

HUMEDAD DE EQUILIBRIO Y CALOR LATENTE DE VAPORIZACION DEL CAFE PERGAMINO Y DEL CAFE VERDE ¹

Ricardo Trejos-Rodríguez*, Gonzalo Roa-Mejía, Carlos Eugenio Oliveros-Tascón**

RESUMEN

Trejos R., R.; Roa M., G.; Oliveros T., C.E. Humedad de equilibrio y calor latente de vaporización del café pergamino y del café verde. *Cenicafé* (Colombia) 40(1): 5 - 15. 1989.

Para medir condiciones de humedad relativa de equilibrio higroscópico de café pergamino y de café verde en el rango de 5 a 55°C y de 8 a 98% de humedad relativa del aire para *Coffea arabica* variedad Caturra, se utilizó una cámara no convencional de acondicionamiento para 1.500 g de café, provista de un ventilador axial para recircular el aire. Los puntos de equilibrio se obtuvieron en solamente 2,2 horas en promedio. Parte de los resultados experimentales fueron comparados con los publicados en la literatura para comprobar la validez de la metodología. A humedades relativas mayores del 75% el café verde es más higroscópico que el café pergamino. La ecuación de humedad de equilibrio de Roa se ajustó muy bien a los datos experimentales con claras ventajas sobre las ecuaciones de Henderson y Henderson-Thompson. Las ecuaciones permitirán el estudio sistemático de secadores y de sistemas de almacenamiento. Se establecieron también las ecuaciones para calor latente de vaporización del café pergamino y verde lo cual permite efectuar cálculos precisos para evaluar energéticamente cualquier secador de café pergamino.

Palabras claves: Colombia, postcosecha, beneficio del café, almacenamiento del café, secado del café, *Coffea arabica*.

ABSTRACT

A non-conventional conditioning chamber, provided with a small axial fan for recirculating the air inside the chamber, was used at the National Coffee Research Centre, CENICAFE, to obtain the relative humidity equilibrium conditions. Samples of 1.500 g of parchment and green coffee *Coffea arabica* Caturra variety, were used in the range of 5°C to 55°C and 8% to 98% relative humidity of the air. Each equilibrium point was obtained in an average time of 2.2 hours only. Part of the equilibrium data was compared with equivalent data published in the literature in order to validate the experimental test procedure. At relative humidities higher than 75% green coffee presented higher equilibrium moisture content than parchment coffee. The Roa's equation for equilibrium adjusted very well to the equilibrium data with clear advantages when compared with Henderson's and Henderson-Thompson's equations. The equilibrium moisture content equation will permit simulation studies on drying and storage of green and parchment coffee. Latent heat of vaporization of parchment coffee equations were also developed. These equations can be used to evaluate the thermal efficiency of any parchment coffee drier.

Keywords: Colombia, post-harvest, coffee procesing, drying and storage of coffee, *Coffea arabica*.

¹ Fragmento de la tesis "Determinación de la humedad relativa de equilibrio y del calor latente de vaporización del café pergamino y trillado" presentada por el primer autor como requisito para optar al título de Ingeniero Agrícola. Universidad del Valle. Cali. Colombia.

* Ingeniero Agrícola. Universidad del Valle. Cali. Colombia. 1986.

** Investigador Principal I e Investigador Científico II, respectivamente. Ingeniería Agrícola. Centro Nacional de Investigaciones de Café, CENICAFE, Chinchiná, Caldas, Colombia.

Todos los granos vegetales poseen naturaleza higroscópica. Esto significa que ganan ó pierden ciertas cantidades de agua, según el estado del aire del sitio donde estan localizados y de la composición en si del grano. Para cada condición del aire, determinada por la temperatura y su humedad, corresponde un cierto contenido de humedad del grano. Existe una condición de equilibrio que ocurre cuando la presión de vapor del aire es igual a la presión de la superficie del grano. El grupo de todas las condiciones de equilibrio constituye las curvas de humedad de equilibrio del grano. El café recién lavado posee contenidos de humedad superiores a los contenidos de equilibrio correspondientes a las condiciones ambientales del aire. De esta forma, existe la tendencia natural a que los granos se sequen, aunque lentamente. Si los mismos granos se colocan dentro de un secador, en donde la temperatura del aire está por encima de la temperatura ambiente, el contenido de humedad de equilibrio correspondiente será mucho menor y la tasa de secado aumentará notablemente.

El conocimiento de las curvas de humedad de equilibrio del café es de gran importancia para entender y mejorar el secado y el almacenamiento del grano. Por otro lado, en las últimas décadas los mejores secadores y los procesos óptimos de secado han sido cuantificados con gran precisión en el computador al utilizar los modelos matemáticos de secado. El establecimiento de ecuaciones de las curvas de contenido de humedad ha sido fundamental para tal logro.

Otra propiedad física de gran importancia para poder cuantificar la eficiencia térmica de los secadores es la cantidad de energía necesaria para evaporar el agua contenida en los granos, que se denomina el calor latente de vaporización. El conocimiento de este valor y las medidas de los combustibles consumidos

en el proceso del secado permiten computar la eficiencia con la que se conduce el proceso. En los tiempos actuales es muy importante reducir el consumo de energía y por lo tanto el conocimiento del calor latente de vaporización es el mejor punto de referencia para indicar una mejor operación energética del secador.

Con respecto al café pergamino y al café verde pocos son los estudios efectuados sobre las propiedades físicas del equilibrio higroscópico y del calor latente de vaporización, de tal forma que los datos existentes de curvas de humedad de equilibrio, Wilboux y Hahn (17), Kinch (6), Bacchi (1) y Stirling (14) son muy incompletos con relación al rango de las variables necesarias, lo que los hace inapropiados para los usos prácticos mencionados. Los valores de calor latente de vaporización para el café pergamino reportados por Krack y Piedrahita (7), no son válidos para todo el rango de las variables que se presentan en el secado y el almacenamiento.

Son varios los métodos utilizados para encontrar los puntos de equilibrio higroscópico de los granos, según Brooker *et al.* (2). El método más tradicional consiste en someter muestras pequeñas (30 a 50 g) en una atmósfera con control de temperatura y de humedad utilizando soluciones saturadas de sales o diluciones de ácidos, Hall (4). Este método presenta un problema serio ya que los granos sometidos a humedades altas se deterioran antes de alcanzar el equilibrio. En efecto, el método es bastante demorado porque el equilibrio de humedad ocurre cuando termina el proceso de difusión de la humedad interior del grano hacia la superficie, o inversamente, desde la superficie hasta el interior. Este fenómeno es muy lento y puede demorar, dependiendo de las humedades y de las temperaturas, varios días o aún semanas. Cuando las humedades relativas del aire son altas, el ataque de hongos se presenta gene-

ralmente, con anterioridad al equilibrio y el grano se deteriora y se modifica sustancialmente, de forma que los valores obtenidos no son confiables.

Los objetivos de este trabajo consistieron en encontrar las curvas de contenido de humedad de equilibrio y el calor latente de vaporización del café pergamino y el café verde para *Coffea arabica* var. Caturra y obtener también las mejores ecuaciones que cuantificaran los datos de laboratorio.

MATERIALES Y METODOS

En este trabajo se utilizó el método de la determinación de la humedad relativa de equilibrio que presenta muchas ventajas sobre el tradicional, principalmente en la disminución de tiempo del equilibrio. La validez de esta metodología ha sido reportada por Gough (3), Roa *et al.* (12), Rao y Pfof (10), y Rossi y Roa (13).

En efecto, la misma cantidad de agua cedida o ganada por el grano la gana o cede el aire intersticial, que posee aproximadamente 5.000 veces menos cantidad de agua. Un pequeño cambio en el contenido de humedad en el grano hace variar significativamente la presión de vapor del aire y se consigue el equilibrio de presiones en forma muy rápida.

Basados en los resultados obtenidos utilizando la metodología desarrollada por Rossi y Roa (13) con el objetivo de disminuir aún más el tiempo de equilibrio, aumentar la representatividad de la muestra y obtener medidas experimentales más precisas, con los mismos instrumentos utilizados, se proyectó un nuevo dispositivo experimental según se muestra en la Figura 1. Consiste en una caja construida en aluminio de 2 mm de espesor, con 0,43 x

0,28 x 0,19 m de dimensiones exteriores. La cara frontal de la cámara se construyó en acrílico para facilitar la conducción del experimento. Internamente la cámara se dividió en dos sub-cámaras mediante una lámina del mismo material. En la parte izquierda de la cámara y sobre una lámina perforada metálica se colocó la muestra, consistente en aproximadamente 1.500 g de café. Un pequeño ventilador axial se colocó 7 cm por encima del depósito de café con el objeto de forzar el paso del aire por la masa, para acelerar y uniformizar el intercambio de humedad y de calor entre los granos y el aire. Al salir el aire de la masa de café, pasaba a la otra sección de la cámara en donde existían dos bombillos incandescentes de 60 vatios, controlados en su potencia por un reóstato, y cuya función era calentar el aire cuando se quería pasar de una condición de equilibrio a otra.

Durante una determinación del punto de equilibrio estos bombillos permanecieron apagados y el aire pasaba por la parte superior

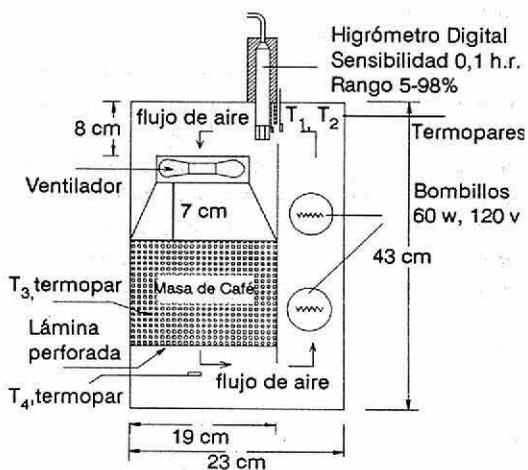


Figura 1. Dispositivo experimental (cámara de trabajo) usado para determinar las humedades relativas de equilibrio del café pergamino y verde, contruida en CENICAFE.

nuevamente a la sub-cámara izquierda, por una abertura de área controlada, en donde se leía su temperatura y humedad mediante un sensor electrónico, marca Testoterm, de rango 5 - 98% de humedad relativa, sensibilidad 0,1% y error máximo del 2%.

El control del área de paso del aire se hizo con la finalidad de poder someter el sensor del Testoterm a la velocidad mínima de 4,6 metros por segundo, según la recomendación dada por el fabricante. El caudal del aire que pasaba fue determinado leyendo la caída de presión estática ocasionada por el paso del aire por la masa de café según se indicará más adelante. El aire era recirculado por la acción del ventilador. Seis termopares de cobre-constantan fueron utilizados para registrar continuamente los valores de temperatura en diferentes puntos de la cámara: antes de entrar el aire a la masa de café, en la mitad de la misma, a la salida del aire de la masa, en el paso superior del aire entre las dos cámaras adyacentes al sensor de humedad del aire y en el exterior de la cámara, cuya temperatura era controlada por otra cámara mayor.

El caudal de aire recirculado por el ventilador dentro de la cámara de acondicionamiento fue determinado de la siguiente forma: Se colocó una capa de 0,13 m de café pergamino seco sobre la lámina metálica perforada y se leyó la caída de presión del aire en la masa de grano mediante un manómetro inclinado. Se utilizó la ecuación de Oliveros y Roa (8):

$$Q/A = 0,4003 \frac{\Delta P^{0,678}}{L} \quad <<1>>$$

que es válida para café pergamino seco y en donde,

$$Q/A = \text{Flujo del aire, m}^3 \cdot \text{min}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$$

A = Área transversal, m² (La sección transversal fue de 0,19 x 0,19 m)

ΔP = Caída de presión, Pa

L = Altura de la capa de café, m

con $\Delta p = 18,4$ Pa y $L = 0,13$ m se obtuvo $Q/A = 11,51 \text{ m}^3 \cdot \text{min}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$, lo cual permitió estimar un caudal de $Q = 0,42 \text{ m}^3 \cdot \text{min}^{-1}$. El área de la compuerta de paso del aire en donde estaba colocado el sensor de humedad fue graduada hasta obtenerse una velocidad del aire de 4,9 m/s.

Todas las muestras de café que se colocaron en el dispositivo experimental fueron secadas previamente en un secador de laboratorio (construido en el LIQC) operado a 50°C, provisto de compuertas para invertir la dirección del aire y evitar desuniformidad del contenido de humedad de las muestras. Por haber sido obtenidas las muestras después de una operación de secado, las curvas de equilibrio se obtuvieron en este trabajo por desorción. El contenido de humedad de estas muestras fue registrado por pesajes, lo que permitió conocer previamente su valor.

El inicio del procedimiento experimental para la obtención de los puntos de humedad relativa de equilibrio consistió en tomar aproximadamente 1.500 gramos de una muestra secada previamente con contenido de humedad conocido, 4,8%, en base seca y que había sido guardada en una bolsa de polietileno de 2 mm de espesor, a 5°C. La muestra fue colocada sobre la malla perforada en el interior de la cámara de acondicionamiento, que se había introducido previamente en otra cámara mayor de convección forzada, con temperatura controlada a 10°C.

El ventilador de la cámara de acondicionamiento fue accionado y el proceso empezó a

medida que ocurría la transferencia de calor de la cámara grande a la pequeña, a través de las paredes de aluminio. La transferencia de calor a través de estas paredes fué muy rápida debido a: el material constitutivo, su pequeño espesor y a que las corrientes de aire en contacto con las paredes, tanto internas como externas, eran forzadas por los ventiladores. El calor que ganaba el aire de la cámara de acondicionamiento fue también eficientemente transmitido a la muestra de granos, porque éstos, dispuestos a granel con el aire pasando por los espacios intersticiales se constituían en excelentes intercambiadores de calor y de masa. El área de intercambio de los granos fue aproximadamente de 2 metros cuadrados. De esta forma, la muestra que inicialmente estaba a 5°C aumentó su temperatura hasta los 10°C, después de 5 horas de acondicionamiento. Este fue el tiempo máximo de acondicionamiento durante todas las experiencias y se debió a que el grano más seco es el que presenta menor difusividad térmica. Durante el período de acondicionamiento se registraban las temperaturas y la humedad del aire y se observó continuamente el aumento de las temperaturas y la disminución de la humedad relativa.

El equilibrio térmico y de humedad se determinaba al observar la igualdad, por un período mínimo de dos horas, de las temperaturas de todos los termopares localizados en la masa de los granos y la estabilidad en la lectura del medidor de la humedad relativa del aire. Se observó durante la experiencia que el ventilador axial que forzaba el aire a pasar por los granos lo calentaba. Este efecto acumulativo de generación de calor fué contrarrestado disminuyendo un poco la temperatura de la cámara de control, por debajo de la temperatura deseada.

Inmediatamente después de haberse obtenido el equilibrio de la primera muestra a

10°C se aumentó la temperatura de la cámara de control de temperatura y se conectaron los bulbos incandescentes para acelerar el proceso de calentamiento de la masa de granos. Después de 4,5 horas se obtuvo el nuevo punto de equilibrio del grano con el mismo contenido de humedad y una temperatura de 25°C.

Se continuó con el procedimiento experimental para diferentes temperaturas y para muestras, con distintos contenidos de humedad. El contenido de humedad máximo con que se pudo trabajar sin que se condensara vapor de agua en las paredes de la cámara fue de 25,2% en base seca.

Al final a cada muestra se le determinaba el contenido de humedad siguiendo la norma ISO 6673, mediante una estufa de convección forzada a 105°C durante 16 horas. Se comprobó, para todas las muestras, que, en efecto, no modificaron sus contenidos de humedad a pesar del aumento de temperatura desde los 5°C hasta los 55°C, lo cual indicó que la cantidad de agua transferida del grano al aire fue mínima.

RESULTADOS Y DISCUSION

En total, fueron utilizados, para café pergamino, once contenidos de humedad y cuatro temperaturas. Para cada uno de los estados se efectuaron tres repeticiones. El promedio de los resultados de las tres repeticiones se presenta en la Tabla 1. El coeficiente de variación promedio de las 3 repeticiones fue de tan solo 3,2%, lo que indica la consistencia en la repetición de las experiencias.

Para café verde se utilizaron seis contenidos de humedad y cuatro temperaturas del aire, con tres repeticiones para cada experimento. Los resultados se presentan la Tabla 2.

TABLA 1. Promedio de la humedad relativa de equilibrio del café pergamino obtenido experimentalmente en CENICAFE con la utilización de diferentes combinaciones de temperaturas del aire y contenidos de humedad del café *Coffea arabica* var. Caturra*.

Humedad del café (% base seca)	Temperatura de Equilibrio °C				C.V.
	10	25	40	55	
4,8	5,0	9,0	10,5	13,5	16
6,0	-	13,0	15,0	20,0	6
8,0	16,5	21,5	27,5	33,5	4,5
9,4	32,0	38,5	42,5	46,0	2,0
11,6	52,0	56,0	60,0	63,5	3,5
13,8	66,0	-	72,0	-	1,5
14,6	70,0	72,5	75,0	77,5	1,2
18,0	81,0	83,5	85,6	88,0	0,8
19,0	86,0	88,0	90,0	92,0	2,5
21,4	90,0	92,0	94,0	96,0	1,5
25,2	98,0	100,0	100,0	100,0	0,5

* Promedio de 3 repeticiones.

TABLA 2. Promedio de la humedad relativa de equilibrio del café verde obtenido experimentalmente en CENICAFE, mediante la utilización de diferentes combinaciones de temperatura del aire y contenidos de humedad del café *Coffea arabica* var. Caturra*.

Humedad del café (% base seca)	Temperatura de Equilibrio °C				C.V.
	10	25	40	55	
4,0	8,0	10,0	13,0	16,5	9,0
8,0	25,0	30,0	39,0	44,0	2,0
12,0	58,5	62,5	66,5	70,0	1,3
16,0	74,0	77,0	78,5	80,0	2,0
20,0	83,5	85,0	87,0	80,0	2,0
24,0	90,5	91,5	92,5	93,5	0,8

* Promedio de tres repeticiones,

En las Figuras 2 y 3 se muestran los resultados experimentales consignados en las Tablas 1 y 2.

Contenido de humedad % , base seca

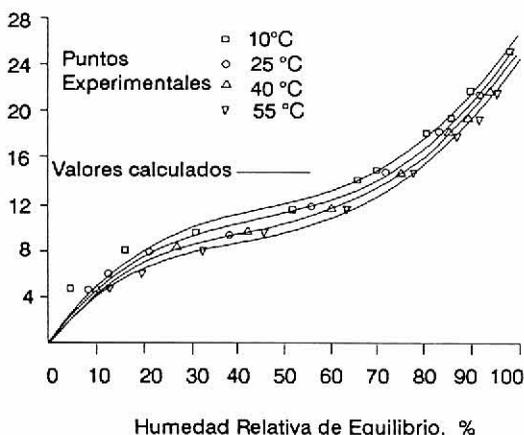


Figura 2. Curvas de contenido de humedad de equilibrio del café pergamino, obtenidas en CENICAFE, utilizando la ecuación de Roa (11) (Método de humedad relativa de equilibrio).

Contenido de Humedad % , base seca

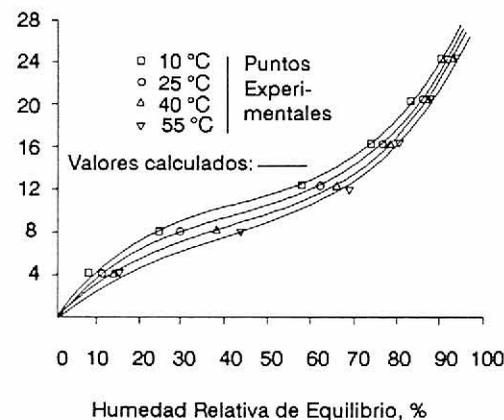


Figura 3. Curvas de contenido de humedad de equilibrio del café verde, obtenidas en CENICAFE, utilizando la ecuación de Roa (11). (Método de humedad relativa de equilibrio).

Para demostrar la validez de los resultados obtenidos por medio de la metodología propuesta, se comparó la isoterma, a 30°C de equilibrio higroscópico obtenida para café verde con dos curvas presentadas por Guilbot, citado por Wilbaux y Hahn (17) para café verde a la misma temperatura (Figura 4). En las isotermas se presentó una desviación máxima de 1,2% en base seca; sin embargo las curvas y ecuaciones presentadas en este estudio alcanzan un rango de trabajo mucho más amplio.

Ecuación de humedad de equilibrio. Fueron utilizadas tres ecuaciones para estudiar el mejor ajuste de los datos experimentales del contenido de humedad de equilibrio: Henderson (5) Henderson-Thompson (15) y la ecuación de Roa (11).

Para obtener los mejores coeficientes de las ecuaciones, fueron utilizadas técnicas de regresión lineal y regresión no lineal. Según el criterio del mínimo de la suma de los cua-

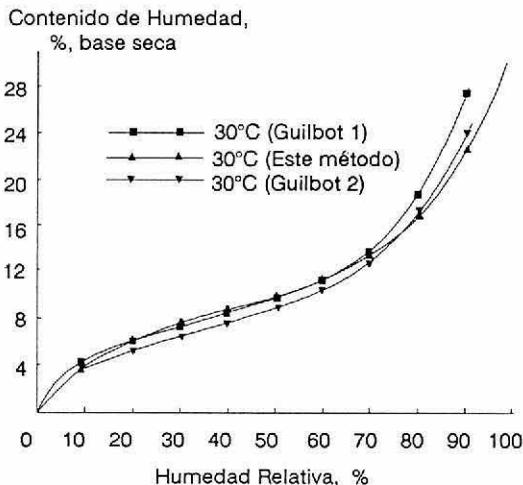


Figura 4. Curvas de contenido de humedad del café verde reportadas por la literatura (Wilbaux - Hahn) a una misma temperatura y la de Roa (11) usada en CENICAFE.

drados de las diferencias entre los valores experimentales y los calculados por los modelos. El mejor modelo, tanto para el café pergamino como para el café verde, fue el de Roa, porque dió la mínima suma de los cuadrados y el menor error estándar, Trejos (16).

El modelo de Roa es de la forma:

$$M_{eq} = [p_1\phi + p_2\phi^2 + p_3\phi^3] \text{EXP}[(q_0 + q_1\phi + q_2\phi^2 + q_3\phi^3)(T + q_4)]$$

<<2>>

en donde:

M_{eq} : Contenido de humedad de equilibrio, % base seca.

T : Temperatura, °C

ϕ : Humedad relativa, decimal

p_1, \dots, q_4 : Parámetros que se obtienen mediante procedimientos de regresión.

Los coeficientes obtenidos de los análisis de regresión no lineal se presentan en la Tabla 3.

TABLA 3. Coeficientes optimizados de la ecuación de humedad relativa de equilibrio para café pergamino y para café verde.

Coeficientes	Café Pergamino	Café verde
P_1	61,030848	58,14112
P_2	-108,371410	-113,5835
P_3	74,46105	87,45826
q_0	0,0	-0,0154638
q_1	-0,037049	0,0094153
q_2	0,070114	0,0
q_3	-0,035177	0,0
q_4	0,0	0,0

SCR (suma de cuadrados de residuos)	12,1	1,26
s \bar{x} (error estándar)	0,54%	0,29%

En las Figuras 2 y 3, calculadas por la ecuación <<2>> con los coeficientes de la Tabla 3, se puede observar claramente el perfecto ajuste de las curvas a los puntos experimentales, de la misma forma como esta misma ecuación se había ajustado, con diferentes coeficientes a los puntos experimentales de contenido de humedad de equilibrio de 35 diferentes productos agropecuarios Rossi y Roa (13).

Al aplicar la metodología propuesta por Milliken, citado por Rao y Pfof (10), que compara modelos matemáticos no lineales, como los de las curvas de humedad de equilibrio de la ecuación de Roa, se concluye que las curvas para café pergamino y para café verde fueron estadísticamente diferentes. Trejos (16).

En la Figura 5 se presentan las curvas de humedad de equilibrio del café pergamino y del café verde, correspondientes a 10°C y

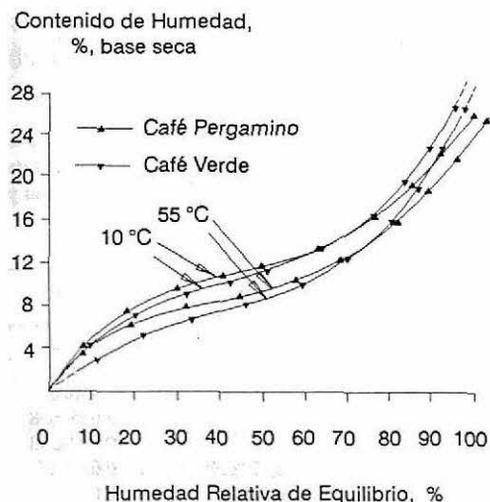


Figura 5. Ecuaciones de contenido de humedad de equilibrio del café pergamino y verde obtenidos en CENICAFE. (Método de medición de la humedad relativa de equilibrio).

55°C. Se observa que los valores de contenido de humedad de equilibrio del café pergamino son mayores que los del café verde, para valores de la humedad relativa del aire menores del 75%. Para valores mayores la tendencia se invierte.

La ecuación de Roa, en conjunto con otras ecuaciones derivadas de los balances de calor y de masa, permitirán la simulación matemática del secado del café para optimizar los secadores del grano y por ende, el proceso del secado.

Calor latente de vaporización. Se ha encontrado que esta energía depende del tipo del grano, de su contenido de humedad y de su temperatura. Entre más bajo sea el contenido de humedad y más baja la temperatura del grano, mayores serán los requerimientos de energía para secarlo. Hall (4).

La ecuación de las curvas de humedad de equilibrio <<1>> posee la información básica para calcular el calor latente de vaporización.

En efecto, Othmer (9) comprobó, para varios granos, que la presión de vapor del agua en la superficie del grano en equilibrio, está relacionada con el calor latente de vaporización del grano, mediante la relación:

$$\ln(p_v) = \frac{L}{L'} \ln(p_{vs}) + C$$

<<3>>

en donde:

- p_{vs} = Presión de vapor de saturación del agua libre
- p_v = Presión de vapor del agua en la superficie del producto

- L = Calor latente de vaporización del agua contenida en el producto
- L' = Calor latente de vaporización del agua libre
- C = Constante de integración

Trejos (16) demostró que la anterior relación es también válida para el café pergamino y para el café verde y obtuvo a partir de la ecuación <<1>> y la ecuación <<2>>, auxiliado de relaciones psicrométricas, los valores del calor latente de vaporización, que expresó, según Hall (10), en la forma:

$$\frac{L}{L'} = 1 + \alpha \text{EXP}(\beta M) \quad \langle \langle 4 \rangle \rangle$$

en donde:

L = Calor latente de vaporización del agua contenida en el café, kJ/kg

L' = Calor latente de vaporización del agua libre, kJ/kg, que es dado por la expresión:

$$L' = 2502,4 - 2,4295T \quad \langle \langle 5 \rangle \rangle$$

M = Contenido de humedad del grano, decimal, base seca

T = Temperatura del grano, °C

α, β = Coeficientes de cada grano

Los valores de los coeficientes para el café pergamino y para el café verde obtenidos

fueron:

$$L = [2502,4 - 2,4295 T] \times [1 + 1,44408 \text{EXP}(-21,6011 M)] \quad \langle \langle 6 \rangle \rangle$$

para el café pergamino, y

$$L = [2502,4 - 2,4295 T] \times [1 + 0,56462 \text{EXP}(-15,821 M)] \quad \langle \langle 7 \rangle \rangle$$

para café verde

La relación L/L' que físicamente representa el incremento de la energía necesaria para evaporar el agua de los granos de café, con relación a la evaporación de la misma cantidad de agua, pero en estado libre, se presenta en la Figura 6.

$$\frac{L}{L'} = \frac{\text{Calor latente de vaporización, grano}}{\text{Calor latente de vaporización, agua}}$$

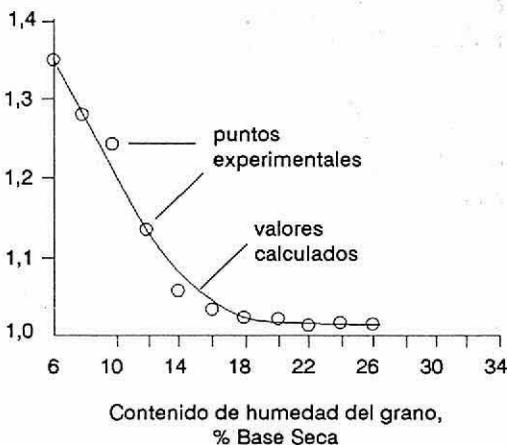


Figura 6. Variación de L/L' con respecto al contenido de humedad del café pergamino. Curvas obtenidas en CENICAFE a partir de los datos del contenido de humedad de equilibrio del café pergamino.

Se concluye de la observación de esta curva, que la energía necesaria para secar café pergamino () a un contenido de humedad del 8% b.s., es aproximadamente un 28% superior que la energía necesaria para evaporar la misma cantidad de agua libre a la misma temperatura. Por otro lado, cuando el café pergamino presenta un contenido de humedad igual o mayor que el 28% en base seca, la energía necesaria para secarlo es aproximadamente igual a la que requiere para su evaporación el agua libre, a la misma temperatura.

Las ecuaciones obtenidas permiten hacer cálculos precisos para evaluar la eficiencia térmica de los secadores de café pergamino y complementar los modelos de simulación del secado.

AGRADECIMIENTOS

Al Programa de solubles de la Gerencia Comercial de la Federación Nacional de Cafeteros de Colombia.

A la Fábrica de Café Liofilizado, por la construcción de la cámara de trabajo para determinar las humedades relativas de equilibrio.

A la Disciplina de Biometría de Cenicafé por su colaboración en la adaptación del programa de computador, para regresión no lineal (N-LINA), lo cual permitió su utilización.

Al Laboratorio de Investigaciones de la Química del Café, LIQC, por su colaboración en la investigación y por la construcción del secador de laboratorio utilizado .

LITERATURA CITADA

1. BACCHI O. 1959. Equilibrio higroscópico das sementes de café, fumo e várias hortaliças. *Bragantia* (Brasil) 18(15):225-232. 1959.
2. BROOKER, D.B.; BAKKER-ARKEMA, F.W.; HALL, C.W. *Drying cereal grains*. 2n. ed. Wetsport, Connecticut (Estados Unidos), AVI Publishing Company, 1974. 265 p.
3. GOUGH, M.C. A simple technique for determination of humidity equilibrium in particulate foods. *Journal of Stored Products Research* (Inglaterra) 11:161-164. 1975.
4. HALL, C.W. *Drying Farm Crops*. Reynoldsburg (Estados Unidos), Agricultural Consulting Associates, 1957. 336 p.
5. HENDERSON, S.M. A basic concept of equilibrium moisture. *Agricultural Engineering* (Estados Unidos) 33(1):29-32. 1952.
6. KINCH, M.D. Design criteria for mechanical drying of coffee beans. *Transaction of the ASAE* (Estados Unidos) 10(1):40-42. 1967.
7. KRACK, U.A., PIEDRAHITA, R.D. Parametros de importancia en el secado mecánico de café. Seminario Nacional del Café. U. Nacional. Medellín, (Colombia), 15 p. 1976.
8. OLIVEROS, C.E.; ROA M., G. Pérdidas de presión por el paso del aire a través de café pergamino, variedad Caturra, dispuesto a granel. *Cenicafé* (Colombia) 37(1):23-39. 1986.
9. OTHMER, D.F. Correlating vapor pressure and latent heat data. *Industrial and Engineering Chemistry Research* (Estados Unidos) 32(6):843-855. 1940.
10. RAO, V.G.; PFOST, H.B. Physical properties related to drying 20 food grains. Saint Joseph (Estados Unidos), American Society of Agricultural Engineering, 1980. 40 p. (ASAE Paper Nro. 8-3539).
11. ROA M., G. Natural Drying of Cassava. East Lansing (Estados Unidos) Michigan State University, 1974. 227 p. (Thesis of Ph.D).
12. ROA M., G.; FIOREZE, R.; ROSSI, S.J.; VILLA, L.G. Dynamic estimation of thin layer drying parameters. Saint Joseph (Estados Unidos), American Society of Agricultural Engi-

- neering, 1977. 15 p. (ASAE Paper Nro. 77 - 3530).
13. ROSSI, S.J.; ROA M., G. Secagem e armazenamento de produtos agropecuários com uso de energia solar e ar natural. São Paulo (Brasil), Secretaria da Indústria, Comércio, Ciência e Tecnologia, 1980. 295 p. (Publicação ACIESP Nro. 22).
 14. STIRLING, H. Storage research on Kenya Arabica Coffee. In: COLOQUES Cientifique International sur le Café, 9. Londres (Inglaterra), Juin 16-20, 1980. Paris (Francia), ASIC, 1980. pp. 189-200.
 15. THOMPSON, T.L.; PEART, R.M.; FOSTER G.H. Mathematical simulation of corn drying; a new model. Transactions of the ASAE (Estados Unidos) 11(4):582-586. 1968.
 16. TREJOS R., R. Determinación de la humedad relativa de equilibrio y del calor latente de vaporización del café pergamino y trillado. Cali (Colombia), Universidad del Valle, 1986. 171 p. (Tesis Ingeniero Agrícola).
 17. WILBAUX R.; HAHN D. Contribution a l'etude des phénomènes intervenant au cours de la conservation de café vert. Café, Cacao, Thé (Francia) 10(4):342-367. 1966.