZ G., C.A.; SANZ U., J.R.; PEÑUELA M., A.E. Secador de túnel para café pergamino. Manizales : Cenicafé, 2006. 8 p. (Avances Técnicos No. 253).

25. OSPINA, J.E. Evaluación del secador prototipo modificado intermitente de flujos concurrentes_IFC: Informe de año sabático. Chinchiná : FNC : Cenicafé, 1990. 69 p.

26. OSPINA, J.E. Silo Secador Cenicafé: Informe de año sabático. Chinchiná : FNC : Cenicafé, 1990. 57 p.

27. PARRA C., A. Potencial de secado de yuca con aire natural y energía solar en las regiones productoras de Colombia. ACOGRANOS 6(8):12-17. 1990.

28. PARRA C., A. Almacenamiento aireado de maíz en los Llanos orientales. Ingeniería e investigación 29:5-13. 1993.

29. PARRA C., A. Evaluación y utilización práctica de los modelos de simulación matemática de Michigan y de Thompson en el secado de café con aire forzado: Informe final. Chinchiná : Cenicafé, 2000. 108 p.

30. PARRA C., A.; ROA M., G., OLIVEROS T., C.E. SECAFÉ: Modelamiento y simulación matemática en el secado mecánico del café. Revista brasileira de engenharia agrícola e ambiental 12(4):415-427. 2008.

31. PARRA C., A.; ROA M., G., OLIVEROS T., C.E. 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.

32. RAMÍREZ G., C.A.; OLIVEROS T., C.E.; ROA M., G. Construya el secador parabólico. Manizales : Cenicafé. 2003, 8 p. (Avances Técnicos No. 305).

33. RIVERA, O.L.; VÉLEZ P., A. Evaluación de una secadora de café de 12 arrobas (para pequeños cafeteros). Medellín : Corporación Universitaria Lasallista. Facultad de ingeniería de alimentos, 1997. 166 p. Tesis: Ingeniera de alimentos.

34. ROA M., G.; OLIVEROS T., C.E.; ÁLVAREZ G., J.; RAMÍREZ G., C.A.; SANZ U., J.R.; ÁLVAREZ H., J.R.; DÁVILA A., M.T.; ZAMBRANO F., D.A. ; PUERTA Q., G.I.; RODRÍGUEZ V., N. Beneficio ecológico del café. Chinchiná : Cenicafé, 1999. 300 p.

35. ROSSI, J.R.; ROA, G. Secagem e armazenamento de produtos agropecuarios com uso de energia solar e ar natural. Sao Pablo : ACIESP, 1980. 293 p.

36. THOMPSON, T.L.; PEART, R.M.; FOSTER, G.H. Mathematical simulation of corn drying: A new model. Transaction of the ASAE 11(4):582-586. 1968.

37. TREJOS, R.R. Determinación de las curvas de humedad relativa de equilibrio y del calor latente de vaporización del café pergamino y trillado. Cali : Universidad del Valle. Departamento de procesos químicos y biológicos, 1986. 171 p. Tesis: Ingeniera agrícola.

38. TREJOS, R.R.; [et al.]. Enfriamiento del café pergamino en silos. Chinchiná : Almacenes generales de depósito de café : Cenicafé, 1991.

39. WAGNER, R. Historia del café de Guatemala. Bogotá : Benjamín Villegas editores, 2003. 224 p.

ISBN: 978-958-8490-19-9