

ESTUDIO DE LA HIDRODINÁMICA DEL CAFÉ TOSTADO (*Coffea arabica L.*) EN LECHO FLUIDIZADO

HYDRODYNAMICS STUDY OF COFFEE BEANS (*Coffea arabica L.*) ROASTED IN FLUIDIZED BED

J. Sánchez-Ramírez^{1*}, I. Anaya-Sosa², M. G. Vizcarra-Mendoza³,
G. Gutiérrez-López² y T. Santiago-Pineda²

¹Centro Interdisciplinario de Investigación para el Desarrollo Regional, CIIDIR. Unidad Oaxaca. Calle Hornos 1003. Santa Cruz Xoxocotlán, Oaxaca, Oaxaca, México.

²ENCB-IPN. Carpio y Plan de Ayala s/n. C.P. 11340. México D.F., México.

³Universidad Autónoma Metropolitana. Departamento de Procesos e Hidráulica. Av. San Rafael Atlixco no. 156. Col. Vicentina. Del. Iztapalapa. C.P. 09340. México, D.F., México.

Recibido 27 de Mayo 2004; Aceptado 25 de Abril 2007

Resumen

Se estudió la hidrodinámica de la fluidización de los granos de café verde a tres niveles diferentes de temperatura, tiempo y velocidad superficial del aire (U_0). Así mismo se estudió el efecto de éstas variables en el color, pérdida de peso, contenido de humedad, densidad empacada, incremento en volumen y diámetro equivalente.

Café verde var. Typica fue utilizado como material de estudio. Se empleó un diseño factorial 2^3 , con adición de un punto central, para determinar el efecto de las variables independientes sobre los parámetros hidrodinámicos. Los valores del nivel bajo, punto central y nivel alto de la temperatura fueron de 220, 230 y 240°C; 5, 7.5 y 10 minutos para el tiempo de proceso y 3, 3.5 y 4 m/s para la U_0 . La temperatura y el tiempo de tostado tienen un efecto significativo ($p < 0.05$) sobre el color, pérdida de peso, contenido de humedad, densidad empacada e incremento en volumen. Las interacciones tiempo-temperatura y tiempo-velocidad superficial del aire, tuvieron un efecto significativo sobre la pérdida de peso y el incremento en volumen del grano.

Palabras clave: grano de café, tostado, porosidad, fluidización, esfericidad.

Abstract

In this work, the hydrodynamics of fluidization of green and roasted coffee beans was studied at three different levels of temperature, processing time and superficial air velocity U_0 . Also, the effect of these variables on color, weight loss, moisture content, bulk density, increase in volume and equivalent diameter of the coffee bean were studied. Green coffee beans Typical var. was applied as testing material. A factorial design 2^3 was used, adding a central point to determine the effect of independent variables on hydrodynamics parameters. Low level, central point and high levels values were 220, 230 and 240°C for air temperature; 5, 7.5 and 10 minutes for processing times and 3, 3.5 and 4 m/s for U_0 .

Results showed that temperature and processing time had a significant effect ($p < 0.05$) on color of the bean, loss of weight, moisture content, bulk density and increase in volume of grain. Time-temperature and time-air velocity combination also had significant effect on loss of weight and on the increase of grain volume.

Keywords: Coffee bean, roasted, porosity, fluidization, sphericity.

1. Introducción

El tostado del café es el paso que permite cambios importantes en las propiedades químicas, físicas y sensoriales. Durante este proceso sucede el secado del grano, se extrae 10 a 12% de su humedad inicial, hay una redistribución del agua seguido por reacciones químicas como la de Maillard, caramelización de la sacarosa y una pirolisis final de los carbohidratos y proteínas (Clarke R.J., 1985; Illy

y Viani, 1995). Dependiendo de la temperatura final de los granos tostados, casi siempre cercanas a 202°C, hay un 16% de pérdida de peso al tostar. Los porcentajes más altos, se presentan cuando el café queda de color oscuro, siendo del 20% la pérdida de peso, finos poros permiten la movilización de aceite del café que migran hacia la superficie (Illy y Viani, 1995). En este periodo también ocurre el hinchamiento del grano, aproximadamente dos veces su volumen original (Schenker y col., 2000).

* Autor para la correspondencia: E-mail: julio71011096@hotmail.com
Tel. y fax. 01 (951) 51 70610 y 70400.

El proceso de tostado está determinado por el sabor deseado. Esto dependerá a su vez del grado de pirolysis y pérdida de peso; guiado por el desarrollo del color en el punto deseado de tostado. El color y compuestos aromáticos formados vienen acompañados por un aumento en el volumen del grano con alteración en su porosidad dependiendo de las condiciones del proceso (Gutiérrez y col., 1993; Illy y Viani 1995; Schenker y col., 2000; Schenker y col., 2002; Ortolá 1998). La uniformidad del color, después del tostado, es atributo de un café de buena calidad (Aguilar, 1995; Gretsche y col., 1999; Severini y col., 1991; Mwithiga y col., 2003). Cuando el tostado produce un color claro, se presenta mayor aroma y acidez, y hay una pérdida de peso de 14% (Sivetz y Elliott, 1963). Lerici y col., (1980) reportaron para un café arábica tostado a 230°C durante 1 minuto y 15 segundos, que la mejor calidad se obtuvo cuando se alcanza una pérdida de peso de 13.3%, un incremento en volumen de 59.5% y una densidad de 447 kg/m³. Schenker (2002) señala que un tostado a 220°C durante 10 min se logra un aroma suficientemente intenso en tanto que a temperaturas altas (260°C) pueden alterar el aroma. Así mismo Sivetz (1991) reportó que para una temperatura del aire de 250°C y una temperatura del producto de 230°C por un tiempo de tostado de 4-10 minutos, se desarrolla el máximo sabor y aroma.

Por otro lado la fluidización es la operación en la que partículas, generalmente de tamaño pequeño son llevadas a un estado semejante a un fluido a través del contacto con un gas o un líquido. Cuando estos fluidos pasan a través de un lecho de partículas a una velocidad suficiente para suspender y/o dispersar a las mismas e impartirles un movimiento turbulento se tiene un lecho fluidizado (Kunii y Levenspiel, 1991).

En la producción de alimentos el secado por lecho fluidizado y sus variantes como el lecho vibrofluidizado, ha sido objeto de investigación teórica y experimental por varios investigadores (Abid y col., 1990; Armes y col. 1998; Vizcarra y col., 2001). Asimismo el secado fluidizado tiene la ventaja de mayor velocidad de transferencia de calor y masa entre el producto alimenticio y el aire circulante, lo que da como resultado una reducción en el tiempo de proceso.

En cuanto al tostado de café se han fabricado y patentado varios tostadores para café con aire fluyendo a través del grano, dado que se obtiene un producto más uniforme y se tiene una mayor eficiencia en la transferencia de calor que en los equipos tradicionales, en donde la transferencia de calor es por conducción a través de una placa de metal y las temperaturas son superiores a 400°C y el tiempo es de 20 a 30 minutos.

En los reportes sobre equipos para tostado de café los autores hacen una descripción tecnológica del proceso y en la mayoría de los casos se trata de patentes (Lührs, 1985; Mahlmann y col., 1986). No

se reportan datos sobre los parámetros hidrodinámicos, caída de presión y velocidad mínima de fluidización, que son la base para la selección de equipo y determinar el flujo de aire que se requiere para realizar, adecuadamente, la fluidización del grano de café. Además solo se menciona la interacción de la temperatura y el tiempo de tostado. Por lo que en este estudio se planteó determinar la caída de presión y velocidad mínima de fluidización del café verde y probar diferentes niveles de temperatura, tiempo y velocidad superficial del aire, en el tostado del café para determinar su efecto en los parámetros hidrodinámicos (densidad empacada, esfericidad, porosidad del lecho y velocidad mínima de fluidización) y en las propiedades físicas (color, humedad, pérdida de peso e incremento en volumen) del grano que determinan el grado de tostado y calidad del café.

2. Materiales y métodos.

2.1 Material experimental

Se utilizó café verde arábica var. Typica, calidad prima lavado proveniente de Coatepec, Ver. Café arábica.

2.2 Equipo experimental

Un secador de lecho fluidizado que opera de manera intermitente a escala de laboratorio consiste en un túnel de sección cuadrada de 0.2m para la circulación de aire con acoplamiento de una reducción circular que permite quitar y poner un recipiente construido de tubo de acrílico de 0.30m de altura y 0.1m de diámetro interior el cual tiene en el fondo una malla de latón del num. 80 que sirve de área de secado con un manómetro diferencial U para medir las caídas de presión en el lecho al variar la velocidad del aire. El aire que circula es impulsado por un ventilador con capacidad de 0.118m³/s, su motor eléctrico está conectado a un transformador de voltaje Micromaster Vector que permite operar el aire a diferentes velocidades.

Un secador piloto de lecho fluidizado que opera por lotes consiste en un túnel por donde circula aire impulsado por un ventilador con capacidad de 0.3820 m³/s cuyo motor está conectado a un inversor de frecuencia marca Mitsubishi Serie Z200 que permite operar a diferentes velocidades. Tiene acoplado un recipiente de acero inoxidable de 0.60m de altura y diámetro interior 0.25m y disco distribuidor de aire en el fondo que sirve de área de secado con 30% de área abierta. El aire es calentado con un quemador de gas L.P. Marca Eclipse Modelo 40AH. El quemador opera de manera automática por medio de un programador MIG 2000 que permite seleccionar y controlar la temperatura de trabajo.

2.3 Equipo de medición

Medidor de color, Color Mate HDS
Espectrofotómetro, marca Milton Roy.
Termoanemómetro TSI Inc, modelo 8330-M
Termobalanza Ohaus MB200
Termómetro de mercurio
Probeta graduada

3. Metodología.

Se utilizó un diseño factorial 2^3 , con tres variables: temperatura, velocidad de aire y tiempo de tostado codificados como X_1 , X_2 y X_3 respectivamente. Nivel alto: 240°C, 10min y 4m/s; nivel bajo: 220°C, 5min y 3m/s con un total de 8 corridas experimentales. Tres repeticiones en el punto central: 230°C, 7.5min y 3.5m/s La altura del lecho se mantuvo constante con una L/D (altura del lecho/ diámetro de lecho) de 0.3 Las temperaturas fueron ajustadas mediante el programador MIG 2000; la velocidad del aire (U_0) fue registrada mediante un anemómetro digital en la parte central por encima del lecho. El análisis del diseño factorial se realizó con el programa de computo Minitab for Windows, 1996. El análisis de varianza y la gráfica de probabilidad normal de las estimaciones de los efectos, se utilizaron para juzgar la significancia de los factores en las variables respuesta. Del mismo análisis se obtuvieron los coeficientes del polinomio de respuesta. Las respuestas a estudiar fueron el tamaño del grano, densidad empacada, incremento en volumen, contenido de humedad, la pérdida de peso y color del grano.

3.1 Tostado de café

El tostado de café se llevó a cabo en el equipo piloto de lecho fluidizado operado por lotes.

3.2 Color

El color de los granos de café se midió usando un espectrofotómetro Color Mate HDS marca Milton Roy para determinar las coordenadas CIE L^* , a^* y b^* . Se emplearon como testigos café con grado de tostado medio y otro con un grado de tostado oscuro, ambos fueron adquiridos de en ciudad de México. Se determinó la diferencia total de color, de los diferentes tratamientos con la ecuación (McLaren, 1980):

$$\Delta E = \left[\Delta L^* + \Delta a^* + \Delta b^* \right]^{0.5} \quad (1)$$

Donde: ΔE : diferencia total de color en unidades CIELAB.

3.3 Determinación de las características físicas del café verde y tostado

3.3.1 Incremento en volumen

El incremento en volumen del grano se obtuvo por diferencia del volumen medio unitario V_c del grano de café verde y el volumen medio unitario del grano de café tostado, determinado por desplazamiento de un fluido (Mohsenin, 1970).

El volumen medio unitario de los granos, V , se determinó por el método de desplazamiento de un fluido, para partículas de forma irregular En una probeta graduada conteniendo 100ml de aceite vegetal comestible, se le adicionaron 20 granos de café previamente pesados y se midió el volumen desplazado. El volumen desplazado se relaciona con el número de granos adicionados mediante la siguiente expresión:

$$V_c = \text{Vol. desplazado} / \text{número de granos} \quad (2)$$

Se expresó en porcentaje, dividiendo esta diferencia entre el volumen medio unitario del café verde y multiplicando por 100.

3.3.2 Contenido de humedad

El contenido de humedad del café verde y tostado se determinó por el método 10.035. AOAC (1980).

3.3.3 Pérdida de peso del café tostado

Se expresó en porcentaje, pesando muestras de café antes (P_i) y después del tostado (P_f), aplicando la siguiente expresión: Pérdida de peso = $100(P_i - P_f)/P_f$.

3.3.4 Densidad aparente, ρ_a

Se determinó conociendo el peso promedio de la partícula (masa unitaria) y el volumen unitario del grano de café (Mohsenin, 1970):

$$\rho_a = (\text{Masa unitaria} / \text{Vol. unitario}) \quad (3)$$

3.4 Determinación de los parámetros hidrodinámicos de los granos de café verde y tostado.

3.4.1 Densidad empacada, ρ_e .

Se determinó considerando el peso de un lecho empacado de partículas y el volumen total que ocupa en el recinto del secador (Kunii y Levenspiel, 1991)

$$\rho_e = (\text{Masa de partículas} / \text{volumen total}) \quad (4)$$

Diámetro equivalente, d_{eq}

El diámetro equivalente corresponde al diámetro que tendría una esfera con el mismo volumen del grano (Kunii y Levenspiel, 1991). Considerando el

volumen de una esfera el diámetro equivalente se calculó con la expresión:

$$d_{eq} = [(6V_c / \pi)]^{(1/3)} \quad (5)$$

donde:

V_c es volumen unitario del grano de café.

3.4.2 Esfericidad, Φ

La esfericidad se calculó con la relación de las dimensiones de 20 granos de café (Mohsenin, 1970):

$$\Phi = [abc]^{(1/3)} / a \quad (6)$$

donde:

a: longitud del grano

b: ancho del grano

c: altura del grano.

3.4.3 Porosidad del lecho empacado, ϵ

Se determinó mediante la expresión (Kunii y Levenspiel, 1991)

$$\epsilon = 1 - (\text{vol de café en lecho} / \text{vol total de lecho}) \quad (7)$$

3.5 Porosidad del lecho en las condiciones de fluidización mínima, ϵ_{mf}

Se determinó mediante la relación que se cita a continuación, donde la altura de mínima fluidización (L_{mf}) es la altura que adquiere el lecho en las condiciones de velocidad mínima de fluidización (U_{mf}) y L es la altura inicial del lecho empacado (Kunii y Levenspiel, 1991). Ambas cantidades se midieron directamente con ayuda de una regla.

$$\epsilon_{mf} = 1 - [L(1 - \epsilon) / L_{mf}] \quad (8)$$

3.5.1 Velocidad mínima de fluidización, U_{mf}

La U_{mf} experimental para el café verde se determinó en el secador de laboratorio de lecho

fluidizado para una relación L/D de 0.30. La U_{mf} teórica para el grano de café verde y tostado se determinó mediante la siguiente ecuación (Kunii y Levenspiel, 1991).

$$U_{mf} = [(\epsilon_{mf}^3 \Phi d_{eq} (\rho_s - \rho_g) g / 1.75 \rho_g)]^{0.5} \quad (9)$$

Donde:

ϵ_{mf} : porosidad del lecho en mínima fluidización.

Φ : esfericidad de la partícula

d_{eq} : diámetro equivalente de la partícula

ρ_s : densidad del sólido

ρ_g : densidad del gas

g: fuerza de gravedad

4. Resultados y Discusión

4.1 Características físicas y parámetros hidrodinámicos del café verde var. *typica*.

Por las características físicas y parámetros hidrodinámicos del grano de café verde var. *Typica* (Tabla 1), se clasificó como una partícula tipo D (Geldart, 1973) eruptivo.

A velocidad mínima de fluidización (U_{mf}), el grano fluidizó más en el centro, el lecho formó pistones y se presentaron burbujas en las orillas. En condiciones de fluidización franca, se formaron constantemente burbujas grandes, que agitaban el lecho, por un lado se generaban y elevaban las partículas y por otro éstas bajaban y ocupaban el lugar de la burbuja e inmediatamente después se formaba otra burbuja; por lo que el lecho se encontraba en constante agitación.

4.2 Velocidad mínima de fluidización experimental del café verde var. *typica*.

En la Fig. 1 se observa que la velocidad mínima de fluidización experimental U_{mf} a 26°C fue de 2.0 m/s.

Tabla 1. Características físicas y parámetros hidrodinámicos del café verde.

Características físicas	Media	Desviación estándar
Largo x 10 ³ (m)	9.6	±0.7
Ancho x 10 ³ (m)	7.1	±0.5
Altura x 10 ³ (m)	4.0	± 0.5
Peso unitario x 10 ³ (kg)	0.16	±0.002
Volumen medio unitario x 10 ⁴ (m ³)	1.3	±0.03
Densidad aparente (kg/m ³)	1222.0	±0.04
Parámetros hidrodinámicos		
Densidad empacada (kg/m ³)	640.12	±10.61
Esfericidad	0.67	±0.04
Diámetro equivalente x 10 ³ (m)	6.4	±0.005
Porosidad del lecho empacado	0.51	±0.009
Porosidad en condiciones de mínima fluidización	0.63	±0.01
Velocidad mínima de fluidización teórica a 26°C (m/s)	2.10	±0.07
Velocidad mínima de fluidización teórica a 220°C (m/s)	2.70	±0.08
Velocidad mínima de fluidización experimental a 26°C (m/s)	2.0	±0.15

La velocidad mínima de fluidización teórica (Kunii y Levenspiel, 1991) a la misma temperatura fue de 2.1 m/s.

Este diagrama es un acercamiento a la calidad de la fluidización. En general se podría decir, que la fluidización del café verde fue buena, ya que no existieron grandes fluctuaciones en la caída de presión y en la velocidad superficial del aire.

En la región del lecho empacado, cuando el flujo de aire fue bajo, la caída de presión fue aproximadamente proporcional a la velocidad del aire. La caída de presión (140 Pa) permaneció constante, cuando la velocidad del aire fue más alta que la velocidad mínima de fluidización.

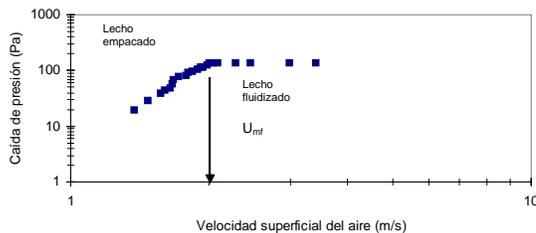


Fig.1. Curva de fluidización experimental del café verde. Altura del lecho 0.03m (L/D = 0.30). Temperatura de 26°C. U_{mf} (Velocidad mínima de fluidización) = 2m/s de la velocidad superficial U_o .

4.3 Parámetros hidrodinámicos y características físicas del café tostado a diferentes tratamientos.

De acuerdo a los resultados mostrados en la Tabla 2 para el café tostado con las condiciones de los tratamientos del diseño factorial los cambios en las características físicas son más marcados que los cambios en los parámetros hidrodinámicos. La temperatura y el tiempo de tostado tuvieron mayor efecto en tales cambios. La esfericidad es mayor para

los tratamientos en donde se utilizó una temperatura de 220°C, mientras que los valores correspondientes al diámetro equivalente y porosidad del lecho empacado son mayores al utilizar una temperatura de 240°C, esto se explica por la expansión que sufre el grano por la formación de poros internos (Schenker y col., 2000). Aunque fue considerable el efecto de las condiciones de tostado sobre densidad empacada, prácticamente del 50% respecto a la del café verde, la disminución de la velocidad mínima de fluidización sólo fue de 30%. Esto se puede atribuir al incremento en diámetro equivalente, en la porosidad del lecho empacado y en la esfericidad, cuyos aumentos fueron de 17%, 5% y 6%, respectivamente.

Estos parámetros mencionados influyen directamente en la velocidad mínima de fluidización. El cambio más notable en las características físicas del grano de café tostado fue el color externo del grano como se puede ver en la Tabla 3. El café obtenido de los dos primeros tratamientos, en donde el proceso se llevó a cabo a 220°C por 5 minutos, resultó con un color café claro; en los tratamientos en donde se utilizó la misma temperatura y un tiempo de 10 minutos, el café resultó con un color café oscuro. Para los tratamientos 5 y 6, en los que el café se tostó a 240°C por 5 minutos, quedó con un color oscuro y con exudación de aceite; en los tratamientos 7 y 8, en donde se utilizó la misma temperatura y un tiempo de 10 minutos, el café resultó totalmente negro y brillante por el aceite que se encontraba en la superficie del grano. Además en estos dos últimos tratamientos, a los seis minutos comenzaba a salir humo del lecho de café. Por lo que se presume que se calentó excesivamente el grano, provocando una carbonización muy drástica del café.

Tabla 2. Valores de los parámetros hidrodinámicos del café tostado con las condiciones de los tratamientos del diseño factorial.

Tratamientos			Esfericidad	Diámetro equivalente $\times 10^3$ m	Densidad empacada kg/m^3	Porosidad lecho fijo	Porosidad a U_{mf}	Velocidad mínima de fluidización ^a m/s
X_1 °C	X_2 min	X_3 min						
220	5	3	0.71 ±0.003	7.3 ±0.002	368.36 ±3.70	0.47 ±0.009	0.64 ±0.025	2.05 ±0.296
220	5	4	0.71 ±0.006	7.3 ±0.003	369.32 ±7.08	0.46 ±0.014	0.61 ±0.017	1.94 ±0.261
220	10	3	0.70 ±0.008	7.6 ±0.001	327.90 ±5.24	0.45 ±0.013	0.66 ±0.027	2.05 ±0.296
220	10	4	0.70 ±0.005	7.5 ±0.006	333.29 ±4.36	0.46 ±0.015	0.69 ±0.027	2.19 ±0.296
240	5	3	0.69 ±0.005	7.8 ±0.005	296.72 ±10.55	0.45 ±0.016	0.65 ±0.014	1.97 ±0.289
240	5	4	0.69 ±0.009	7.8 ±0.008	293.44 ±7.21	0.45 ±0.006	0.67 ±0.021	2.02 ±0.304
240	10	3	0.69 ±0.007	7.9 ±0.005	265.40 ±4.31	0.44 ±0.019	0.67 ±0.055	1.86 ±0.452
240	10	4	0.69 ±0.005	7.9 ±0.001	267.80 ±4.07	0.44 ±0.016	0.67 ±0.037	1.91 ±0.374
230	7.5	3.5 ^b	0.69 ±0.003	7.7 ±0.001	296.13 ±1.24	0.46 ±0.001	0.66 ±0.025	1.88 ±0.282

^a Velocidad mínima de fluidización teórica a temperatura de tostado.

^b Punto central.

Tabla 3. Características físicas del café de los diferentes tratamientos

Tratamiento			Contenido de humedad %	Pérdida de peso %	Incremento en volumen %	Color estándar Italiano	Color estándar Americano
X ₁ °C	X ₂ min	X ₃ m/s					
220	5	3	2.60 ±0.29 ¹	15.66 ±0.15	55.92 ±1.54	2.02 ±0.05	0.89 ±0.18
220	5	4	2.56 ±0.13	15.91 ±0.12	58.48 ±2.35	1.70 ±0.23	1.49 ±0.30
220	10	3	1.94 ±0.19	19.39 ±0.14	74.37 ±1.34	0.90 ±0.08	1.19 ±0.06
220	10	4	2.08 ±0.16	19.15 ±0.10	66.69 ±4.06	0.59 ± 0.18	1.52 ± 0.23
240	5	3	2.08 ±0.06	20.93 ±0.07	88.23 ±4.00	1.14 ±0.14	1.34 ±0.18
240	5	4	1.92 ±0.10	21.20 ±0.25	90.54 ±6.00	0.98 ±0.05	1.63 ±0.13
240	10	3	1.68 ±0.22	27.10 ±0.15	97.05 ±4.51	1.40 ±0.12	2.45 ±0.26
240	10	4	1.73 ±0.15	26.94 ±0.17	95.15 ±1.32	1.83 ±0.13	2.56 ±0.21
230	7.5	3.5	1.79 ±0.18	20.95 ±0.14	81.82 ±0.88	1.1 ±0.05	1.51 ±0.17

¹ Desviación estándar.

Tabla 4. Polinomios con los coeficientes de los efectos principales: (temperatura X₁, tiempo X₂ y velocidad de aire X₃) y sus interacciones en las variables respuesta.

Variable respuesta	Polinomio de los efectos en la variable respuesta
Color (estándar tostado Americano)	$Y = 1.61 + 0.35X_1 + 0.30X_2 + 0.17X_3 + 0.21X_1X_2$
Color (estándar tostado Italiano)	$Y = 1.28 + 0.43X_1X_2 + 0.15X_1X_3$
Pérdida de peso	$Y = 20.76 + 3.21X_1 + 2.42X_2 + 0.68X_1X_2 - 0.17X_2X_3$
Humedad	$Y = 2.04 - 0.22X_1 - 0.21X_2$
Densidad empacada	$Y = 313.15 - 34.44X_1 - 16.68X_2$
Incremento en volumen	$Y = 78.97 + 14.50X_1 - 4.86X_2 - 2.05X_1X_2 - 1.95X_2X_3$
Diámetro equivalente	$Y = 0.76 + 0.02X_1 + 0.007X_2 - 0.00276X_1X_2 - 0.0028X_2X_3$

Mediante análisis de varianza y las gráficas de probabilidad normal de los efectos de los factores, se obtuvo un efecto significativo ($p < 0.05$) sobre el color, utilizando como estándar café con tostado medio o americano. La interacción que tiene efecto significativo sobre el color son los factores X₁, X₂ (temperatura y tiempo de tostado) como se observa en la Tabla 4 donde es mayor que la velocidad del aire por el valor absoluto de los coeficientes. Puede ser que ésta tenga efecto en el desarrollo del color porque al incrementarse es posible que disminuya el coeficiente de película adyacente a la superficie del sólido y la reacción en los componentes del grano se realiza más rápido.

Cuando se utilizó como estándar el café con tostado oscuro o italiano, existió diferencia significativa únicamente para las interacciones temperatura-tiempo (X₁, X₂).

Para los tratamientos en los que el café se tostó a 220°C, la diferencia en color respecto al café americano fue pequeña. La diferencia fue mayor al compararlos con el café oscuro o italiano.

Los valores de las características físicas del café tostado bajo las condiciones de los primeros 2 tratamientos, se encuentran entre los rangos

reportados para los niveles de tostado medio y los tratamientos 3, 4, 5 y 6 se acercan a un nivel de tostado oscuro (Clarke, 1985), la pérdida de materia seca se presenta de acuerdo a los grados de tostado. También se reporta una densidad de 700 kg/m³ para los cafés arábica de tostado medio, correspondiendo a una porosidad del lecho empacado de 0.47, el grado de hinchamiento es del orden de 40-60%.

En la pérdida de peso la temperatura y el tiempo tuvieron el mayor efecto significativo ($p < 0.05$). Le siguen las interacciones temperatura-tiempo y tiempo-velocidad del aire. Al analizar esta última interacción y con la información de la Tabla 3, resulta que existe mayor pérdida de peso cuando el tiempo de tostado se incrementa de 5 a 10 minutos. La diferencia en la pérdida de peso a los 5 y 10 minutos es de 3.7%, para el primer caso; y 3.1% para el segundo. Esto puede explicar el efecto negativo de la interacción tiempo-velocidad del aire, que se observa en la Tabla 3. Ortola y col. (1998) reportan que la pérdida de peso y el contenido de humedad no fueron claramente correlacionados con la temperatura de tostado; sin embargo hubo diferencia significativa ($p < 0.05$) en pérdida de peso durante el tostado de arábica (17.1%).

En la humedad del grano solamente la temperatura y el tiempo resultaron significativos ($p < 0.05$). La humedad del grano se pierde en los primeros minutos del proceso, puede ser que la pérdida de humedad esté gobernada por condiciones internas del grano ya que solamente es cuestión del tiempo y temperatura más que la velocidad del aire. Lericí y col. (1980) consideran de 11-12% a 1.2-2.0%, la apreciable pérdida de agua, durante el tostado de los granos de café. Los tratamientos en donde se aplicó una temperatura de 240°C por 10 minutos, contienen un porcentaje de humedad dentro del rango reportado; sin embargo, son cafés muy oscuros, por eso es admisible, que el café tostado en lecho fluidizado, resulte con contenidos de humedad más altos, que el café tostado en equipos tradicionales.

También la temperatura y el tiempo tuvieron un efecto significativo ($p < 0.05$) sobre la densidad empacada. De acuerdo a Sivetz y Desrosier (1979) un café con tostado ligero puede tener una densidad empacada de 369 kg/m³ y de solo 289 kg/m³ cuando el grano está totalmente oscuro.

En el incremento en volumen la temperatura, tiempo y su interacción, además de la interacción tiempo-velocidad del aire resultaron con efecto significativo. Estos mismos efectos fueron significativos para el diámetro equivalente.

En la Tabla 4 se presentan los polinomios de las variables respuesta. Los coeficientes de los polinomios indican el efecto de la temperatura X_1 , tiempo X_2 y velocidad del aire X_3 . Los efectos de estos factores y sus interacciones presentes en los polinomios son significativos ($p < 0.05$).

Conclusiones

El mayor efecto de las condiciones de tostado se dio en el incremento en volumen del grano (60%), color, pérdida de peso (16-19%), disminución de la densidad (50%) y la humedad (2-2.5%).

En el proceso de tostado en lecho fluidizado, la temperatura y el tiempo tienen efecto significativo en el color del grano, pérdida de peso, humedad, densidad empacada, incremento en volumen y diámetro equivalente. Así mismo las interacciones temperatura-tiempo y tiempo-velocidad del aire afectan significativamente a éstos parámetros, excepto a la humedad y densidad empacada.

La interacción de la temperatura, tiempo y velocidad de aire no tuvo efecto significativo en las características físicas y parámetros hidrodinámicos del café. El incremento en los parámetros que influyen directamente en la velocidad mínima de fluidización del café tostado, como la esfericidad, el diámetro equivalente y la porosidad del lecho en mínima fluidización, cuyos aumentos son de 6%, 17% y 5%, respectivamente; contrarrestan la disminución de la densidad empacada del 50%.

Por lo que la velocidad mínima de fluidización teórica del café tostado (2.0 m/s) solamente se reduce un 25% comparada con el café verde (2.7 m/s).

Referencias

- Abid, M., Gilbert, R., Laguerie, C. (1990). An experimental and theoretical analysis of the mechanisms of heat and mass transfer during the drying of corns grains in fluidized bed. *Int. Chem. Eng.* 30(4):632-642.
- Aguilar, R. (1995). Calidad organoléptica de algunas variedades de cafetos. *Diplomado en cafeticultura y cultivos alternativos en México*. CRUO. Universidad Autónoma Chapingo, Huatusco, Ver. México, 8-9.
- AOAC, (1980). *Association of Official Analytical Chemists*. (30th ed). USA, 1018.
- Clarke, R. J. (1985). *Coffee, Vol. 1: Chemistry*. (1st ed). London: Elsevier Applied Science.
- Geldart, D. (1973) Types of gas fluidization. *Powder Technology* 7:285-292.
- Gretsch, C., Sarrazin, C., Liardon, R., editors. (1999). *Proceedings of the 18th ASIC Colloquium on the Evolution of coffee aroma Characteristics during Roasting: 1999 August 2-6, 1999 in Helsinki*. Paris France: Association Scientifique Internationale du café, 828
- Gutiérrez, C., Ortolá, M.D., Chiralt, A., Fito, P. (1993) Análisis por métodos de la porosidad del café tostado. *Proceed. 15th ASIC Colloquium*; Paris p 661-671.
- Illy, A., Viani, R., editors. (1995) *Espresso coffee*. 1st ed. London: Academic Press Ltd, 253
- Kunii, D., Levenspiel, O. (1991). *Fluidization Engineering*. (2nd ed.). Butterworth-Weinmann, London.
- Lericí, C.R., Dalla, R. M., Magnanini, E., Fini, P. (1980). *Processi di trasformazione del caffè: aspetti chimici, fisici e tecnologici. Nota 4: evoluzione di alcuni caratteri fisici del caffè nel corso della torrefazione*. *Industria delle Bevande*, (9) 375-381
- Lührs, G. (1985). *Advancing fluidized bed equipment*. German Federal Republic. Patent DE 33 25 967 C2.
- Mahlmann, J.P., Sher, L., Schecter, S.M. (1986). Controlled coffee roasting. *European Patent Application*. EP 0183878 A1.
- McLaren, K. (1980). *Food colorimetry. Developments in food colours*. John Wolford. Applied Science Publishers LTD, London
- Mohsenin, N. N. (1970). *Physical properties of plant and animal materials*. Gordon and Breach. Science Publishers. Inc. New York.
- Mwithiga, G., Jindal, V. K. (2003). Physical changes during coffee roasting in rotary conduction-

- type heating units. *Journal of Food Process Engineering*, 26, 543-558
- Ortolá, M.D., Londono, L., Gutiérrez, C.L., Chiralt, A. (1998). Influence of roasting temperature on physicochemical properties of different coffees. *Food Sci. Technol. Int.*, 4:59-66.
- Schenker, S., Handschin, S., Frey, B., Perren, R., Escher, F. (2000) Pore Structure of coffee beans affected by roasting conditions. *Journal of Food Science*. 65(3), 452-457.
- Schenker, S., Heinemann, C., Huber, M., Pompizzi, P. R., Escher F. (2002) Impact of roasting condition on the formation of aroma compounds in coffee beans. *Journal of Food Science*, 67 (1), 60-66.
- Severini, C., Nicoli, M.C., Mastrocola, D., Lerici, C.R. (1991). Influence of heating rate on some physical and physicochemical properties of coffee beans during the roasting process. *Quatorzieme colloquy scientifique international sur le café*. 14-19. Paris, France.
- Sivetz, M., Elliot, F. H. (1963). *Coffee processing technology*. The Avi Publishing Company, Inc, Westport, Conn. Vol. I, 598
- Sivetz, M., Desrosier, N.W. (1979). *Coffee Technology*, AVI Westport, Conn.
- Sivetz, M. (1991) *ASIC'91 Proceedings international conference on coffee science: growth in use of automated fluid bed roasting of coffee beans*, 313-317.
- Vizcarra, M. G, Perez, C., Martínez, C., Ruiz, M. R., (2001). Wheat drying análisis in a vibrofluidized bed. *Proceedings of the Second Inter-American Drying Conference*. Boca del Río Veracruz, México. Julio 8-10.