

OPTIMIZACION OPERACIONAL DEL SECADOR INTERMITENTE DE FLUJOS CONCURRENTES PARA CAFE PERGAMINO¹

Esther Cecilia Montoya-Restrepo; Carlos Eugenio Oliveros-Tascón;
Gonzalo Roa-Mejía*

RESUMEN

MONTOYA R., E.C.; OLIVEROS T., C.E.; ROA M., G. Optimización operacional del secador intermitente de flujos concurrentes para café pergamino. *Cenicafé (Colombia)* 41(1): 19-33. 1990.

En el Centro Nacional de Investigaciones de Café, CENICAFE, se optimizó el desempeño del Secador Intermitente de Flujos Concurrentes (IFC), para café pergamino mediante el modelo de simulación de la Universidad de Michigan. Para su aplicación se determinaron las siguientes propiedades del café *Coffea arabica* var. Caturra: difusión de humedad, entalpía específica, densidad aparente, radio equivalente y área específica. El modelo de simulación fue validado comparando las estimaciones de temperatura y de contenido de humedad del grano, para diferentes valores de parámetros de secado, con valores experimentales obtenidos en secadores tipo IFC de 600 kg y 2.000 kg de café pergamino seco. Las diferencias máximas de contenido de humedad y de temperatura de grano, entre los valores simulados y los experimentales, fueron del 1,0% b.s. y de 5°C, respectivamente. Utilizando el método de "Optimización de la Fuerza Bruta" se optimizó operacionalmente el secador. Las mejores características físicas y condiciones de operación obtenidas fueron: Temperatura de secado: 83°C, Flujo de café pergamino: 800 kg/h.m², Flujo de aire: 50m³/min.m², Índice de redistribución: 0,70, Tiempo de secado: 23,7 h, Número de pasadas del grano a través de la etapa de secado: 12, Longitud de la sección de reposo de 2 m, y Longitud de la cámara de secado de 0,65 m.

Palabras claves: Secado del café, modelos de simulación, optimización, café pergamino.

ABSTRACT

At the National Coffee Research Centre, CENICAFE, the performance of an Intermittent Concurrent Flow Dryer (ICF) for parchment coffee beans was optimized by using a mathematical simulation model based on the Michigan State University drying model. For the development of the simulation model the following physical properties of the parchment coffee beans, *Coffea arabica* Caturra variety, were determined: moisture diffusion, specific enthalpy, bulk density as a function of the moisture content, equivalent radius and specific area. The complete simulation algorithm, based on the Michigan drying model was successfully validated by comparing the real data with the temperature and moisture content estimations, for a wide range drying parameters levels. The experimental data were obtained using two ICF driers with capacity of 600 kg and 2000 kg of dried parchment coffee. Five complete drying experiments were analyzed. The maximum differences in moisture content and grain temperature between simulated and experimental values were 1.0% b.s. and 5°C, respectively. Using the "Coarse Force" optimization method, the IFC dryer was operationally optimized. The best physical dimensions and optimum operational conditions obtained, for a redistribution index of 0.7, were: Drying air temperature: 83°C, Parchment coffee grain flow: 800 kg/h.m², Air flow: 50m³/min.m², Drying time: 23.7 h, Number of recirculations throughout the dryer: 12, Length of the repose section: 2 m, Length of the drying section: 0.65 m.

Keywords: Coffee drying, simulation models, optimization, parchment coffee.

¹ Fragmento de la tesis "Optimización operacional del secador intermitente de flujos concurrentes para café pergamino", presentada por el primer autor como requisito para optar al título de Magister en Investigación Operativa y Estadística. Universidad Tecnológica de Pereira. Risaralda, Colombia.
* Investigador Científico I. Biometría, Investigador Científico II e Investigador Principal I respectivamente. Ingeniería Agrícola. Centro Nacional de Investigaciones de Café, CENICAFE, Chinchiná, Caldas, Colombia.

El secado del café pergamino es la actividad más delicada y costosa del proceso de beneficio del café en húmedo. El secado se realiza por dos métodos: natural y mecánico.

En fincas con producciones anuales mayores de 12.500 kg de café pergamino seco (c.p.s), se requiere normalmente utilizar el secado mecánico, debido a los altos costos relativos de área acondicionada para efectuar el secado natural y de la mano de obra requerida para atender esta labor.

Los silos utilizados en Colombia para el secado mecánico del café pergamino son en general de capa fija. Se construyen en ladrillo y la mayoría de ellos constan de dos cámaras intercomunicadas, denominadas de secado y de presecado, dependiendo del lugar de entrada del aire de secado. En algunos de estos equipos, especialmente el modelo CENICAFE, se puede invertir el sentido del flujo del aire en cada cámara por medio de compuertas, con lo cual se logra mejorar la uniformidad de la humedad del grano.

Con el fin de aportar alternativas para superar las limitaciones observadas en los secadores de capa fija, principalmente la desuniformidad final del producto, disponer de una tecnología con mejor desempeño técnico que el secador CENICAFE (menor tiempo de secado y mejor rendimiento térmico en kJ.kg^{-1} de agua evaporada, y con base en los trabajos de Soares (15) y de Marçal (13) quienes diseñaron y evaluaron Secadores Intermitentes de Flujos Concurrentes (IFC) de una etapa de secado, para café en fruto y para maíz desgranado, respectivamente, López (12), diseñó y evaluó mecánicamente un prototipo de Secador IFC con capacidad para 600 kg de c.p.s.

El secador IFC, en su estructura básica (Figura 1), está compuesto de dos partes

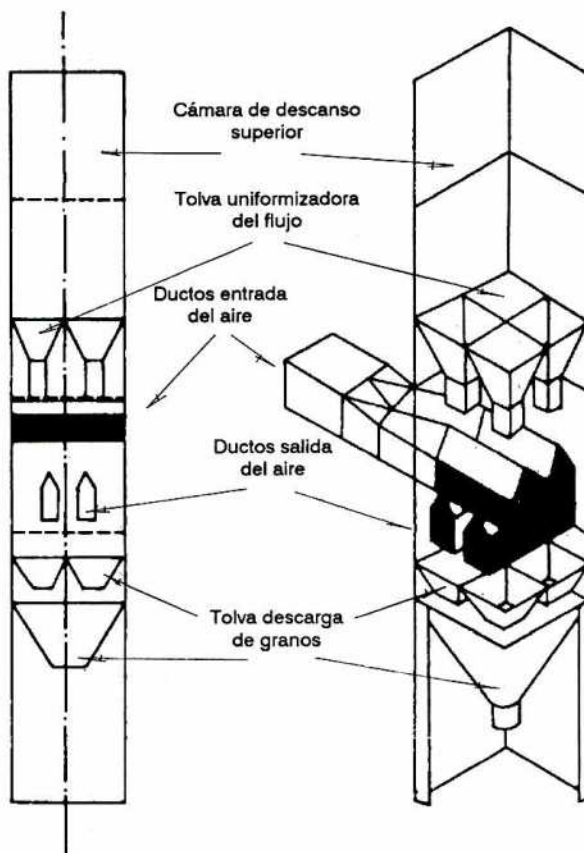


Figura 1. Vista frontal y plano isométrico del Secador Intermitente de Flujos concurrentes IFC construido en CENICAFE.

principales: la cámara de secado y la cámara de reposo.

En la cámara de secado, el aire y el grano fluyen en el mismo sentido; de ahí el nombre de concurrente. En esta cámara, el aire más caliente encuentra el grano más húmedo y produce una alta tasa de evaporación, la cual ocasiona su rápido enfriamiento. Esta característica posibilita el uso de temperaturas más elevadas que las utilizadas en otros secadores; por ejemplo de flujos cruzados y en contracorriente, lo cual permite que los secadores concurrentes sean energéticamente más eficientes.

De la etapa de secado el grano pasa a la de reposo inferior, en la cual no está en contacto

con el aire caliente, y ocurre dentro de él la redistribución de humedad, del interior hacia el exterior. El grano se recircula a través del secador hasta obtener el contenido de humedad deseado, en el rango de humedad del 10-12% b.h. Por la forma de entregar la energía en forma discontinua, el secador recibe el nombre de intermitente.

En los secadores IFC todos los granos reciben el mismo tratamiento de secado por lo cual el producto final es homogéneo, en lo que se refiere a humedad y temperatura.

Correa (8), evaluó el prototipo IFC en cuanto a su desempeño técnico y en la calidad final del café y se observaron buenos resultados. En este trabajo se recurre a la simulación matemática del proceso para optimizar los dimensionamientos de las diferentes partes que componen el secador y su desempeño.

Entre los modelos más utilizados para simular el secado de los granos, están: el Modelo de Huckill, el modelo de Thompson y el modelo de la Universidad del Estado de Michigan. Este último, propuesto por Bakker-Arkema *et al.* (2), es el más completo por estar basado en balances fundamentales y simultáneos de calor y de masa entre el aire y el grano. Los parámetros a estimar en el modelo son: contenido de humedad del grano (M), temperatura del grano (θ), razón de humedad (W) y temperatura del aire (T). Por lo tanto, el modelo de Michigan plantea cuatro ecuaciones diferenciales para representar los balances de energía y masa del sistema, de acuerdo a la Figura 2 y de cuya solución se obtienen los estimativos de los parámetros fundamentales del modelo:

Entalpía del aire. Energía que sale del elemento de volumen = (energía que entra) - (energía transferida por convección).

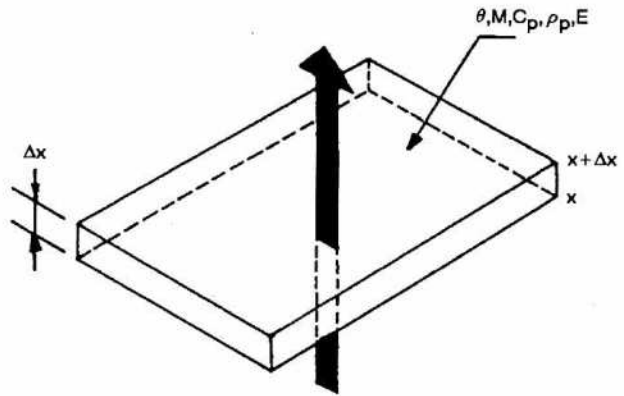


Figura 2. Capa elemental de control para deducir balances de energía y de masa del sistema.

La ecuación resultante es:

$$\frac{\partial T}{\partial x} = \frac{-ha}{GaCa + GaCvW} (T - \theta) \quad \langle \langle 1 \rangle \rangle$$

Entalpía del producto. Energía transferida por convección = (cambio energía en el interior del producto) - (energía de evaporación)

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{ha}{PpCp + Pp(CwM)} (T - \theta) + \frac{hg + Cv(T - \theta)}{PpCp + Pp(CwM)} \frac{\partial W}{\partial x} \quad \langle \langle 2 \rangle \rangle$$

Humedad del aire. Humedad transferida = (humedad que entra) - (humedad que sale)

$$\frac{\partial W}{\partial x} = \frac{Gp}{Ga} - \frac{\partial M}{\partial t} \quad \langle \langle 3 \rangle \rangle$$

Contenido de humedad.

$$\frac{\partial M}{\partial t} = \text{Una ecuación de capa delgada o en su defecto una ecuación de difusión.} \quad \langle \langle 4 \rangle \rangle$$

En donde:

- T = Temperatura del aire, °C
- x = Coordenada espacial, m
- h = Coeficiente de transferencia de calor por convección, $\text{kJ}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-2}\cdot\text{°C}^{-2}$
- a = Área específica del producto $\text{m}^2\cdot\text{m}^{-3}$
- Ga = Flujo del aire seco, $\text{kg}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{m}^{-2}$
- Ca = Entalpía específica del aire seco, $\text{kJ}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{°C}^{-1}$
- W = Razón de humedad del aire, $\text{kg}\cdot\text{kg}^{-1}$
- θ = Temperatura del producto, °C
- Pp = Masa específica del producto expresado en materia seca, $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$
- Cp = Entalpía específica del producto expresado con base en materia seca $\text{kJ}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{°C}^{-1}$
- Cw = Entalpía específica del agua, $\text{kJ}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{°C}^{-1}$
- hg = Entalpía de vaporización, $\text{kJ}\cdot\text{kg}^{-1}$
- M = Contenido de humedad del producto, $\text{kg}\cdot\text{kg}^{-1}$, base seca
- Gp = Flujo del producto, $\text{kg}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{m}^{-2}$
- t = Tiempo de secado, s

Las ecuaciones diferenciales 1, 2, 3 y 4 requieren una solución numérica, ya que una solución analítica del sistema de ecuaciones no es posible.

Para aplicar este modelo de simulación de secado para el café pergamino en el secador IFC se requiere conocer la ecuación de difusión de humedad para el café con el fin de cuantificar los cambios de humedad en el interior de los granos durante los períodos de secado y de reposo, etapa que toma lugar

después de pasar el grano por la cámara de secado.

Dentro de los modelos matemáticos propuestos para describir el movimiento de humedad en el interior de un cuerpo, se tiene la expresión propuesta por Fick citado por Brooker *et al.* (4):

$$\frac{\partial C}{\partial t} = -D \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} \quad \langle \langle 5 \rangle \rangle$$

donde:

- C = Concentración de líquido, $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$
- t = Tiempo de secado, s
- D = Coeficiente de difusión, $\text{m}^2\cdot\text{s}^{-1}$

Al considerar la partícula como un medio poroso con contenido de humedad M, la ecuación 5 puede ser escrita de la siguiente manera, según Cranck, citado por Carnahan *et al.* (5):

$$\frac{\partial M}{\partial t} = D \frac{\partial^2 M}{\partial r^2} + \frac{c}{r} \frac{\partial M}{\partial r} \quad \langle \langle 6 \rangle \rangle$$

Donde:

- M = Contenido de humedad, b.s.
- r = Coordenada espacial, m
- c = 0 para placas planas, 1 para cuerpos cilíndricos y 2 para cuerpos esféricos.

El coeficiente de difusión de humedad de diferentes granos ha sido determinado en

función del contenido de humedad y de la temperatura del producto (6, 9). Algunos autores como Donzeles, Pabis y Henderson, y O'Collaghan *et al.*, citados por Dalpasquela *et al.* (9), consideran el coeficiente de difusión en función solamente de la temperatura del grano cuando éste presenta alto contenido de humedad.

La metodología experimental más utilizada para la determinación del coeficiente de difusión es el registro de los fenómenos de absorción o de desorción, que consiste en determinar el cambio de peso, a lo largo del tiempo, de una capa delgada del producto sometida a condiciones controladas de aire, Brooker *et al.* (4).

Para utilizar el modelo de Michigan para el secado de café pergamino en equipo IFC se requiere además conocer las siguientes propiedades físicas del producto: curvas de humedad de equilibrio, entalpía de vaporización del café, ecuación de difusión de humedad, entalpía específica, densidad aparente, área específica y radio equivalente. De éstas, las dos primeras fueron reportadas por Trejos (16).

Los objetivos buscados en este trabajo fueron:

- Aplicar y validar el modelo de simulación propuesto por la Universidad del Estado de Michigan, para el secado del café pergamino en equipo IFC.
- Determinar los valores de los parámetros: flujo de granos, temperatura y flujo de aire de secado, para obtener el desempeño óptimo del secador.
- Optimizar el dimensionamiento y la operación del secador IFC para café pergamino.

MATERIALES Y METODOS

Los ensayos realizados para obtener los valores que permitieron determinar las propiedades físicas, difusión de humedad, densidad aparente, área superficial y radio equivalente, se llevaron a cabo en el laboratorio para experimentación en beneficio del café del Centro Nacional de Investigaciones de Café, CENICAFE.

Difusión de humedad. Mediante la metodología propuesta en este trabajo se aprovechó el efecto significativo en la humedad relativa del aire intersticial producido por muy pequeñas pérdidas de la humedad del grano (no determinables por los métodos convencionales de determinación de humedad de los granos), bajo condiciones herméticas y adiabáticas. Para el efecto, se acondicionó una masa de café mediante el secado, a un nivel de humedad y temperatura deseados; se colocó una muestra de 1kg en una cámara hermética, denominada cámara de trabajo (Figura 3). Por medio de un ventilador se forzó el aire a

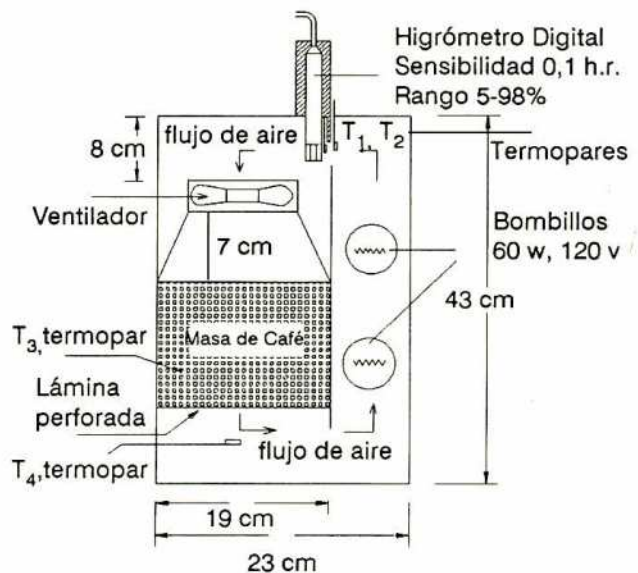


Figura 3. Cámara experimental usada para estimar la difusión de humedad del café pergamino.

través de la masa de granos; la cámara de trabajo con la muestra se introdujo a su vez en otra cámara con temperatura controlada y próxima a la del grano, $\pm 1^\circ\text{C}$; se permitió, dejando la muestra en condiciones de almacenamiento temporal, que la muestra se reposara, es decir que la humedad en el interior de los granos se redistribuyera; durante este período se tomaron lecturas de humedad relativa y de temperatura del aire intersticial, con intervalo de cinco minutos, mediante un termohigrómetro, marca Testoterm, con precisión de 0,1% y de $0,1^\circ\text{C}$, para medir la humedad relativa y la temperatura, respectivamente. Se consideró que ocurrió la redistribución de la humedad en el interior de los granos cuando la lectura de humedad relativa del aire intersticial conservaba su valor durante 30 minutos. Para verificar el hermetismo de la cámara de trabajo se compararon los pesos de las muestras de café antes y después de cada ensayo, con balanza de precisión $\pm 0,1$ g.

El rango de contenido de humedad y temperatura del grano, para los ensayos, fue del 25 al 10% b.s. y de 40 a 55°C , respectivamente. Para valores de humedad de los granos superiores al 25%, se observó que la humedad relativa del aire presentaba valores superiores a 98%, valor límite de lectura de la instrumentación. Para estos altos valores de humedad el agua se evapora de acuerdo a la teoría de evaporación libre, mecanismo mucho más sencillo que el proceso de difusión, Brooker *et al.* (4).

Para estudiar el movimiento de humedad en el interior del grano de café pergamino, durante el reposo, se consideró al grano como un material homogéneo e isotrópico, y se admitió, como se reporta en la literatura para otros granos, Brooker *et al.* (4), que puede ser representado por una esfera de radio equivalente, dividido en 10 casquetes. Cada

casquete estaba representado por un nodo en su radio medio.

Con base en estos datos experimentales, se plantearon las condiciones iniciales y de contorno apropiadas para resolver la ecuación de Fick, para cuerpos esféricos y homogéneos. Se utilizó el método de las diferencias finitas propuesto por Crank Nicholson y el método de solución propuesto por Carnahan *et al.* (5) para resolver la ecuación <<6>>.

Las condiciones de contorno utilizadas fueron:

$$M(r,t) = M_e \text{ para } t = t_p, 0 \leq r \leq R \quad \langle \langle 7 \rangle \rangle$$

$$\partial M(r,t) / \partial r = 0 \text{ para } t > 0, r = 0 \quad \langle \langle 8 \rangle \rangle$$

y para el nodo superficial, se tiene:

$$-D \left. \frac{\partial C}{\partial r} \right|_{n-1} = \left. \frac{\partial C}{\partial t} \right|_n V_{\text{casquete}} + \frac{\Delta H_{\text{abs}} \times F}{t \times N_G} \quad \langle \langle 9 \rangle \rangle$$

Donde:

- r = posición dentro de la esfera, m
- f = Última observación de la prueba de reposo
- R = Radio equivalente del grano de café, m
- t = Tiempo, min.
- M_e = Humedad de equilibrio, base seca, decimal
- D = Coeficiente de difusión m^2/min
- $A_{c,n-1}$ = Área del casquete correspondiente al nodo n-1, m^2
- t = Tiempo, min.

V	=	Volumen del casquete correspondiente al nodo n, m ³
ΔHabs	=	Incremento de humedad absoluta, kg agua/kg aire seco
NG	=	Número de granos de la muestra
C	=	Concentración de humedad, kg agua/m ³
F	=	Factor de conversión

Mediante el método propuesto por Crank-Nicholson se aproximaron las variaciones parciales de contenido de humedad (M) con respecto al espacio (r) y al tiempo (t). La humedad media experimental de la masa de granos, sometida a reposo, se obtuvo aplicando la norma ISO 1678 de 1982 para café. De otro lado, la humedad media del grano fue calculada con base en la media ponderada de la humedad en cada nodo, con relación al volumen representado por él.

Los coeficientes de difusión de humedad del café pergamino, para diferentes niveles de contenido de humedad y temperatura del grano, se ajustaron a un modelo tipo Arrhenius, utilizando el programa de regresión no lineal N-LINA, propuesto por Beck (3). Para "inicializar" el ajuste se utilizaron los parámetros del modelo para el coeficiente de Difusión del maíz, propuesto por Chu y Hustrulid (6).

Radio equivalente. Se determinó el radio equivalente del café pergamino y trillado para diferentes niveles de contenido de humedad. Las muestras provenientes de un mismo lote de café pergamino, variedad Caturra con 53% b.h. de humedad inicial, se acondicionaron mediante el secado en estufa a 55 ± 1°C.

Para cada nivel de contenido de humedad se tomó una submuestra de 30 granos (al azar). Se midió a cada grano, tanto al pergamino como a la almendra, sus dimensiones ortogonales, es decir, largo (l), ancho (a) y es-

pesor (e), con un calibrador Pie de rey, con precisión de 0,05 mm, para calcular el diámetro equivalente con la media geométrica (l.a.e)^{1/3}.

Se estimó el radio medio equivalente, para cada uno de los niveles de contenido de humedad observados, tanto para el café verde como para el pergamino. Además, tanto en el pergamino como en la almendra se estudiaron las posibles diferencias entre los radios promedios correspondientes a cada nivel.

Se obtuvo la información del volumen tanto para el café pergamino como para el café trillado, en diferentes niveles de contenidos de humedad mediante el radio equivalente promedio de la almendra y del pergamino, al considerar al grano como una esfera, y al hacer uso del principio de invarianza.

Area específica. Se determinó el número de granos por kilogramo de producto y se midió la densidad aparente. Al considerar el grano como una esfera, se calculó su área superficial. A partir de la información anterior se estimó el área específica. Se validó la metodología anterior, al medir con un planímetro el área del pergamino de 120 granos.

Densidad aparente. Para obtener la densidad aparente en función del contenido de humedad, se tomaron cinco muestras de café pergamino de 2 kg cada una, con humedad inicialmente de 50 y 53% b.h.

Se prepararon submuestras a diferentes niveles de contenido de humedad, mediante el secado en estufa a 55 ± 1°C. La densidad aparente se midió utilizando la metodología consistente en pesar la masa de granos (previamente colocada según procedimiento normalizado), contenida en un volumen de 5,555

cm³. La relación entre el peso y el volumen corresponde a la densidad aparente del producto.

Los valores de densidad aparente obtenidos para diferentes niveles de contenidos de humedad se ajustaron mediante regresión lineal.

Entalpía específica. La entalpía específica para el café pergamino se calculó aplicando el balance de calor, con el método de las mezclas. Se utilizó como calorímetro un termo recubierto con 5,0 cm de fibra de vidrio en su exterior. Las entalpías específicas del fluido calorimétrico (tolueno) y el de materiales como hierro y cobre, se obtuvieron de la literatura consultada.

Los valores de entalpía específica de café pergamino, obtenidos experimentalmente a diferentes niveles de humedad, se ajustaron mediante una regresión lineal y se obtuvo una expresión para el café pergamino, en función de su contenido de humedad.

Modelo matemático de simulación. Una vez obtenido el modelo matemático o la estimación para cada una de las siguientes propiedades físicas del café pergamino: difusión de humedad, contenido de humedad de equilibrio, entalpía de vaporización, entalpía específica, área específica, densidad aparente y radio equivalente, se aplicó el modelo de simulación del secado de granos propuesto por la Universidad de Michigan, para el secado del café pergamino en el secador IFC.

Para la solución numérica del sistema de ecuaciones diferenciales $\langle \langle 1, 2, 3 \text{ y } 4 \rangle \rangle$ y las condiciones iniciales y de contorno correspondiente $\langle \langle 7, 8 \text{ y } 9 \rangle \rangle$, se usó el método de Adams-Moulton, "inicializado" por el método de Runge-Kutta de cuarto orden, Carnahan *et al.* (5). Para la solución particular de la ecuación de difusión $\langle \langle 6 \rangle \rangle$ se

utilizó el método de diferencias finitas propuesto por Nicholson, citado por Beck (3).

Las ecuaciones de las propiedades físicas del café pergamino obtenidas en este trabajo son válidas en el rango de humedad de 10 a 55% b.s., por lo tanto el modelo matemático sólo puede simular el secado para contenidos de humedad, a partir de este valor hasta el contenido de humedad final deseado.

De acuerdo con Brooker *et al.* (4), la tasa de secado constante que se presenta en productos con alta humedad como el café en el rango de 115% a 55% b.s., está influenciada por las condiciones externas al grano, temperatura y flujo de aire, principalmente. Si estos parámetros son fijos, la tasa de secado permanecerá constante.

Para el caso específico de una capa gruesa de café con humedad inicial de 120% b.s. y secado en equipo IFC, en el cual, de acuerdo con datos experimentales reportados por Correa (8) se presentan tasas de secado constantes, se asumió en el rango 120-55% b.s. una tasa de secado constante.

Validación. Para validar el modelo de Michigan, adaptado al secado del café pergamino en el secador IFC (Figura 1), se tomaron los siguientes datos:

- Información experimental obtenida por Correa (8), en las pruebas experimentales en un secador IFC con capacidad estática de 600 kg de c.p.s.
- Datos experimentales obtenidos en este estudio, en un secador IFC con capacidad para 2.000 kg de café pergamino seco.

Las condiciones generales del aire y del grano utilizados en este proyecto se presentan en la Tabla 1.

TABLA 1. Condiciones iniciales del aire, del grano y de secado en las experiencias realizadas para validar el modelo de simulación de Michigan, adaptado al secado del café pergamino. CENICAFE.

Condiciones	Prueba				
	1	2	3	4	5
Aire ambiente					
Temperatura, °C	21	21	20	20	20
Razón humedad, kg.kg ⁻¹	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01
Condiciones de secado					
Temperatura aire, °C	87	87	82	96,8	70,9
Flujo aire, m ³ /m ² .min	48	48	48	49	50,4
Flujo granos húmedos, kg/m ² .h	1200	1200	1200	2331	1101
Altura columna de secado, m	0,87	0,87	0,87	0,6	0,6
Altura columna de reposo, m	4,35	4,35	4,35	3,04	3,04
Condiciones iniciales del producto					
Temperatura, °C	37	30	35	45	45
Contenido humedad, % b.s.	50	110	119	57,2	50
Condiciones del producto después del secado					
Temperatura, °C	50	52	50	51	51
Contenido humedad, % b.s.	13	13	14	13	16

Los valores experimentales fueron comparados con los obtenidos mediante la simulación del secado, para valores de contenido de humedad inferiores a 55% en base seca, mediante el análisis gráfico de las tasas de secado experimentales y simuladas. Este análisis permite observar gráficamente la precisión del modelo de simulación y además las posibles etapas en las cuales el modelo subestima o sobreestima el proceso de secado. Estadísticamente se compararon las tasas de secado y las temperaturas del grano, mediante una correlación lineal entre lo experimental y lo simulado.

Adicionalmente se analizaron las diferencias absolutas medias y máximas simuladas y experimentales, del contenido medio final de humedad, la temperatura final del grano y el tiempo total de secado.

Algoritmo de optimización. Una vez validado el modelo de simulación para el secado del café pergamino, se hizo uso de él para optimizar el secador IFC operacionalmente, con base al mínimo tiempo de secado y al mínimo número de circulaciones del grano por la etapa de secado (número de vueltas).

Esta última restricción fue necesario tenerla presente para el secado del café con movimiento del grano, ya que el pergamino, envoltura externa del grano, puede partirse y desprenderse de la almendra por causa del accionamiento mecánico del transportador.

Para aplicar un algoritmo clásico de optimización se hace necesario disponer de una función que exprese el tiempo de secado en función de todos los parámetros que intervienen en este tipo de secador.

Por la inexistencia de la función objetivo, se procedió a utilizar el método de la "fuerza bruta" descrito por Fox (10), que consiste en hacer todas las combinaciones posibles de los parámetros de entrada y luego seleccionar la combinación que presente el mínimo tiempo de secado y/o el mínimo número de recirculaciones del grano por la etapa de secado.

El programa para la optimización del secador IFC, elaborado en BASIC, realiza la prueba de secado para cada combinación, de acuerdo a los parámetros iniciales de secado y a los incrementos en cada uno de ellos, definidos en el mismo.

Con base en los resultados suministrados por este modelo de optimización se pudo seleccionar, de acuerdo al mínimo tiempo de secado y el mínimo número de recirculaciones, la mejor operación del secador y la longitud de sección de reposo más adecuada.

Con el fin de optimizar el secador comercial, actualmente disponible en CENICAFE, se ejecutó el algoritmo, obteniéndose un total de 36 pruebas de secado, de las cuales se dedujo la condición para su mejor operación.

RESULTADOS Y DISCUSION

Difusión de humedad. El modelo obtenido, para el coeficiente de difusión del café pergamino, según ajuste tipo Arrhenius fue:

$$D = 4,1582 \times 10^{-8} \text{ Exp } [(0,1346 \theta + 2,2055)\bar{M} - 1184 * (\theta + 273,16)^{-1}]$$

<<10>>

Donde:

D : Difusión de humedad, (m².min⁻¹)

\bar{M} : Contenido de humedad media del grano, dec., b.s.

θ : Temperatura del grano, (°C)

En la Figura 4 se presentan los valores del coeficiente de difusión de humedad para el café pergamino, según la ecuación <<10>>. En esta figura se observa el efecto significativo del contenido de humedad y de la temperatura del grano sobre el valor del coeficiente de difusión. El coeficiente alcanza su mayor valor a los más altos valores de humedad y temperatura. Este comportamiento también ha sido reportado en la literatura para la mayoría de los granos, Brooker *et al.* (4).

La desviación "media" cuadrática (Ψ) entre los valores observados y los estimados según el modelo, corregida por el número de parámetros estimados del mismo, fue del orden de 3,3546316E-10. Este valor (Ψ) se tomó como

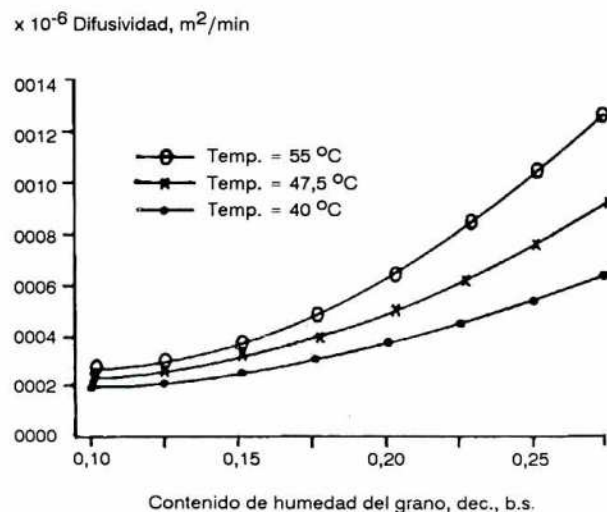


Figura 4. Coeficiente de difusión del café pergamino en función del contenido de humedad del grano bajo tres temperaturas del grano. CENICAFE.

un indicador de la bondad del ajuste del modelo, donde:

$$\Psi = \sqrt{\frac{\sum (\text{Valor observado} - \text{valor calculado})^2}{n - p}}$$

y

n = # de observaciones

p = # de parámetros

Radio equivalente. Los radios medios equivalentes estimados para los diferentes niveles de contenido de humedad para café pergamino variaron de 4,04 mm para contenidos de humedad de (51 y 47% b.h.) hasta 3,85 mm para contenidos de humedad en el rango (42 a 10,5% b.h.).

Para el grano verde (en almendra o trillado) el radio equivalente varió desde 3,87 mm (51 - 47% b.h.), hasta 3,27 mm (25,6 a 10,5% b.h.). Estos valores presentaron un coeficiente de variación entre 3,5% y 6,2%. La prueba de homogeneidad de varianzas tanto para el radio equivalente del pergamino como para el de almendra fue corroborada por el estadístico de prueba JI cuadrado (14,8 y 9,86 al 5% respectivamente).

La comparación de promedios mediante la prueba de Duncan, al 5% mostró que el radio equivalente tanto para café pergamino como para trillado, no cambia en los rangos de humedad del 25,6% b.h. a 10% b.h. y tienen un valor promedio de 3,85 y 3,27 respectivamente, lo que permite inferir que en este rango de humedad se presenta una cámara de aire interna en el café pergamino, de 0,58 mm de espesor (Figura 5).

Al compararse con los valores reportados por Walker (18), para radios equivalentes del arroz y del maíz 0,098 cm y 0,296 cm, respectivamente, se observó que el radio del café

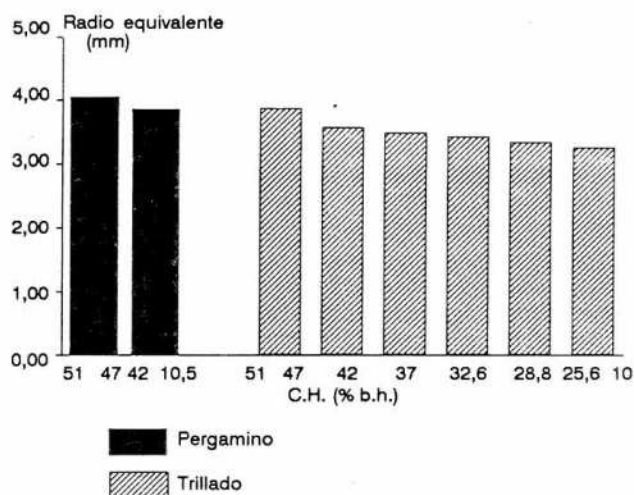


Figura 5. Radio equivalente para café pergamino y trillado con diferentes contenidos de humedad.

pergamino es 3,93 veces más grande que el del arroz y 1,3 veces mayor que el del maíz.

Sin embargo, de acuerdo con Marçal (13), el radio promedio utilizado para la simulación del secado del maíz es 1,267 mayor que el del café pergamino obtenido en este estudio.

A partir del análisis de radio equivalente para café pergamino y trillado, y mediante el uso del principio de invarianza, se obtuvo la información del volumen considerando formas esféricas tanto para café pergamino como para trillado, con diferentes niveles de humedad.

Con base en estos análisis se observa que la almendra representa el 87,9% del volumen del café pergamino, en el rango de humedad de 51% a 47% b.h. En el rango de humedad entre el 25,6% al 10,5% la almendra representa el 61,3% del volumen del café pergamino.

El café pergamino sufre una reducción de volumen del 13,5% cuando por el secado, su

humedad cambia del 51% b.h. al 10,5% b.h. Este valor es superior en un 35% al reportado por Cleves (7).

Area específica. Al considerar el grano de café como una esfera se obtuvo un área específica de 779,8 m².m⁻³ para café pergamino, en el rango de humedad del 25,6% - 10% b.h.

En la validación de la metodología utilizada para calcular el área superficial del café pergamino, al considerar su forma esférica, y mediante la medida del área del pergamino con el planímetro, se observó que dicha información coincide en un 50%.

Densidad aparente. Las expresiones obtenidas para la densidad aparente del café pergamino, en función del contenido de humedad son:

$$DA = 323,739 + 5,597 CH_{bh} \quad <<11>>$$

$$DA = 365,884 + 2,707 CH_{bs} \quad <<12>>$$

Donde el coeficiente de determinación lineal es del 94% y 95% respectivamente, y:

- DA = Densidad aparente, kg.m⁻³
 CH_{bs} = Contenido de humedad, % b.s.
 CH_{bh} = Contenido de humedad, % b.h.

Entalpía específica. Las expresiones para la entalpía específica del café pergamino, obtenidas utilizando el método de las mezclas, son:

$$CP = 1,3536 + 5,7859 CH_{bs} \quad <<13>>$$

$$CP = 0,95657 + 9,6425 CH_{bh} \quad <<14>>$$

Donde:

- CP = Calor específico, kJ.kg⁻¹ °C⁻¹
 CH_{bs} = Contenido de humedad, decimal, b.s.
 CH_{bh} = Contenido de humedad, decimal, b.h.

El coeficiente de determinación obtenido fue de 85,9% respectivamente. Las expresiones anteriores son válidas para contenidos de humedad comprendidos en el rango de 45% b.h. a 11% b.h.

Según Sivets y Foote, los sólidos constituyentes del café tienen una entalpía específica igual a 1,674 kJ/kg, la cual corresponde al intercepto en la expresión dada para el calor específico de café en frutos:

$$CP = 1,674 + 2,51 \times CH_{bh} \quad <<15>>$$

Como se puede observar, los interceptos de las ecuaciones para CH_{bs} y CH_{bh} son aproximadamente el 81% y el 57% del intercepto de la ecuación <<15>>.

Validación y simulación. Los valores de los parámetros del aire y del grano utilizados en las evaluaciones del secador IFC, comercial y prototipo, presentados en la Tabla 1, corresponden a 5 de 12 pruebas experimentales, con el fin de mostrar la bondad del modelo por prueba, con base en el hecho de que el proceso de secado bajo las mismas condiciones del aire y del grano, se considera determinístico, Brooker *et al.* (4).

Los parámetros del modelo validado fueron la temperatura y el contenido de humedad final del grano y del tiempo de secado.

Al comparar las humedades del grano estimadas con las experimentales, para evaluar la

precisión del modelo y describir el proceso de secado, se obtuvo:

- La diferencia absoluta de temperatura final del grano fue la más variable a través de las pruebas, desde 0,7°C hasta 5°C (Tabla 2).
- La máxima diferencia en el contenido de humedad final del grano fue de 1% b.s., Marçal (13) aceptó para este parámetro una diferencia media de 1,5% b.s. y máxima de 3,8% b.s.
- Las diferencias en el tiempo total de secado oscilaron entre 0,12 y 2,17 horas (Tabla 2).

La tasa de secado para cada prueba simulada estuvo muy próxima a la experimental como lo muestra representativamente la Figura 6, para la prueba número 5.

Los coeficientes de correlación para las tasas de secado y temperaturas del grano, entre valores experimentales y simulados fueron del orden de 0,95 a 0,99 (a través de las pruebas) con un nivel de significancia del 1%.

En la validación de la duración del reposo se tomó la información experimental de la prueba número 5, para utilizar el modelo

Contenido de humedad
%, base seca

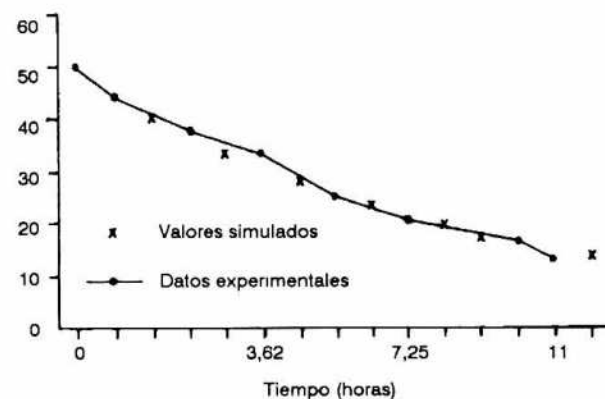


Figura 6. Curva de secado para valores simulados y experimentales según la prueba experimental Nro. 5.

fijando un índice de redistribución de humedad de 0,95. Experimentalmente la duración media de reposo para el rango de humedad 18% y 10% b.s., está entre 2,6 y 4,3 horas. La simulación mostró para el mismo rango de humedad una duración del reposo entre 3,7 y 4,3 horas.

Los excelentes resultados obtenidos de la validación del modelo (Tabla 2) permiten afirmar que éste es apropiado para describir el proceso de secado de café pergamino en un secador IFC.

TABLA 2. Diferencias absolutas entre valores finales de los parámetros de secado en la validación del modelo de Michigan. CENICAFE.

Prueba No.	Temperatura del grano °C	Contenido de humedad %, b.s.	Tiempo de secado h
1	3,0	1,0	2,17
2	4,0	1,0	0,7
3	1,96	0,9	0,1
4	5	0,12	1,33
5	0,7	0,002	0,12

Al utilizar el modelo para realizar un análisis de sensibilidad de los parámetros que intervienen en el proceso de secado, en equipo IFC, se observó lo siguiente:

- La longitud de la cámara de reposo para obtener índices de redistribución superiores a 0,75 debe ser de 3,5 m, valor similar al obtenido por Marçal (13), quien reporta una longitud, para esta cámara de 4 m, obtenida en la mayoría de los casos con un índice de redistribución de 0,6 a 0,75.
- Cuando fueron simuladas alturas de la columna de secado, superiores a 0,6 m, se observó que ocurría poca variación en el contenido de humedad y en la temperatura final del grano. Similar tendencia fue observada por Marçal (13).

Optimización. De acuerdo a los buenos resultados obtenidos en la validación del modelo, se procedió a optimizar operacionalmente el secador comercial IFC en las variables tiempo de secado y número de exposiciones o circulaciones por la etapa de secado.

En total el algoritmo simuló 36 pruebas de secado y se obtuvieron los niveles optimizados de los siguientes parámetros de secado; Temperatura de secado: 83°C, Flujo de café pergamino: 800 kg/h.m², Flujo de aire: 50m³/min.m², Índice de redistribución: 0,70, Longitud de sección de reposo: 2 m.

Se requiere, según estimación del modelo, de 23,7 horas y 12 vueltas de la masa de granos por la etapa de secado, para llevar el café pergamino de 115% b.s. a 13,7% b.s., con temperatura final del grano de 50°C.

La metodología propuesta para determinar el coeficiente de difusión de humedad en el café pergamino es válida, y presenta simpli-

ficaciones con relación a los métodos tradicionales, tanto en el equipo experimental requerido como en la disminución y brevedad de las experiencias necesarias.

Se desarrollaron además de la ecuación de difusión de humedad, expresiones para el calor específico y densidad aparente, como función del contenido de humedad del café pergamino.

LITERATURA CITADA

1. AGRAWAL, K.K.; RAO, H.V. A computer model of psychometric properties of air. Transactions of the ASAE (Estados Unidos) 17(1):67-69. 1974.
2. BAKKER-ARKEMA, T.W.; LEREW, L.E.; DE BOER, S.F.; ROTH, M.C. Grain dryer simulation. Michigan (Estados Unidos), Michigan State University East Lansing, 1974. 80p. (Research Report).
3. BECK, J.V.; ARNOLD, K.J. Parameter Estimation in Engineering and Science. New York (Estados Unidos), John Wiles & Sons, 1977. 55p.
4. BROKKER, D.B.; BAKKER-ARKEMA, T.W.; HALL, C.W. Drying Cereal Grains. Westport (Estados Unidos), The AVI Publishing Co., Inc., 1974. 265p.
5. CARNAHAN, C.; LUTHER, H.A.; WILKES O., J. Applied numerical Methods. New York (Estados Unidos), John Wiley and Sons, Inc, 604p.
6. CHU, S.T.; HUSTRULID, A. Numerical solution of the diffusion equations. Transactions of the ASAE (Estados Unidos) 11(5):705-710, 715. 1968.
7. CLEVES S., P. El secamiento mecánico del café. Boletín de Promecafé (Costa Rica) 1(24):4-6. 1984.
8. CORREA P., A. Evaluación del secado del café *Coffea arabica* en un secador intermitente de flujos concurrentes. Medellín, (Colombia),

- Universidad Nacional, 1987. 258p. (Tesis Ingeniero Agrícola).
9. DALPASQUALE, V.A.; QUEIROZ, D.M. DE; PEREIRA, J.A.M.; SASSERON, J.L. Curvas de secagem de amendoim, utilizando a teoria de difusao de liquido. *Revista Brasileira de Armazenamento (Brasil)*. 9-10(1); (2):16-19. 1984-1985.
 10. FOX, J.R. Optimization methods for engineering design. New York (Estados Unidos), Addison Wesley. 1971. 270p.
 11. GANGADBOR RAO, V.; HARRY B., P. Physical properties related to drying 20 food Grains. Manhattan (Estados Unidos), Department of Grain and Industry, s.f. (Technical Report Nro. 81-164A).
 12. LOPEZ P.,H. Diseño, construcción y evaluación mecánica de un secador intermitente de flujos concurrentes para café pergamino. Cali (Colombia). Universidad Autónoma de Occidente, 1985. 220p. (Tesis Ingeniero Mecánico).
 13. MARÇAL, D. de Q. Simulação de secagem de milho (*Zea mays L.*) em secadores de fluxos concurrentes. Viçosa (Brasil). Universidad Federal de Viçosa, 1984. 69p. (Tesis de Mestrado).
 14. MONTOYA, E.C. Optimización operacional del Secador Intermitente de Flujos Concurrentes para Café Pergamino. Pereira (Colombia), Universidad Tecnológica de Pereira, Facultad de Ingeniería Industrial. 114p. 1989. (Tesis Magister Science).
 15. SOARES S., B. Projeto e construção de um secador intermitente de fluxos concurrentes e su a valiação na secagem de café. Viçosa (Brasil), Universidad Federal de Viçosa, 1982. 57p. (Tesis Mestrado).
 16. TREJOS R.,R. Determinación de las curvas de humedad relativa de equilibrio y de calor latente de vaporización del café pergamino y trillado. Cali (Colombia), Universidad del Valle. 146p. 1986. (Tesis Ingeniero Agrícola).
 17. TREJOS R., R.; ROAM., G.; OLIVEROST., C.E. Humedad de equilibrio y calor latente de vaporización del café pergamino y del café verde. *Cenicafé (Colombia)* 40(1):5-15. 1989.
 18. WALKER, L.P. Process analysis of the multistage concurrent rice dryer degree date. Michigan (Estados Unidos), Michigan State University, 1978. 143p. (Tesis Ph.D.).