

Secado de Café en Lecho Fijo con Intermitencia Térmica y Flujo de Aire Pulsado

Intermittent Coffee Drying in Deep Bed with Pulsed Airflow

Héctor José Ciro Velásquez¹; Misael Cortés Rodríguez² y Jorge Luis López Castaño³

Resumen. Un secador de lecho fijo fue adaptado para trabajar de forma simultánea con intermitencia térmica y flujo de aire pulsado sin inversión de flujo de aire, en el secado de granos de café. El secador fue operado con ciclos de intermitencia térmica para una temperatura de calentamiento de 55 °C y enfriamiento de 40 y 25 °C. Los resultados mostraron que el aumento de temperatura en el ciclo de enfriamiento, tiende a incrementar la remoción de agua y que el aumento del número de pulsos de aire sin inversión del flujo de dirección del aire, ocasiona un secado deficiente debido al excesivo gradiente de humedad ocasionado en la capa de producto. Adicionalmente, se encontró que el consumo de energía específica del secador varió entre 15 y 25 MJ/kg de agua evaporada, siendo el mejor rendimiento termoenergético para la condición en la cual el secador fue operado sin flujo de aire pulsado.

Palabras clave: Café pergamino, eficiencia térmica, transferencia de calor, material biológico.

Abstract. A dryer in deep bed without airflow reversal was adapted to work simultaneously with thermal intermittence and pulsed airflow in the drying of parchment coffee bean. The dryer was operated by cycles of thermal intermittence for a heating temperature of 55 °C and cooling of 40 and 25 °C. The results showed that the increase of temperature in the cycle of cooling tends to increase the water removal and that the increase of the number of air pulses without reversal of the direction of air flow causes an excessive moisture gradient within the batch. Moreover, the specific energy requirement of the dryer was from 15 to 25 MJ/kg, showing the best thermal performance for the condition in which the dryer was operate without pulsed airflow.

Key words: Parchment coffee, thermal efficiency, heat transference, biological material.

En Colombia, el cultivo del café *Coffea arabica* L., es considerado el más importante de la región andina colombiana, representa el 2% del Producto Interno Bruto (PIB) nacional y el 22% del PIB agrícola. El café es uno de los productos principales de exportación y contribuye con el 8% del valor total exportado del país. La caficultura realizada de una forma artesanal tiene un gran impacto sobre la población ya que genera más de 500.000 empleos directos que corresponden al 36% del empleo agrícola total y sobre la calidad del producto, lo cual le ha dado al café de Colombia reconocimiento en el exterior (Fonseca, 2003; Gallego, 2007).

En el beneficio de café húmedo el secado es considerado como una etapa crítica del proceso, disminuyendo el contenido de humedad del producto desde un 55-60% b.h. hasta 10-12% b.h., con el interés de almacenarlo durante periodos prolongados (Parra *et al.*, 2008).

Métodos de secado innovadores como la intermitencia térmica y sistemas de flujo pulsado aplicados en

productos agrícolas están siendo introducidos, con el propósito de incrementar la capacidad de evaporación y la eficiencia energética de las instalaciones (Mujumdar y Law, 2010; Gawrzynski *et al.*, 1999; Nie y Liu, 1998; Soponronnarit *et al.*, 2001). El secado intermitente es un proceso donde el suministro de energía térmica es controlado por periodos de calentamiento y enfriamiento, que favorecen que la humedad se difunda desde la parte interior del sólido hasta la superficie (Cao *et al.*, 2004; Bon y Kudra, 2007). Esta técnica de secado ha sido ampliamente investigada en diferentes productos agroalimentarios (Chou *et al.*, 2000; Shei y Chen, 2002; Chua *et al.*, 2003; Cossen *et al.*, 2003; Nishiyama *et al.*, 2006; Aquerreta *et al.*, 2007; Thomkapanich *et al.*, 2007; Tuyen *et al.*, 2009; Vaquiro, 2009).

A pesar de que se han realizado algunos estudios en Colombia de secado intermitente de café, estos se han concentrado en sistemas fluidizados y de flujo continuo (López, 2006; Parra *et al.*, 2008; Montoya

¹ Profesor Asociado. Universidad Nacional de Colombia - Sede Medellín - Facultad de Ciencias Agropecuarias - Departamento de Ingeniería Agrícola y Alimentos. A.A. 1779, Medellín, Colombia. <hjciro@unal.edu.co>

² Profesor Asociado. Universidad Nacional de Colombia - Sede Medellín - Facultad de Ciencias Agropecuarias - Departamento de Ingeniería Agrícola y Alimentos. A.A. 1779, Medellín, Colombia. <mcorteso@unal.edu.co>

³ Ingeniero Agrícola. Universidad Nacional de Colombia - Sede Medellín - Facultad de Ciencias Agropecuarias - Departamento de Ingeniería Agrícola y Alimentos. A.A. 1779, Medellín, Colombia. <jllopezc@unal.edu.co>

Recibido: Octubre 13 de 2011; aceptado: Diciembre 06 de 2011.

et al., 1990), los cuales no son una tecnología de uso familiar y común para el caficultor colombiano.

El objetivo fue evaluar tecnológicamente un secador de lecho fijo para café usando técnicas combinadas de intermitencia térmica y flujo pulsado de aire sin inversión periódica del flujo de aire.

MATERIALES Y MÉTODOS

Localización. La investigación se desarrolló en el Laboratorio de Procesos Agrícolas, adscrito al Departamento de Ingeniería Agrícola y Alimentos de la Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín, a temperatura y humedad relativa ambiental promedio de 25 °C y 72% respectivamente.

Materia prima. El producto utilizado fue café pergamino húmedo variedad Colombia obtenido mediante el procesamiento con un Módulo de Beneficio Ecológico Becolsub®.

Descripción y operación del secador. Se utilizó un secador en acero inoxidable de geometría cilíndrica de capa estática, con un diámetro de 0,6 m y altura 1,10 m, con calentamiento de aire por medio de resistencias eléctricas (Figura 1). Un sistema de adquisición de datos (Omega®-OMSQ2040), termopares PT100, manómetros de presión diferencial (Omega®-PX274) y sensores de humedad relativa (Elektronic®) fueron acoplados al secador para registro de variables. Los

perfiles de temperatura dentro del lecho de café (15 cm), fueron determinados utilizando 3 termopares (PT100) distribuidos a lo largo del espesor del lecho de granos (4, 8 y 12 cm) colocando en cada posición, tres sensores con desfase a 120° con relación al perímetro del secador.

Para lograr la variación de temperatura en el proceso y definir los diferentes ciclos de intermitencia, el sistema de resistencias eléctricas fue operado junto con una unidad de enfriamiento de aire comercial de capacidad de 87,92 kJ min⁻¹ (Samsung®) y un controlador lógico programable (Maxthermo®-MC 5436). La condición de flujo de aire pulsado fue obtenida, operando una válvula rotativa, instalada en el ducto de salida del aire caliente (aire de entrada a la cámara de secado). Los pulsos de aire fueron limitados por la velocidad de rotación de la válvula, la cual estaba conectada a un motorreductor con variador de frecuencia, permitiendo una frecuencia de rotación entre 0 y 1.750 rpm. La capacidad máxima de flujo volumétrico de aire entregada por el ventilador antes de pasar por la válvula rotativa fue de 0,075 m³ s⁻¹.

Se realizaron pruebas de funcionamiento y estabilidad del equipo de secado, con el fin de observar las posibles desviaciones en el control de temperatura, su variación con diferentes flujos de aire suministrados por el ventilador instalado y los tiempos de respuesta para el cambio de temperatura entre los periodos de calentamiento y enfriamiento.

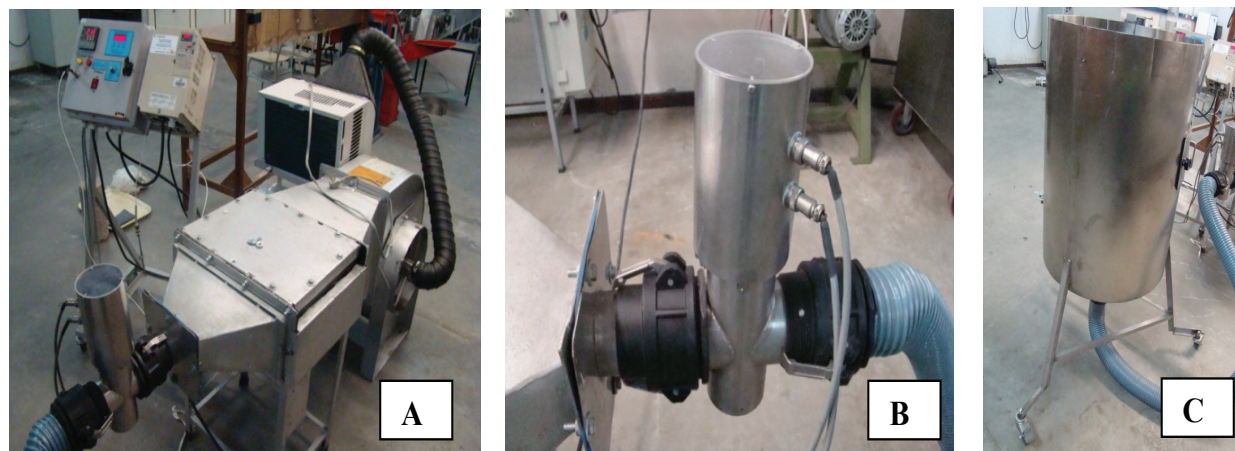


Figura 1. Secador de café lecho fijo con sistema de flujo de aire e intermitencia térmica: ventilador, intercambiador de calor y sistema de control (A); válvula rotativa para generación del pulso de aire (B); lecho fijo de café (C).

Diseño experimental. La Tabla 1 muestra las condiciones experimentales establecidas en este estudio. El proceso de secado fue definido para un tiempo total del proceso de 18 h (tiempo comúnmente usado en el secado de café en capa estática, con espesores < 25 cm), con ciclos de

intermitencia de 8,5 h, correspondientes a dos periodos de calentamiento de 4 h (t_H) y de uno de enfriamiento (t_E) de 0,5 h (30 min). Se realizaron análisis de varianza y pruebas de diferenciación de medias a un nivel de significancia del 5%. Para cada ensayo fueron realizadas dos repeticiones.

Tabla 1. Condiciones experimentales para el secado de café con intermitencia térmica y flujo de aire pulsado.

Tratamientos	Temperatura de calentamiento (°C)	Temperatura de enfriamiento (°C)	Condición de rotación
SF55-40	55	40	Sin generación de pulsos de aire (rpm= 0)
SF55-25	55	25	
860F55-40	55	40	Con generación de pulsos de aire (rpm= 860)
860F55-25	55	25	
1720F55-40	55	40	Con generación de pulsos de aire (rpm= 1.720)
1720F55-25	55	25	

SF: Sin generación de flujo pulsado; 860F: Flujo de aire pulsado a 860 rpm; 1720F: Flujo de aire pulsado a 1.720 rpm.

Evaluación del secador. Se valoraron los efectos de los tratamientos de secado sobre los perfiles de humedad del producto y temperatura de aire en función del tiempo y espesor del lecho. El contenido de humedad del grano de café se determinó al final del proceso a un nivel inferior, medio y superior, correspondiente a espesores del lecho de 1,8 y 15 cm respectivamente, tomando en cada posición dos muestras del producto y utilizando la norma ISO 6673 (Mendonça *et al.*, 2007) para su cuantificación. La evaluación energética del proceso se estableció evaluando el coeficiente de consumo de calor específico (SHC) (Yongsawatdigul y Gunasekaran, 1996; Strumillo *et al.*, 2006), según la ecuación 1, donde M_{ae} es el flujo másico de agua evaporada por el sistema (kg) y Q_t es la cantidad de energía suministrada al sistema (kJ).

El flujo másico de agua evaporada (M_{ae}) se determinó a partir de un balance de materia (ecuación 2), donde m_{as} es el flujo de masa de aire seco (kg/s), W_s y W_e humedad absoluta a la salida y entrada al secador (kg agua/kg aire seco) y t es el tiempo del proceso (min). El cálculo de m_{as} se realizó a partir del flujo volumétrico suministrado por el ventilador y las variables dependientes temperatura y humedad absoluta del aire, a la salida del intercambiador de calor.

$$SHC = \frac{Q_t}{M_{ae}} \quad (1)$$

$$M_{ae} = \int_0^t m_{as} (W_s - W_e) dt \quad (2)$$

La cantidad de energía consumida durante el proceso fue cuantificada con el registro continuo en tiempo real, del consumo de amperaje y voltaje del sistema combinado ventilador-resistencias eléctricas.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La Figura 2 presenta los perfiles de temperatura del aire en función del tiempo de secado y espesor del lecho de café para el tratamiento SF55-40. Las Figuras muestran una tendencia general en la cual la temperatura del aire disminuye con el incremento del espesor del lecho, lo cual es originado por el enfriamiento y humidificación del aire a medida que se evapora la humedad del producto (Sodha y Kumar, 1987; Franca *et al.*, 1994; Pérez y Ciro, 2001; Sitompul *et al.*, 2003; Bennamouny y Belhamri, 2008; Prado y Sartori, 2008). Al final del proceso de secado, disminuye la fuerza motriz a la transferencia de masa, teniendo el producto una menor disponibilidad de agua para su evaporación, y por lo tanto la temperatura del aire tiende a aproximarse a la condición inicial de secado (Zare y Chen, 2009). Un resultado similar fue verificado cuando el secador fue operado bajo el tratamiento SF 55-25.

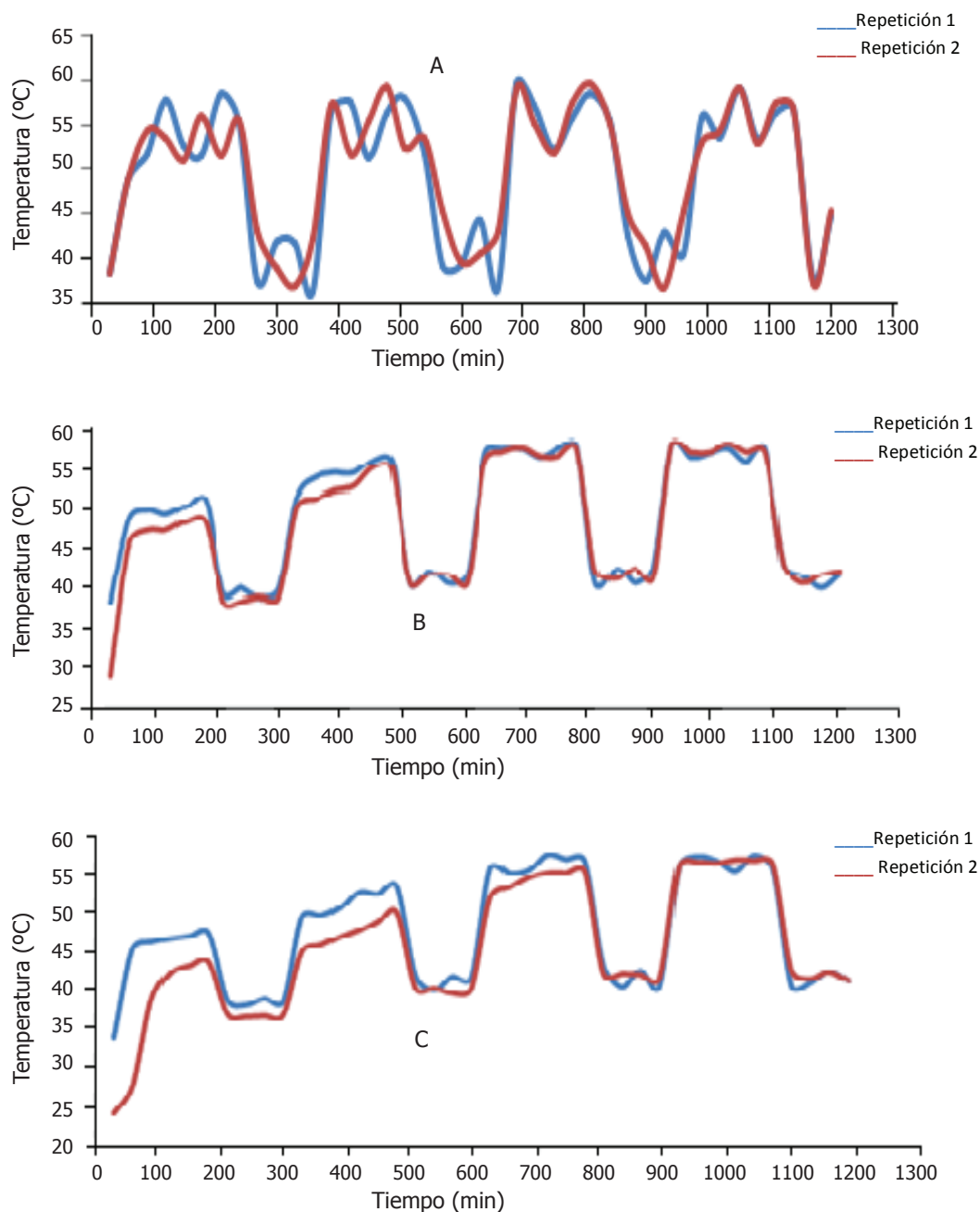


Figura 2. Perfiles de temperatura del aire en función del tiempo de secado y espesor del lecho de café para el ensayo SF55-40: 4 cm (2A), 8 cm (2B) y 12 cm (2C).

La Figura 3 presenta el perfil de temperatura del aire en función del tiempo y espesor del lecho de café para el tratamiento 860F55-40. Se observa que a pesar del uso de pulsos de aire para crear una variación de la presión de vapor de agua dentro de la capa de producto, sigue existiendo un gradiente de temperatura pronunciado entre la capa inferior y superior. Adicionalmente, se

aprecia que la temperatura del aire al interior de la masa de producto es menor comparada con los resultados de la Figura 2, situación que se hace más representativa en la capa intermedia y superior. Un resultado similar fue verificado cuando el secador fue operado con una frecuencia de rotación de 1720 rpm para la generación de pulsos (tratamiento 1720F55-40 y 1720F55-25).

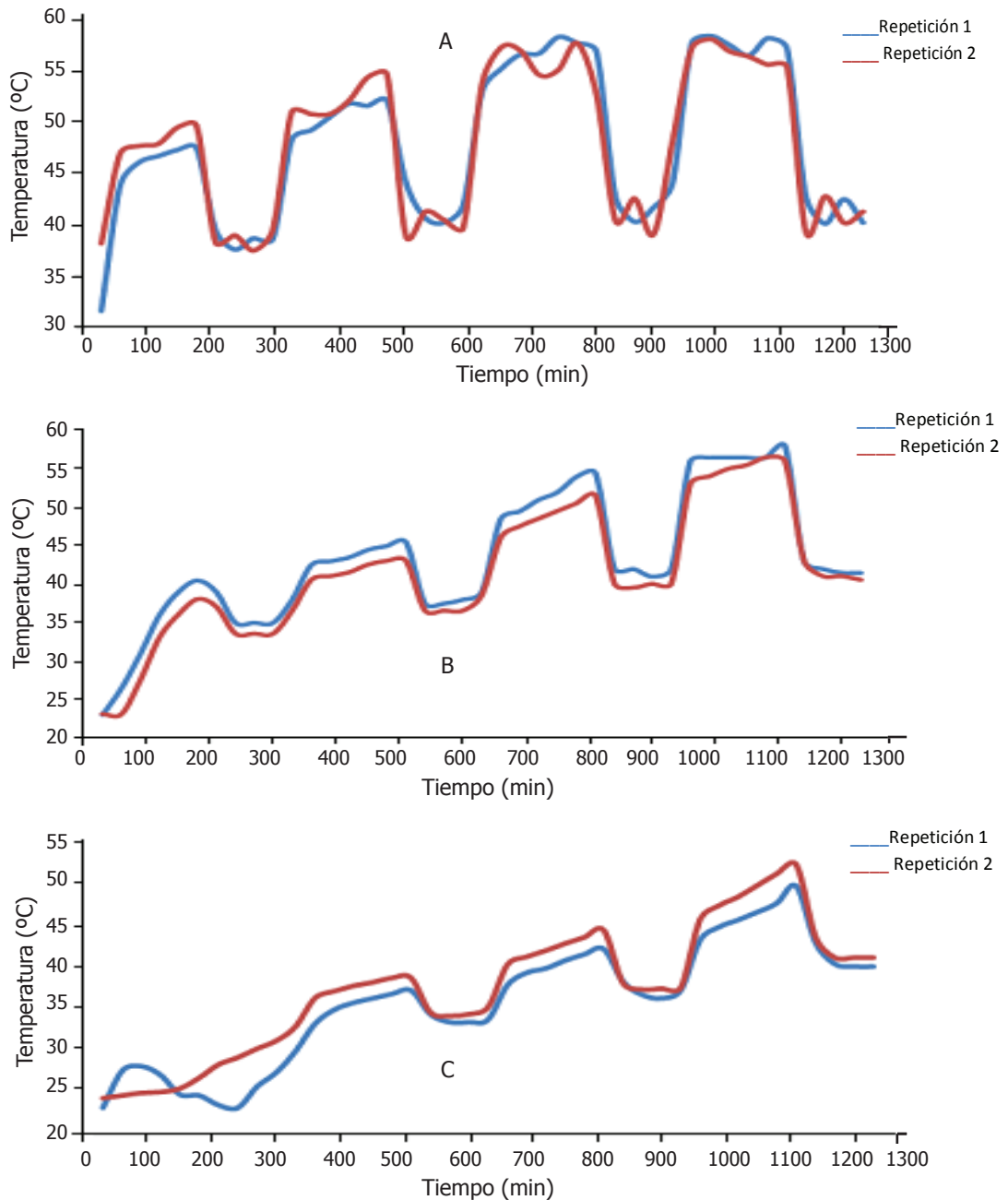


Figura 3. Perfiles de temperatura del aire en función del tiempo de secado y espesor del lecho de café para los tratamientos 860F55-40: 4 cm (3A), 8 cm (3B) y 12 cm (3C).

Los resultados de la medición del flujo volumétrico del aire indicaron, que existe una reducción de la velocidad del aire entre un 35-45% cuando el secador fue operado con generación de pulsos de aire, lo cual podría disminuir los coeficientes de transferencia de masa y calor (disminución de los números adimensionales de Sherwood y Nusselt) y

la remoción de agua desde el producto (Do Prado y Mazzini, 2011).

Comparando los resultados de las Figuras 2 y 3, específicamente para una posición de 12 cm a partir del plenum del secador, se observa que la temperatura del aire tiende a incrementar con el avance del proceso

de eliminación de agua; sin embargo, este aumento de temperatura tiende a ser significativamente menor cuando el secador fue operado con generación de pulsos de aire a una velocidad de rotación de la válvula rotativa de 860 rpm.

De acuerdo a los resultados obtenidos de los perfiles de temperatura del aire para el secador operando en condiciones de intermitencia térmica y flujo de aire pulsado (Figura 3), se observa que el frente de secado se desplaza de forma muy lenta debido probablemente a una baja velocidad del aire dentro del lecho originado por la restricción de flujo generada por la válvula rotativa sumado a las bajas temperaturas, ocasionando que gran parte de la masa de granos se encuentre en condiciones de equilibrio

con el contenido de humedad inicial, generando amplias variaciones en el contenido de humedad, lo que conlleva a que al final del proceso el producto presente valores de humedad superiores al rango comúnmente establecido en la comercialización del café (11-12% b.h.). Así, un nuevo proceso de secado se necesitaría para eliminar los gradientes de humedad, particularmente en las capas intermedias y superiores, lo que económica y técnicamente no sería factible.

La Figura 4 muestra los contenidos de humedad en el grano de café, en función de las condiciones de proceso y la posición. El ANAVA presentó diferencias estadísticas significativas en el contenido de humedad ($P < 0,001$), con respecto al factor posición.

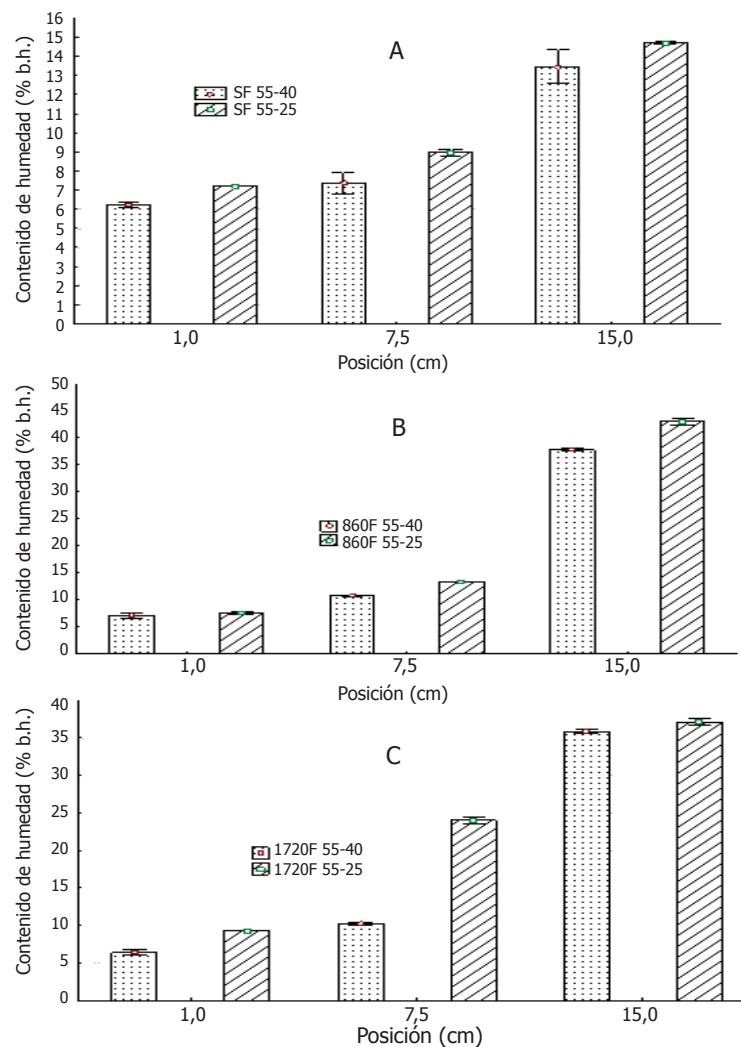


Figura 4. Contenidos de humedad en granos de café en función de las condiciones de secado y posición para los tratamientos: sin generación de flujo pulsado (4A), flujo pulsado a 860 rpm (4B), flujo pulsado a 1.720 rpm(4C).

De acuerdo a los resultados, la capa superior presenta una remoción de agua menor comparada con las capas intermedia e inferior y significativamente superior con relación al valor utilizado como referencia en la comercialización del producto (11-12% b.h). Situación similar ha sido encontrada para café y otros productos dispuestos en lecho fijo (Ratti y Crapiste, 1995; Sun y Woods, 1997; Istadi y Sitompul, 2002; Sitompul *et al.*, 2003; Herman *et al.*, 2005; Parra *et al.*, 2008).

El coeficiente de variación del contenido de humedad en la capa de producto, ha sido empleado como referencia para determinar la homogeneidad del proceso de secado para secadores de capa gruesa o profunda (Pérez y Ciro, 2001). Los valores del coeficiente de variación para los tratamientos SF55-40, 860SF55-40 y 1720SF55-40 (Figura 4A, 4B, 4C) presentan valores de 37, 72 y 75% respectivamente; indicando que la generación de flujo pulsado de aire sin inversión de sentido de dirección, ocasiona un secado no efectivo, afectando la calidad del producto, haciendo del grano de café un producto altamente susceptible al ataque de hongos y contaminación

con micotoxinas (Parra *et al.*, 2008). Coeficientes de variación similares fueron encontrados para los tratamientos SF55-25, 860SF55-25 y 1720SF55-25.

El ANAVA presentó diferencias estadísticas significativas sobre la humedad final del producto ($P < 0,001$), por efecto del factor tratamiento. Se considera que el aumento de temperatura para la temperatura de enfriamiento en el ciclo intermitente, tiende a incrementar la remoción de agua y por lo tanto a disminuir el contenido de humedad del producto. La tasa de secado es una de las variables que se mejora con la aplicación de la intermitencia térmica (Nishiyama *et al.*, 2006). Sin embargo, los resultados anteriores indican que no se logra aumentar la velocidad de secado usando intermitencia térmica junto con flujo pulsado de aire para las condiciones de secado evaluadas.

La Tabla 2, presenta los consumos energéticos del sistema (fluido eléctrico como fuente para calentar el aire), según la condición de operación del secador de café.

Tabla 2. Evaluación energética del secador de café de lecho fijo usando intermitencia térmica y flujo pulsado de aire.

Tratamiento	Consumo de calor específico (MJ/kg)
SF55-40	20,26
SF55-25	15,09
860F55-40	25,73
860F55-25	18,22
1720F55-40	24,51
1720F55-25	19,80

SF: Sin generación de flujo pulsado; 860F: Flujo de aire pulsado a 860 rpm; 1.720F: Flujo de aire pulsado a 1.720 rpm.

Los valores obtenidos indicaron, que energéticamente las mejores condiciones de secado fueron alcanzadas cuando el secador operó con flujo continuo de aire (tratamiento SF55-25), dado que bajo estas condiciones, la tasa de remoción de agua fue más alta (Figura 4) y no existe restricción de flujo de aire. Además, la relación de energía es 8/1 a 10/1 a 55°C, tomando como base el calor latente de vaporización del agua libre, lo que hace del secador un sistema ineficiente cuando el aire es calentado eléctricamente. Este hecho ha sido corroborado en secado de capa profunda para otro tipo de productos (Zare y Chen, 2009). De acuerdo a los resultados de la Tabla 2, el secado de café en capa profunda con intermitencia

térmica y flujo pulsado de aire, es térmicamente no efectivo si se compara con el método secado de flujo continuo en contraflujo y flujo paralelo, donde se han encontrado valores entre 6 y 8 MJ/kg a temperaturas de secado entre 60 y 100 °C (Silva, 1991; Pinto, 1993).

CONCLUSIONES

El secado del grano de café en lecho fijo con intermitencia térmica de temperatura combinado con flujo de aire pulsado y sin inversión de flujo de aire, ocasiona un secado no homogéneo caracterizado por altos gradientes de humedad entre la capa de

grano inferior y superior, con bajas tasas evaporativas ocasionando altos consumo de energía específica.

RECOMENDACIONES

Con el objetivo de ampliar las variables de operación en el secado de café en lecho fijo, es necesario considerar la alternativa de estudiar diferentes flujos de masa de aire y la inversión de la dirección del flujo de aire como mecanismo para reducir los gradientes de humedad en el espesor de capa de café y así poder obtener un secado del producto más uniforme. Así mismo, desarrollar los modelos de simulación de transferencia de masa y calor para predecir los cambios de temperatura del aire y del producto, variación y distribución del contenido de humedad del producto, que permitan su optimización en función de variables de calidad del producto.

AGRADECIMIENTOS

Los autores expresan sus agradecimientos a la Vicerrectoría de Investigación y a la Dirección de Investigaciones Medellín (DIME-Proyecto 20101008805) de la Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín, por el soporte financiero para llevar a cabo este trabajo de investigación y al Laboratorio de Procesos Agrícolas perteneciente al Departamento de Ingeniería Agrícola y Alimentos por la infraestructura utilizada.

BIBLIOGRAFÍA

Aquerreta, J., A. Iguaz, C. Arroqui and P. Viñseda. 2007. Effect of high temperature intermittent drying and tempering on rough rice quality. *Journal of Food Engineering* 80(2): 611-618.

Bennamoun, L. and A. Belhamri. 2008. Mathematical description of heat and mass transfer during deep bed drying: Effect of product shrinkage on bed porosity. *Applied Thermal Engineering* 28(17-18): 2236-2244.

Bon, J. and T. Kudra. 2007. Enthalpy-driven optimization of intermittent drying. *Drying Technology* 25(4): 523-532.

Cao, W., Y. Nishiyama and S. Koide. 2004. Simulation of intermittent drying of maitake mushroom by a simplified model. *Biosystems Engineering* 87(3): 325-331.

Chou, S.K., K.J. Chua, A.S. Mujumdar, M.N.A. Hawlader and J.C. Ho. 2000. On the intermittent drying of an

agricultural product. *Food and Bioproducts Processing* 78(4): 193-203.

Chua, K.J., A.S. Mujumdar and S.K. Chou, 2003. Intermittent drying of bioproducts: An overview. *Bioresource Technology* 90(3): 285-295.

Cnossen, A.G., M.J. Jiménez, and T.J. Siebenmorgen, 2003. Rice fissuring response to high drying and tempering temperatures. *Journal of Food Engineering* 59(1): 61-69.

Do Prado, M.M., S. Mazzini and J. Dermeval. 2011. Chapter 27: Heat and mass transfer in packed bed drying of shrinking particles. pp. 621-648. In: El-Amin M. (ed.). *Mass transfer in multiphase systems and its applications*. In Tech, Germany. 780 p.

Fonseca, L.A. 2003. Colombia: escenario social, económico e institucional de la actual crisis cafetera, <http://www.eclac.org/colombia/noticias/documentosdetrabajo/2/14772/CAF-G-ES.pdf>. 25 p.; consulta: julio 2011.

Franca, A.S., M. Fortes and K. Haghghla. 1994. Numerical simulation of intermittent and continuous deep-bed drying of biological materials. *Drying Technology* 12(7): 1537-1560.

Gallego, J.C. 2007. Proceso de calificación y sello de calidad en relación con el origen, caso: Café de Colombia. Consultoría realizada para la FAO y el IICA en el marco del estudio conjunto sobre los productos de calidad vinculada al origen, http://www.fao.org/ag/agn/agns/Projects_SQP_Santiago/Documentos/Estudios%20de%20caso/Cafe_COLOMBIA.pdf. 47p.; consulta: julio 2011.

Gawrzynski, Z., R. Glaser and T. Kudra. 1999. Drying of powdery materials in a pulsed fluid bed dryer. *Drying Technology* 17(7-8): 1523-1532.

Herman, E., M.A. Salgado and M.A. García. 2005. Mathematical simulation of convection food batch drying with assumptions of plug flow and complete mixing of air. *Journal of Food Engineering* 68(3): 321-327.

Istadi, I. and J.P. Sitompul. 2002. A comprehensive mathematical and numerical modeling of deep-bed grain drying. *Drying Technology* 20(6): 1123-1142.

López, E.M. 2006. Secado de café en lecho fluidizado. *Revista Ingeniería e Investigación* 26(1): 25-29.

- Mendonça, J.C.F., A.S. Franca and L.S. Oliveira. 2007. A comparative evaluation of methodologies for water content determination in green coffee. *LWT - Food Science and Technology* 40(7): 1300-1303.
- Montoya, R., C. Esther, T. Oliveros, E. Carlos y M. Roa. 1990. Optimización operacional del secador intermitente de flujos concurrentes para café pergamino. *CENICAFE* 41(1): 19-33.
- Mujumdar, A.S. and C.L. Law. 2010. *Drying Technology: Trends and applications in postharvest processing*. Food Bioprocess Technology 3(6): 843-852.
- Nie, Y. and D. Liu. 1998. Dynamics of collapsing fluidized beds and its application in the simulation of pulsed fluidized beds. *Powder Technology* 99(2): 132-139.
- Nishiyama, Y., W. Cao and B. Li. 2006. Grain intermittent drying characteristics analyzed by a simplified model. *Journal of Food Engineering* 76(3): 272-279.
- Parra, C.A., M.G. Roa y T.C. Oliveros. 2008. SECAFÉ Parte I: Modelamiento y simulación matemática en el secado mecánico de café pergamino. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental* 12(4): 415-427.
- Pérez, L.R. and H. Ciro. 2001. Mathematical simulation of parchment coffee drying in a deep bed with airflow reversal. *Transactions of the ASABE* 44(5): 1229-1234.
- Pinto, F.A.C. 1993. Projeto de um secador de fluxos contracorrentes/concorrentes e análise de seu desempenho na secagem de café (*Coffea arabica* L.). Tesis de Magister en Ingeniería Agrícola. Universidade Federal de Viçosa, MG, Brazil. 72p.
- Prado, M.M. and D.J.M. Sartori. 2009. Simultaneous heat and mass transfer in packed bed drying of seeds having a mucilage coating. *Brazilian Journal of Chemical Engineering* 25(1): 39-50.
- Ratti, C. and G.H. Crapiste, 1995. Determination of heat transfer coefficients during drying of food stuffs. *Journal of Food Process Engineering* 18(1): 41-53.
- Silva, L.C. 1991. Desenvolvimento e avaliação de um secador de café (*Coffea arabica* L.) intermitente de fluxos contra-correntes. Tesis de Magister en Ingeniería Agrícola. Universidade Federal de Viçosa, MG, Brazil. 74 p.
- Sitompul, J.P., I. Istadi, and S. Sumardiono. 2003. Modeling and simulation of momentum, heat, and mass transfer in a deep-bed grain dryer. *Drying Technology* 21(2): 217-229.
- Shei, H.J. and Y.L. Chen. 2002. Computer simulation on intermittent drying of rough rice. *Drying Technology* 20(3): 615-636.
- Sodha, M.S. and A. Kumar. 1987. A mathematical model for a deep-bed grain drying system, *International Journal of Energy Research* 11(1): 95-111.
- Soponronnarit, S., T. Swasdisevi, S. Wetchacama and W. Wutiwiwatchai. 2001. Fluidised bed drying of soybeans. *Journal of Stored Products Research* 37(2): 133-151.
- Strumillo, C., Jones, P. L. and Zilla, Romuald. 2006. Energy aspects in drying. pp. 1241-1266. In: *Handbook of Industrial Drying*. Second edition. Marcel Dekker, New York. 730 p.
- Sun, D.W. and J.L. Woods. 1997. Simulation of the heat and mass transfer process during drying in deep grain beds. *Drying Technology* 15(10): 2479-2508.
- Thomkapanich, O., P. Suvarnakuta and S. Devahastin. 2007. Study of intermittent low-pressure superheated steam and vacuum drying of a heat-sensitive material. *Drying Technology* 25(1): 205-223.
- Tuyen, T.T., V. Truong, S. Fukai and B. Bhandari. 2009. Effects of high-temperature fluidized bed drying and tempering on kernel cracking and milling quality of Vietnamese rice varieties. *Drying Technology* 27(3): 486-494.
- Váquiro, H.A. 2009. Contribución al estudio y optimización del secado intermitente: aplicación al secado de mango (*Mangifera indica* L. var. Tommy Atkins). Tesis doctoral en Tecnología de Alimentos. Universidad Politécnica de Valencia, España. 263 p.
- Yongsawatdigul, J. and S. Gunasekaran. 1996. Microwave-vacuum drying of cranberries: part I: energy use and efficiency. *Journal of Food Processing and Preservation* 20(2): 121-143.
- Zare, D. and G. Chen. 2009. Evaluation of a simulation model in predicting the drying parameters for deep-bed paddy drying. *Computers and Electronics in Agriculture* 68(1): 78-87.