

# Enfriamiento de CAFE PERGAMINO SECO A GRANEL Utilizando Aireación Mecánica Controlada

Julio E. Ospina M.\*  
Mery Cecilia Cruz\*\*  
Ricardo A. Trejos\*\*\*

---

## RESUMEN

---

**C**on el fin de garantizar que el café almacenado a granel conserve su calidad durante el tiempo necesario de almacenamiento, se estudió el enfriamiento del café pergamino seco en silos experimentales de dimensiones: 0.5m x 0.5m y 2.8 m de altura, utilizando aire enfriado mecánicamente.

Los rangos estudiados fueron: temperatura de 10 a 22°C, humedad relativa de 66 a 98% y contenido de humedad del grano de 8 a 13.57% b.h. Durante la etapa de almacenamiento se evaluó la variación de la calidad del café según los criterios de coloración de la almendra, población de microorganismos y prueba de taza; paralelamente se dejaron muestras almacenadas en sacos a las condiciones de Chinchiná, como muestra testigo buscando determinar la bondad del almacenamiento a granel, también se dejó un silo sin aireación para determinar el efecto de la aireación controlada en la calidad del café.

Se encontró que 600 m<sup>3</sup> de aire son suficientes para enfriar un m<sup>3</sup> de granos en los rangos estudiados. Es posible enfriar una masa de café con humedades relativas cercanas a saturación y baja temperatura, teniendo así una presión de vapor de agua en el grano mayor que la presión de vapor del agua en el aire, ocasionando un leve secado del grano.

Las muestras dejadas en sacos se humedecieron hasta el 13.2% b.h. y mostraron reposo en algunos casos desde el segundo mes de almacenamiento. El silo que se dejó sin aireación conservó su contenido de humedad durante el período de almacenamiento estudiado, presentó la población de microorganismos más alta y la prueba de taza fué deficiente. En los 9 silos experimentales sometidos a aireación mecánica controlada, la calidad inicial se mantuvo durante los 3 meses de estudio; el contenido de humedad del café permaneció dentro de las normas comerciales (10-12% b.h.), la máxima pérdida de humedad (0.67%) fue proporcional a la diferencia de presión de vapor entre el aire el grano.

Se observó una incidencia de la humedad relativa alta y del secado excesivo en el aumento del porcentaje de grano decolorado.

---

\* Ingeniero Agrícola, Profesor Asociado Universidad Nacional.

\*\* Ingeniera Agrícola.

\*\*\* Ingeniero Agrícola. Contratista de ALMACAFE.

*El uso de la aireación mecánica controlada permite almacenar café pergamino seco a granel, conservando su calidad por un período de 3 meses independientemente de las condiciones ambientales.*

En la mayoría de los países productores de café se utiliza el sistema de almacenamiento del grano que excede la demanda, como mecanismo de control en los precios y mercadeo.

El café colombiano reconocido mundialmente por su calidad de bebida suave, producto de muchos factores como características de especie y variedad, condiciones climáticas durante el desarrollo, tiempo y procedimiento en la cosecha y prácticas de beneficio, requiere de un almacenamiento que garantice la conservación de dicha calidad durante el tiempo necesario.

Para la compra del café se evalúa la calidad física: aspectos de olor, humedad, coloración del pergamino, pureza, granos fuera de tipo (guayaba, grano pelado e impurezas), aspecto físico (granos defectuosos), y coloración de la almendra. En el análisis de la calidad organoléptica se detectan sabores extraños originados por malas prácticas de cosecha, beneficio y almacenamiento (5).

Con el almacenamiento a granel se busca minimizar los riesgos de deterioro del grano, facilitando el control de factores como adversidades climáticas, presencia de plagas y roedores, etc. Se debe contar con los medios de aireación que permitan disminuir el gradiente de temperatura que se pueda presentar en la masa de granos, buscando homogenizar la temperatura previniendo así la transferencia de humedad de un sector caliente a uno más frío, limitando el ritmo respiratorio, evitando el crecimiento de mohos y la actividad de insectos. Se ha observado que en el almacenamiento a granel en silos no aireados se pueden generar corrientes de convección que suben y bajan en el interior de la capa de granos, como consecuencia de la diferencia de temperaturas entre el producto y el aire exterior; estos efectos pueden ocurrir en diferentes circunstancias: gradientes por efecto de barreras frías y calientes, debido a los cambios alternativos de temperatura diurnas y nocturnas, la mayoría de las regiones que producen café están ubicadas en los trópicos de altitudes elevadas, estas regiones tienden a tener temperaturas nocturnas muy frías y temperaturas diurnas altas.

Se puede encontrar también diferencias de temperaturas entre los dos lados del silo, uno expuesto a los rayos directos del sol y el otro a la sombra. Si la tem-

peratura exterior está muy por debajo de la de los granos en el interior del silo se puede presentar el fenómeno de condensación, (7).

El enfriamiento se produce por la circulación forzada de aire tratado (enfriado artificialmente por un equipo de aire acondicionado), a través de la masa de grano; el aire puede ser insuflado o aspirado por un ventilador; conducido a la masa de granos por intermedio de ductos de distribución. La eficiencia de la aireación es debida, en gran parte, a la homogeneidad de la distribución del aire. El fenómeno simple de la aireación de granos es posible por ser la masa de granos un material "poroso", no compacto; el volumen total ocupado por el grano presenta cierto porcentaje de vacíos intersticiales a través de los cuales el aire puede circular. Cada tipo de grano se caracteriza por un coeficiente de porosidad, comprendido entre el 10 y el 45%, dependiendo de la naturaleza del grano, la forma, el contenido de humedad y la compactación, haciendo más o menos ventilable la masa de granos, (16); estos exigen cuotas de energía diferentes según sea el caso, a fin de vencer las pérdidas de carga o contrapresión ocasionadas por la resistencia del producto a la circulación del aire forzado. Boyce y Pérez (1), determinaron la relación entre la caída de presión estática y el flujo del aire, en el rango de 0.35 a 21.3 m<sup>3</sup>/min/m<sup>3</sup> para café pergamino seco (11.9% b.h.). La ecuación obtenida mediante el análisis de regresión lineal es:

$$DP/L = 0.066 (Q/a)^{1.46} \quad 1-1$$

Donde:

- DP = caída de presión, cm de H<sub>2</sub>O
- L = espesor de la capa de grano, m
- Q = caudal del fluido, m<sup>3</sup>/min.
- A = Sección transversal, m<sup>2</sup>

Los fenómenos que ocurren durante la aireación son muy complejos. Numerosos autores han tratado de describir este proceso mediante ecuaciones de transferencia de calor y de masa. Multon (15) y Lasseran (11) explican tres fenómenos que pueden ocurrir durante el enfriamiento: enfriamiento con secado, enfriamiento con humedecimiento y enfriamiento en condiciones de equilibrio, dependiendo de como sea la humedad relativa de equilibrio, con respecto a la humedad relativa del aire de entrada (mayor, menor o igual, respectivamente).

Durante la primera etapa del enfriamiento se diferencian tres zonas: una zona ya enfriada en la parte infe-

rior del silo, una de transición (frente de enfriamiento), en la cual se efectúan intercambios entre el aire y el grano en una capa de espesor limitado que es función del flujo de aire y una zona en la cual el frente de enfriamiento no ha llegado aún. Siguiendo los procedimientos descritos por Multon, se calculan los flujos de renovación y flujo unitario: el flujo de renovación (n), es el caudal total necesario para enfriar un metro cúbico de granos, el flujo unitario (R) da una relación de los metros cúbicos de aire que se necesitan para enfriar un metro cúbico de granos.

El flujo de renovación se puede calcular como:

$$n = Q / V \quad 1-2$$

donde:

$$\begin{aligned} n &= \text{flujo de renovación, m}^3/\text{h/m}^3 \\ Q &= \text{flujo total, m}^3/\text{h} \\ V &= \text{volumen ocupado por el grano, m}^3 \end{aligned}$$

El flujo unitario se calcula como:

$$R = \frac{te * Q}{V} \quad 1-3$$

Donde:

$$\begin{aligned} R &= \text{flujo unitario, m}^3/\text{m}^3 \\ Q &= \text{Flujo total} \\ V &= \text{volumen ocupado por el grano, m}^3 \\ te &= \text{tiempo total de enfriamiento, h} \end{aligned}$$

La cantidad de aire necesario para enfriar completamente 1 m<sup>3</sup> de grano es bastante variable, dependiendo de las características del grano y de la aireación (11), (15) y (17).

El efecto de disminuir la temperatura combinado con una humedad relativa que permita mantener el contenido de humedad del café en el rango establecido para su compra (10–12% b.h.), conservará la calidad del grano en función del tiempo de almacenamiento. Si se utilizan humedades relativas altas en el aire de enfriamiento, se crean condiciones propicias a temperaturas altas de almacenamiento. Las bacterias y los hongos se producen lentamente a humedades superiores al 75%, si se utilizan temperaturas del aire muy bajas, López (12). La pérdida de peso de un producto es apreciable cuando la humedad relativa del aire es baja, González (6).

Stirlin (19,20,21 y 22), recomienda humedades relativas del aire entre 60 y 70% para el almacenamiento seguro del café pergamino seco.

Trejos (23), determinó las curvas de contenido de humedad de equilibrio del café pergamino; la ecuación obtenida fue la siguiente:

$$\begin{aligned} \text{MEQ} = & (61.03084(\text{HR}) - 108.371(\text{HR})^2 \\ & + 74.461059(\text{HR})^3 \\ & \exp ( (-0.037049\text{HR} + 0.070114(\text{HR})^2 \\ & 0.035177\text{HR}^2 ) T) \quad 1-4 \end{aligned}$$

Donde: MEQ = Contenido de humedad de equilibrio del café pergamino, bs, %  
HR = Humedad relativa, decimal  
T = temperatura, °C

De esta ecuación se obtiene que si se desea mantener el café pergamino a un contenido de humedad del 12 % b.h., entre temperaturas de enfriamiento de 10 a 20°C, se debe utilizar una humedad relativa del aire entre 65 y 68%.

## MATERIALES Y METODOS

El presente trabajo se realizó en el beneficiadero experimental del Centro Nacional de Investigaciones de Café, localizado en el municipio de Chinchiná (Caldas), que presenta las siguientes características geográficas: latitud 4°59' N., Longitud 75°35' O., Altitud 1310 m.s.n.m., presión atmosférica promedio 86.6 Kpa, temperatura media 20.6°C; humedad relativa promedio 75% ; precipitación anual media, 2511 mm.

Se construyeron 10 silos metálicos de sección cuadrada, fig. 1 de 0.5 \* 0.5 m, con una altura de 2.8 m.; 9 silos fueron aislados exteriormente con fibra de vidrio de 3.81 cm. de espesor, con el fin de evitar la transferencia de calor en el sentido radial, que se pueda presentar por acción de las condiciones ambientales; el otro silo se trabajó sin aislante. La capacidad de cada silo varió de 220 a 250 Kg. para contenidos de humedad del 10 al 12% b.h.; a lo largo de una cara del silo se instalaron, centrados 9 tubos de 2.54 cm. de diámetro, distanciados cada uno 30 cm. para muestrear el café y disponer las termocuplas dentro del grano, estableciendo así 8 capas. El plenum tiene una altura de 0.2 m; el aire es impulsado por la parte inferior por medio del ventilador del equipo de aire acondicionado y, sale por la parte superior.

Para la medición de las temperaturas en cada silo se usaron termocuplas de cobre - constantan (12 puntos de medición), dispuestos a diferentes alturas y diferentes profundidades, para determinar los gradientes.

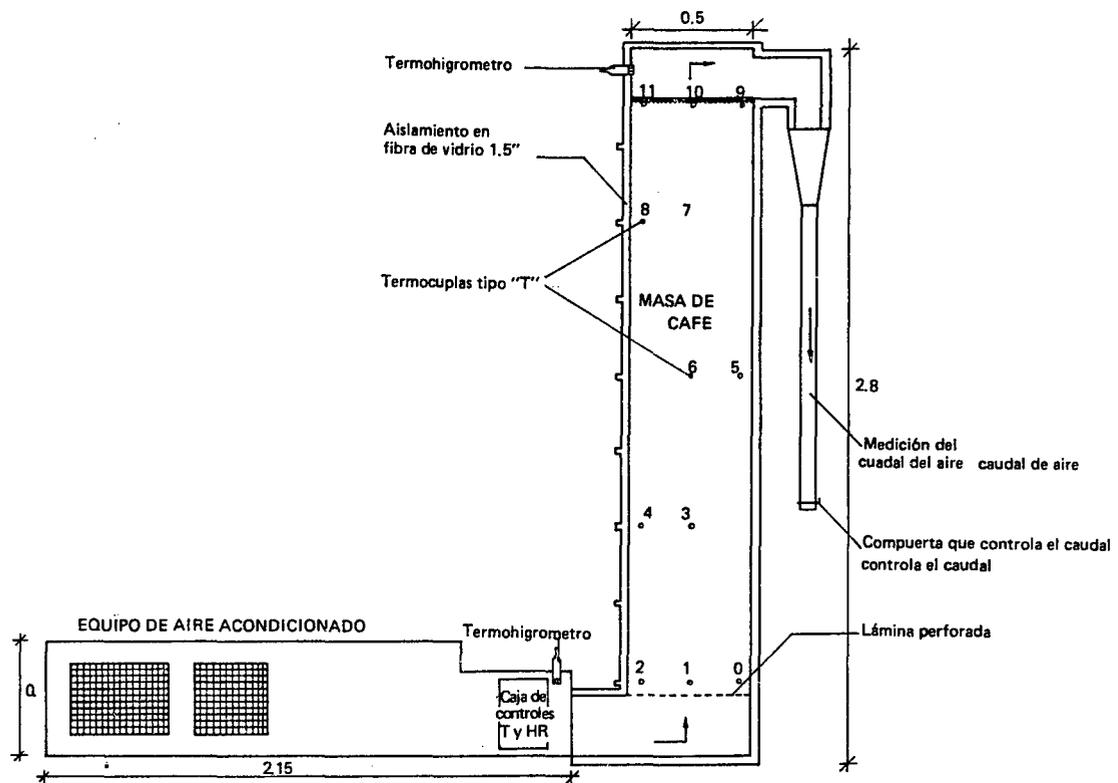


Figura 1. Montaje de aire acondicionado - Silo

tes de temperatura en la capa de granos durante el enfriamiento.

La muestra utilizada fue café pergamino seco, coffea Arabica, beneficiado en Cenicafé, procesado por vía húmeda y secado en el silo secador Cenicafé; la muestra fue previamente homogenizada y luego seleccionada en una máquina aire-zaranda, para reducir impurezas, porcentaje de pasilla y material extraño propicio para el desarrollo de microorganismos.

Se trabajó en dos etapas, en la primera, tabla 1, el café fue sometido a diferentes condiciones de enfriamiento, buscando obtener la incidencia del caudal, la humedad relativa y la temperatura del aire en el tiempo de enfriamiento y en el flujo unitario requerido para el enfriamiento del café. En la segunda etapa (tabla 2), el café enfriado se dejó almacenado para evaluar los cambios en la calidad del café, para esto una vez logrado el enfriamiento del equipo de aire acondicionado se retiró y el silo fue sellado, se continuó registrando la temperatura de la masa de granos y cuando se presentó un aumento promedio de aproximadamente 4°C, el enfriamiento era repetido. Paralelamente se almacenó una muestra previamente homogenizada de cada silo en las condiciones de al-

macenamiento en bodega en Chinchiná en sacos de 3 Kg de capacidad.

El tratamiento se continuó durante tres meses, tiempo considerado como mediano plazo en el almacenamiento de café pergamino seco para el objeto de este estudio.

TABLA 1. Combinación entre las variables experimentales, primera etapa (enfriamiento).

Prueba	Temp. °C	Contenido de humedad %b.h.	Humedad relativa %	Caudal m <sup>3</sup> /h
1	22.1	8.1	78.8	12.3
2	20.6	10.88	70.1	12.3
3	20.9	10.19	69.2	6.2
4	19.6	12.57	69.4	6.2
5	16.9	10.93	79.2	20.0
6	14.5	12.20	97.7	18.7
7	15.2	11.48	97.7	25.0
8	18.5	10.11	71.9	14.1
9	16.8	10.95	73.3	24.3

**TABLA 2.** Combinación entre las variables experimentales segunda etapa (enfriamiento-almacenamiento).

Prueba	Temp. °C	Humedad relativa %	Contenido de humedad % b.h.	Caudal m <sup>3</sup> /h
10	15.2	66.0	10.71	20.3
11	18.0	66.4	10.62	25.0
12	19.8	66.8	10.94	20.0
13	16.2	78.8	10.89	30.0
14*	18.1	68.0	10.83	20.0
15	10.7	73.9	11.25	21.8
16	15.4	68.6	11.35	20.0
17*	10.8	79.6	11.42	25.0
18*	20.5	71.3	11.21	25.0
19*	sin aireación		12.00	testigo
café empacado en sacos				testigo

\* Análisis de Microorganismos  
Silo sin aislante

#### Las variables medidas:

- Temperatura y humedad relativa del aire de enfriamiento, registradas con un higrotermómetro, cada hora en el proceso de enfriamiento.
- Se llevó un registro del tiempo necesario para enfriar el café, estableciendo un gradiente de máximo 2°C, entre la primera y la última capa para suspender el enfriamiento.
- El contenido de humedad de cada capa fue tomado al inicio del ensayo, una vez terminado el enfriamiento y cada mes durante la etapa de almacenamiento. El contenido de humedad se determinó por el método de la estufa según norma ISO 6673 (8).
- Para determinar la población de microorganismos se tomó una muestra de 50 g de la primera capa, la intermedia y la última. Se seleccionaron 4 ensayos para este análisis considerándoles como representativos, por estar trabajando en un rango relativamente estrecho y no apto para la proliferación de microorganismos (12). La muestra fue tomada al inicio del ensayo y cada mes durante la etapa de almacenamiento, La población de microorganismos fue determinada por el método de siembra directa del grano desarrollado por López (13), obteniendo el número de zonas de la población de microorganismos presentes en el grano que fueron clasificados así:

Café de buena calidad entre 0 y 14 zonas

Café de calidad regular, entre 15 y 18 zonas

Café de mala calidad, si el número de zonas es superior a 18. (esta escala se utilizó en presencia de *Zygomycetes*).

- Para la coloración de la almendra se tomaron muestras de 100 g.; el intervalo de medición fue el mismo que para el conteo de microorganismos, la muestra se trilló por el método manual y fue evaluada mediante comparación con una escala patrón.
- metro cúbico de granos; el flujo unitario (R) dió una relación de los metros cúbicos de aire que se necesitan para enfriar 1 metro cúbico de granos.
- Para la prueba de taza se tomaron muestras de 500 g en intervalos de tiempo iguales a los de la toma de muestras para la coloración de al almendra y población de microorganismos; las muestras fueron analizadas en la unidad de control de calidad de la oficina central de la Federación Nacional de Cafeteros en Santafé de Bogotá.

- El caudal del aire de enfriamiento, se determinó midiendo la velocidad del aire en la salida del silo con un anemómetro de filamento caliente, en un orificio de un tubo de PVC, adaptado por intermedio de una transición, buscando evitar turbulencias que afectara la medida. Brooker (2).

#### RESULTADOS Y DISCUSION

Los resultados de la primera etapa se presentan en la tabla 3, y los resultados en la segunda etapa en la tabla 4.

Se encontró que 600 m<sup>3</sup> de aire son suficiente para enfriar completamente 1m<sup>3</sup> de grano, enfriando café con contenidos de humedad dentro de los rangos comerciales, con aire de enfriamiento a temperaturas entre 10 y 22°C y humedades relativas entre 66 y 97.7%.

Lasseran (11) y Multon (15) encontraron que valores de flujo unitario entre 800 y 1200 m<sup>3</sup>/m<sup>3</sup> son suficientes para enfriar totalmente granos almacenados con humedades próximas a las normas comerciales.

Los valores tan bajos de "R", encontrados para el enfriamiento del café pergamino seco se explican dada la densidad aparente del mismo, que es aproximadamente la mitad de la que poseen otros granos (400

**TABLA 3.** Flujo unitario "R", requerido para el enfriamiento del café pergamino seco, (pruebas de la primera etapa).

Prueba No.	Aire Enfriamiento			Grano (i)		Grano (f)		DT	te	R <sup>1</sup>	n <sup>2</sup>
	T°C	HR %	Q(m <sup>3</sup> /h)	CH(% b.h.)	T°C	CH %b.h.	T°C	°C	h	m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup>	m <sup>3</sup> /h/m <sup>3</sup>
1	22.1	68.8	12.3	8.17	24.5	8.44	23.6	0.9	26	544.0	20.9
2	20.6	70.1	12.3	10.88	25.8	11.00	21.0	4.8	15	314.1	20.9
3	20.9	69.2	6.2	10.9	26.0	10.30	21.3	4.7	21	221.6	10.5
4	19.6	69.4	6.2	12.57	22.5	12.28	17.3	5.2	23	242.7	10.5
5	16.9	79.2	20.0	10.93	22.9	10.91	18.2	7.7	12	408.5	34.0
6	14.5	97.7	18.7	12.2	26.8	11.99	17.4	9.4	17	541.1	31.8
7	15.2	97.7	25.0	11.48	24.5	11.50	20.5	4.0	13	553.2	42.5
8	18.5	71.9	14.1	10.11	23.3	10.34	20.9	2.4	13	325.9	25.1
9	16.8	73.3	24.3	10.95	23.7	11.07	18.5	5.2	11	469.9	42.7

i : inicio del enfriamiento  
 f : final del enfriamiento  
 DT : diferencia de temperaturas  
 te : tiempo de enfriamiento  
 1 : calculado con la ecuación 1-4  
 2 : calculado con la ecuación 1-3

**TABLA 4.** Flujo unitario "R", requerido para el enfriamiento del café pergamino seco, (pruebas de la segunda etapa).

Prueba No.	Aire Enfriamiento			Grano (i)		Grano (f)		DT	te	R <sup>1</sup>	n <sup>2</sup>
	T°C	HR %b.h.	Q m <sup>3</sup> /h	CH % b.h.	T°C	CH %b.h.	T°C	°C	h	m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup>	m <sup>3</sup> /h/m <sup>3</sup>
10	15.72	66.0	20.3	10.71	25.4	10.43	15.6	9.8	17	587.4	34.5
11	18.0	66.4	25.0	10.62	24.6	10.46	16.8	7.8	13	553.2	42.5
12	19.8	66.8	20.0	10.94	24.0	10.65	19.6	4.4	12	408.5	34.0
13	16.2	78.8	30.0	10.89	24.4	10.97	18.2	6.2	10	510.7	51.1
14	18.1	68.0	20.0	10.83	22.0	10.79	17.0	5.0	13	443.5	34.0
15	10.7	73.9	21.8	11.25	23.3	10.91	12.9	10.4	11	408.1	37.8
16	15.4	68.6	20.0	11.35	20.8	10.99	14.1	6.7	13	442.2	34.5
17	10.8	79.6	25.0	11.42	23.1	11.67	10.9	12.2	12	515.0	42.9
18	20.5	71.3	25.0	11.21	25.0	11.07	16.9	8.1	11	472.1	42.9
19	silo sin aireación			12.33	—	—	—	—	—	—	—
testigo en sacos											

i: inicio del enfriamiento  
 f: final del enfriamiento  
 DT: diferencia de temperaturas  
 te: tiempo de enfriamiento  
 1: calculado con la ecuación 1-4  
 2: calculado con la ecuación 1-3

Kg/m<sup>3</sup> para el café pergamino seco y 750 Kg/m<sup>3</sup> para otros granos), lo que aumenta el valor de la difusividad térmica (10); de manera que el enfriamiento progresa más rápidamente en el café.

Un aumento en el caudal del aire de enfriamiento y, de la misma manera, un aumento del tiempo de enfriamiento, permite utilizar un menor caudal del aire

para lograr el enfriamiento del café pergamino seco. Se observa así, en las pruebas 2 y 3 trabajando en condiciones similares de temperatura y humedad relativa del aire de enfriamiento y, contenido de humedad y temperatura inicial del café, se logró un enfriamiento similar de 4.7°C en tiempos de 21 h y 15 h con 6.2 m<sup>3</sup>/h y 12.3m<sup>3</sup>/h; se observa como el efecto de aumentar el caudal al doble de su valor inicial se

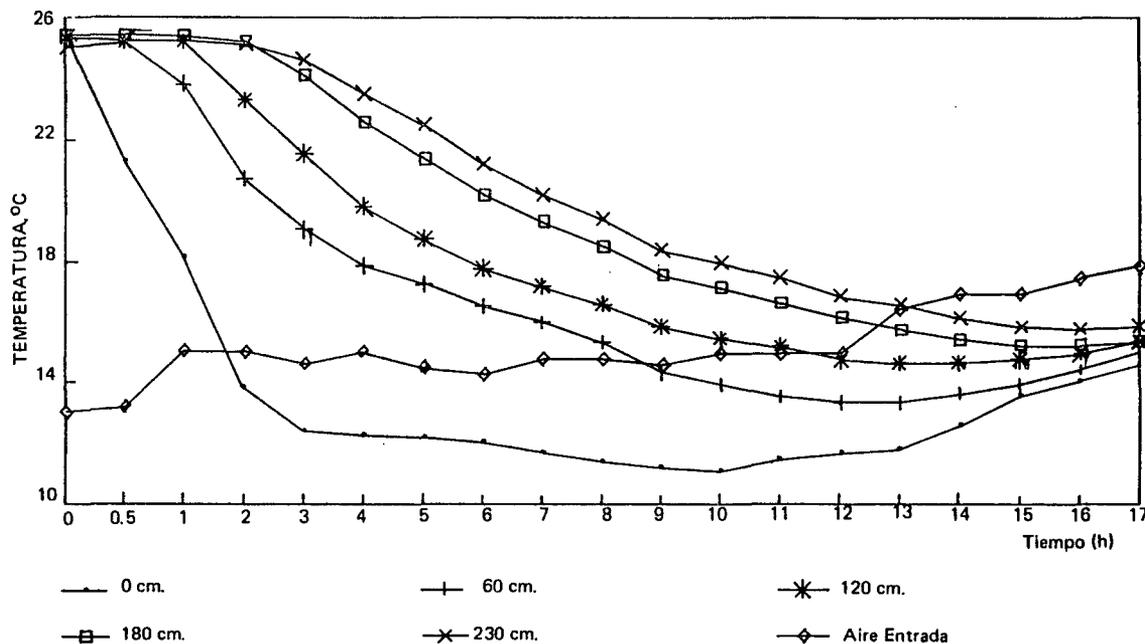
disminuye en 6 horas el tiempo de enfriamiento, lo que indica que a mayor caudal menor será el tiempo de enfriamiento.

En las figuras 2 y 3 se presenta el comportamiento de la temperatura grano-aire durante el enfriamiento, se observa que este fue similar al reportado por Multon, (15) Sanderson (17) y Lasseran (11) en sus ensayos de enfriamiento de trigo. Las capas de grano son enfriadas sucesivamente una después de otra, hasta alcanzar la temperatura del aire de entrada; la primera capa es la primera en ser enfriada por estar más cerca al aire de entrada, llegando en algunos casos, a registrar temperaturas por debajo de la del aire de entrada, fig.2; si se trata de un enfriamiento evaporativo del grano (enfriamiento con secado). En la figura 3, se observa como la temperatura de la primera capa solo desciende hasta la temperatura del aire de entrada, por tratarse de un enfriamiento con humedecimiento.

En la tabla 5 se observa la variación del contenido de humedad del café sometido a enfriamiento; la máxima pérdida de humedad del café al final del enfriamiento fue de 0,36% b.h., enfriando con aire a 10°C y 79.6% de humedad relativa; dicha pérdida fue proporcional a la diferencia de presión de vapor entre el aire y el grano.

**TABLA 5.** Variación del contenido de humedad del café, durante el enfriamiento.

Prueba No.	Contenido de humedad inicial % b.h.	Contenido de humedad final % b.h.	Diferencia de humedad % b.h.
1	8.07	8.44	0.37
2	10.88	11.04	0.16
3	10.19	10.30	0.11
4	12.57	12.28	-0.29
5	10.93	10.91	-0.02
6	12.20	11.99	-0.21
7	11.48	11.50	0.023
8	10.11	10.34	0.23
9	10.95	11.07	0.12
10	10.71	10.43	-0.28
11	10.62	10.46	-0.16
12	10.94	10.65	-0.29
13	10.89	10.97	0.08
14	10.83	10.79	-0.04
15	11.25	10.91	-0.34
16	11.35	10.99	-0.36
17	11.42	11.67	0.25
18	11.21	11.07	0.19
19	12.32	—	—



**Figura 2.** Variación de la temperatura con la altura del silo  
Condiciones del aire: T: 15.2°C; HR=66%

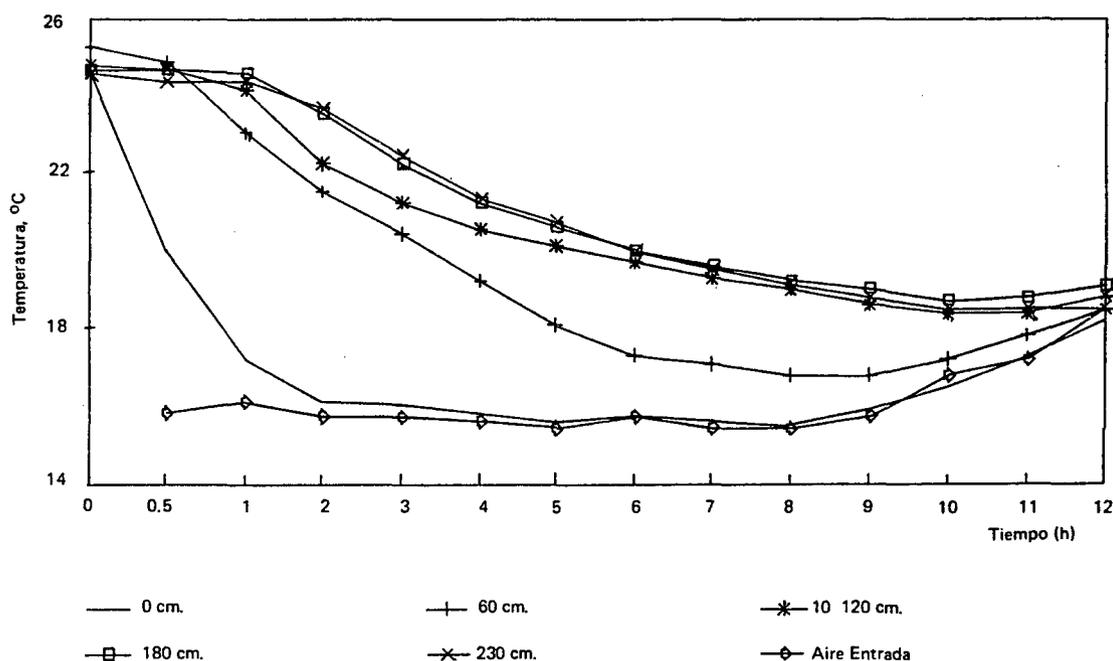


Figura 3. Variación de la temperatura con la altura del silo  
 Condiciones del aire: T=16.2°C HR=78.8%

El café que al inicio tenía un contenido de humedad mayor al 12% b.h., presentó secado, al final del enfriamiento, y el café que inició con un contenido de humedad menor al 10% b.h., al final del enfriamiento, registró humedecimiento, buscando siempre acercarse a las normas comerciales de humedad.

En los ensayos 6 y 7, donde se enfrió con aire con humedad relativa próxima a saturación (97.7%), se obtuvo un secado para el café con contenido de humedad mayor al 12% y un ligero humedecimiento para el café con contenido de humedad del 11.48%; esto debido a la diferencia de presiones de vapor que existió entre el aire de enfriamiento y el grano. Es posible enfriar café con aire que contenga una humedad relativa próxima a la saturación y baja temperatura, siempre y cuando la presión de vapor del agua en el grano sea mayor que la presión de vapor del agua en el aire; de esta manera el aire no puede suministrarle humedad al grano. En cambio, si la diferencia de presión es lo suficientemente grande se puede presentar transferencia de humedad en forma de vapor de agua del grano hacia el aire pudiendo obtener un secado del grano, aunque el aire se encuentra a 100% de humedad relativa.

En la tabla 6 se observa la variación del contenido de

humedad del café, sometido a enfriamiento y dejado almacenado.

Las humedades relativas del aire usadas en esta etapa fueron ligeramente superiores a las de equilibrio, según criterio recomendado por Cleves (4), y, de acuerdo a las condiciones del café pergamino seco, que permite que entre la almendra y el pergamino se forme una cámara de aire que protege la almendra de las condiciones exteriores.

Se encontró así que al final del tercer mes de almacenamiento, el café se mantiene en el rango de contenido de humedad establecido por la Federación Nacional de Cafeteros de Colombia, que para la compra es de 10 a 12% b.h. La máxima pérdida de humedad registrada al final de los tres meses de almacenamiento fue de 0.67% b.h.; en esta prueba se partió con una gran diferencia entre la presión de vapor del grano y del aire.

En las pruebas 15 y 17, según el contenido de humedad de equilibrio, el café debería humedecerse. Al final de los tres meses de almacenamiento se registró secado. En las dos pruebas se trabajó con las mínimas temperaturas de enfriamiento del rango estudiado (10.7 y 10.8°C), lo que implica mayor diferencia de presión de vapor, entre el grano y el aire, siendo mayor la presión de vapor del grano que la del aire de enfriamiento, lo que ocasiona un secado del grano.

TABLA 6. Variación del contenido de humedad del café durante el almacenamiento.

Prueba No.	Inicio	Contenidos de Humedad (% b.h)				Diferencia	CHeq.	Testigo Sacos
		1er. mes	2do. mes	3er mes				
10	10.71	10.0	10.02	10.04	-0.67	11.99	13.34	
11	10.62	11.0	10.99	10.91	0.29	11.92	13.22	
12	10.94	11.02	11.17	10.71	-0.23	11.90	13.07	
13	10.89	11.41	11.02	11.16	0.13	14.13	12.91	
14	10.83	10.73	10.77	10.77	-0.06	12.13	12.81	
15	11.25	11.17	11.02	10.94	-0.31	13.36	12.99	
16	11.35	11.2	11.12	10.96	-0.39	12.33	12.59	
17	11.42	11.57	11.57	11.30	-0.12	14.49	12.04	
18	11.21	11.18	11.37	11.16	-0.05	12.54	12.27	
19	12.32	12.34	12.39	12.19	-0.13	—		

1 Contenido de humedad de equilibrio calculado con la ecuación 1-4

En los ensayos 11 y 13, se encontró un humedecimiento del café al final de los tres meses. En los dos casos el café inició con un contenido de humedad menor del 11% b.h.; la prueba número 13 presentó una presión mayor en el aire que en el grano, lo que conllevó a un humedecimiento del grano. El café que fue dejado como testigo, sin aireación, al final de los tres meses, presentó un secado del 0.13%, observando una migración de humedad hacia las capas que partieron con menor contenido de humedad, buscando el equilibrio en el contenido de humedad de la masa de granos.

El café que fue dejado almacenado en sacos, sufrió una ganancia de humedad, buscando acercarse a las condiciones de humedad de equilibrio, según las características climatológicas de Chinchiná: temperatura de 20.6°C y 75% de humedad relativa; el contenido de humedad de equilibrio calculado con la ecuación hallada por Trejos (23), es del 13.19% b.h.; además el grano se humedeció por poseer una presión de vapor menor a la del aire ambiente.

Para el cálculo de la caída de presión que presenta el aire al atravesar la masa de café, se tuvo en cuenta la compactación que sufre el grano en el silo, encontrando un valor promedio del 9.8%; esta compactación se obtuvo con la diferencia entre la densidad experimental y la calculada mediante la ecuación determinada por Montoya (14):

$$DA = 323.739 + 5.597 * CH$$

Donde:

DA = Densidad aparente del café pergamino seco, Kg/m<sup>3</sup>

CH = Contenido de humedad del café pergamino, % b.h.

La caída de presión fue calculada mediante la ecuación 1-1 que contempla el rango de caudal utilizado en estas pruebas; se le aplicó un 40% de corrección (16), obteniendo valores entre 0.06 Cm CA 0.597 Cm CA, para los mínimos y máximos valores del caudal aplicados, respectivamente.

#### POBLACION DE MICROORGANISMOS

La población de microorganismos hallada en las pruebas, previamente seleccionadas, se presentan en la tabla 7.

En las pruebas de análisis de microorganismos se observó la presencia de **zigomycetes**, teniendo en cuenta la clasificación que hace López (13) para las zonas de microorganismos presentes en el café almacenado, en presencia de **zigomycetes**.

Se encontró una buena calidad microbiológica del café durante los tres meses de almacenamiento en las 4 pruebas a las que se les hizo el seguimiento microbiológico. Se notó cierta tendencia a disminuir el número de zonas de microorganismos con el transcurso del tiempo; esto se explica con la desaparición de los "hongos de campo" que el café fresco trae inicialmente y que luego desaparecen dado que no resisten las humedades bajas del almacenamiento, ocasionando una reducción de la población fúngica del café, tal como reporta López (28).

Todas las muestras analizadas están dentro del límite considerado para café como de buena calidad microbiológica. El silo dejado como testigo sin aireación forzada, prueba número 19, presentó al final del ter-

**Tabla 7.** Población de microorganismos durante el tiempo de almacenamiento.

Características de la prueba	Población de Microorganismos en cada altura de muestreo		
	0 cm.	120 cm.	230 cm.
<b>Prueba 14* 18.1°C y 68% HR</b>			
Inicio	13.6	12.4	12.8
1er mes	9.5	11.6	8.1
2do. mes	9.0	10.1	7.3
3er mes	6.9	8.6	5.5
<b>Prueba 17 (10.8°C y 71.3% HR)</b>			
Inicio	6.8	9.9	7.4
1er mes	11.5	12.5	12.6
2do. mes	10.3	9.6	10.4
3er mes	11.1	7.4	6.8
<b>Prueba 18 (20.5°C y 71.3% HR)</b>			
Inicio	12.9	8.4	11.7
1er mes	8.9	10.5	7.5
2do. mes	7.6	8.8	7.8
3er mes	9.7	6.2	9.9
<b>Prueba 19 ( Sin Aireación)</b>			
Inicio	12.0	8.8	11.2
1er mes	8.7	10.9	7.5
2do. mes	9.2	10.3	8.6
3er mes	11.2	13.1	11.9

\* Silo sin aislante

cer mes las poblaciones más altas, especialmente en la capa del centro, que es la que se halla más aislada.

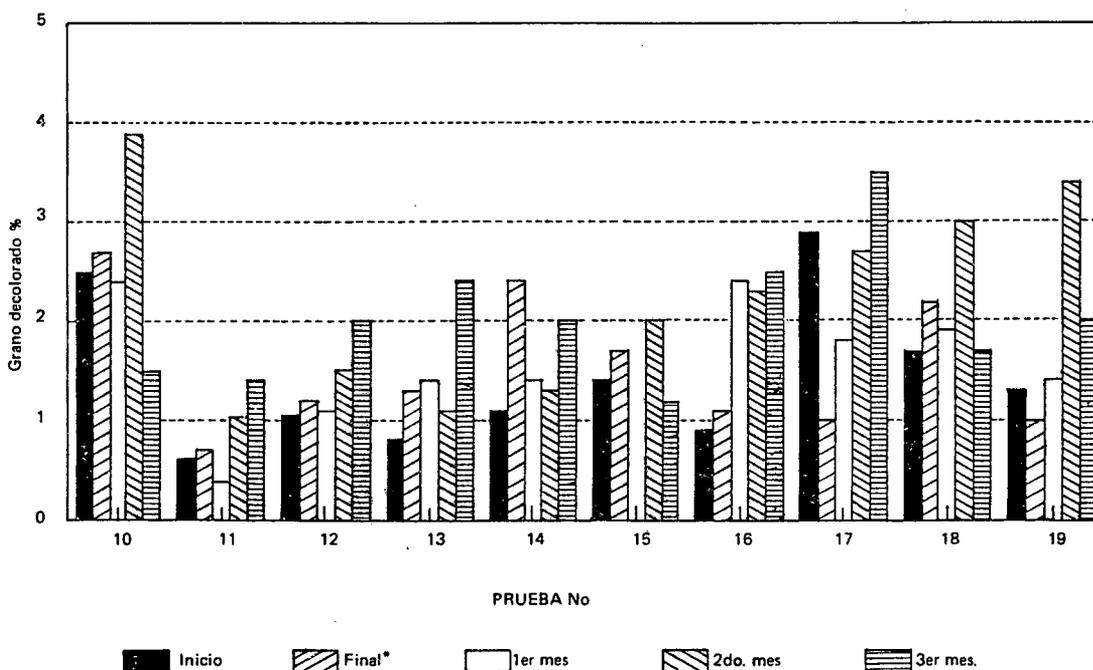
**COLORACION DE LA ALMENDRA**

En general el café al tercer mes de almacenamiento presentó una apariencia de café fresco, tanto en pergamino como en almendra.

En la figura 4, se presenta el porcentaje promedio de grano decolorado durante el almacenamiento. Al final del enfriamiento el porcentaje promedio de grano decolorado, en general se mantuvo en todas las pruebas, en un nivel por debajo del 2% . . . . .

En la prueba número 10 se observa el más alto valor encontrado (3.9% ); en esta prueba el porcentaje inicial de grano decolorado fue relativamente alto (2.5% ), y el aumento se explica por el efecto de sobresecado (contenidos de humedad menores al 10% b.h.; en las capas intermedias), que estaba sufriendo el grano. Este porcentaje al final disminuye, dada la recuperación de humedad que estaba sufriendo el café almacenado.

Las pruebas 13 y 17 presentaron un porcentaje de grano decolorado final superior al 2% ; en ambas pruebas el café fue enfriado con las humedades relativas más altas: 78.8% y 79.6% respectivamente. Se ha reportado que humedades relativas altas afectan el grano decolo-



**Figura 4.** Porcentaje promedio de grano decolorado durante el almacenamiento

\*Final del enfriamiento

rándolo; Bacchi citado por Carvalho (3), concluyó a través de una serie de experimentos sobre la pérdida del color, que el factor que más influye es la humedad relativa del aire: cuanto más elevada sea la humedad relativa, principalmente valores superiores al 80%, más rápido se decolora el grano almacenado; en ciertas ocasiones se encontró un blanqueamiento del 100% en 3 ó 4 días. La prueba 16 presentó un aumento en el porcentaje de grano decolorado durante la etapa de almacenamiento, explicado por el efecto de secado que estuvo sufriendo el grano. En general, se observó la incidencia de la humedad relativa alta, y el secado excesivo, en el aumento del porcentaje de grano decolorado, sin llegar a constituir un problema de calidad del café para su posterior exportación. No se detectó cambios en el porcentaje de grano decolorado del café enfriado a temperaturas bajas, con humedades relativas bajas.

**PRUEBA DE TAZA**

Los resultados de los análisis de prueba de taza realizados por la unidad de control de calidad de la Federación Nacional de Cafeteros, se muestran en la tabla 8: se evaluó la prueba de taza durante los tres meses de almacenamiento a las tres capas previamente establecidas del silo y a un testigo que se almacenó en sacos en las condiciones normales de almacenamiento en bodega, en Chinchiná.

**TABLA 8.** Análisis de la prueba de taza del café, durante el tiempo de almacenamiento.

Tiempo (meses)	Altura de muestreo			Testigo en sacos
	0 cm.	120 cm.	230 cm.	
Prueba 10: aireación 15°C y 66.0 %HR				
0	acidez baja	acidez baja	acidez media	
1	acidez media baja, astring.	dulce	acidez media baja, astring.	acidez media baja, astring.
2	acidez media baja	acidez media baja, astring	acidez media baja, astring	acidez media baja
3	acidez media baja	leñoso e inmaduro	acidez media baja	reposo
Prueba 11: aireación 18°C y 66.4 %HR				
0	acidez media baja	acidez media baja	acidez media	
1	acidez media baja, astring.	acidez media baja	acidez media baja, astring.	acidez media baja, astring.
2	acidez media baja	acidez media baja	acidez media	reposo

Prueba 12: aireación 19.8°C y 66.8 % HR %				
0	acidez media baja, astring	acidez media baja, astring.	acidez media baja, astring	
1	acidez media baja	acidez baja	acidez media	acidez media
2	acidez media baja	sucio	acidez baja	fermento
3	acidez media	acidez media	acidez media baja	acidez baja leñoso
Prueba 13: 16.2°C y 78.8 %HR %				
0	acidez media baja, astring.	acidez media baja, astring.	acidez media baja, astring.	
1	acidez baja	acidez baja	acidez media baja	acidez media
2	acidez baja	acidez baja	acidez media	acidez media baja
3	acidez media baja	acidez media	acidez media	reposo sucio
Prueba 14: 18.1°C y 68.0% HR				
0	Fruty	acidez media baja, astring.	acidez baja	
1	acidez baja	acidez baja	acidez baja	acidez baja
2	acidez media	fermento	fermento	reposo
3	acidez media baja	acidez media	acidez baja astringente	reposo
Prueba 15: 10.7°C y 73.9 %HR				
0	acidez media baja astring.	acidez media baja, astring.	acidez media baja, astring.	
2	acidez baja	acidez media	acidez media astringente	reposo sucio
3	acidez media baja	acidez media	acidez baja	acidez baja
Prueba 16: 15.4°C y 68.6 % HR				
0	acidez baja astringente baja	sucio	acidez media baja, astring.	
2	acidez media	fermento	acidez media baja, leñoso	acidez media baja
3	acidez media	acidez media	acidez media baja	acidez media baja
Prueba 17: 10.8°C y 79.6 % HR				
0	sucio	acidez media baja, astring.	aromático	
1	acidez baja	acidez baja	acidez baja	terroso y sucio
2	acidez media	acidez media	acidez media	acidez media baja
3	acidez media	acidez media astringente	terroso sucio	acidez baja
Prueba 18: 20.5°C y 71.3 % HR %				
0	acidez baja	acidez baja	fermento sucio	
1	acidez media	acidez media baja	acidez baja astringente	reposo
2	acidez media baja	acidez media	acidez baja	reposo, sucio
3	acidez baja	fermento	acidez baja	acidez media baja
Prueba 19: Silo sin aireación forzada				
0	acidez baja	acidez baja	acidez baja	
1	acidez media	moho, sucio	acidez baja	
2	acidez media baja	acidez baja	reposo	
3	acidez media	acidez media	leñoso	

La característica general encontrada en la prueba de taza, al inicio del almacenamiento, es una acidez media baja, esta característica permanece al final de los tres meses de almacenamiento. En algunos casos, (prueba 14 primera capa, prueba 16 capa de la mitad, prueba 17 primera capa, y prueba 18 última capa), se encontraron defectos en el café desde el inicio del almacenamiento; se podría considerar que estos defectos fueron originados en la etapa de recolección y beneficio. En algunos casos este defecto no se volvió a presentar durante la etapa de almacenamiento, esto puede deberse al sistema de muestreo que es necesario utilizar para el análisis, donde se destruye la muestra que es analizada.

La prueba 10 presentó al final del tercer mes de almacenamiento, un sabor a leñoso e inmaduro en la capa de la mitad; esta misma capa presentó problemas de grano decolorado y sobresecado que pueden explicar en parte el sabor encontrado. En Kenya, Stirling (19, 20, 21 y 22), estudiando el efecto del almacenamiento con aireación controlada en silos, sobre la pérdida de la calidad encontró que después de 12 meses, el café enfriado a 10°C y 17°C, preserva el nivel original de calidad, con un pequeño signo de sabor a leñoso.

Se observa que el café almacenado en sacos presenta una prueba de taza de café reposado; en algunos casos, incluso, desde el segundo mes de almacenamiento, este defecto en la prueba de taza, además del rehumedecimiento encontrado, se debió a la influencia de las condiciones ambientales, características de Chinchiná, que estaban afectando este café y será el esperado para café almacenado en bodegas en la forma tradicional en las últimas capas y caras externas del arrume que están más expuestas a las condiciones ambientales.

En la prueba 19, donde el café fue almacenado en el silo sin aireación forzada, se observó que la capa del medio presentó una prueba de taza con sabor a moho y a sucio, al mes de almacenamiento, lo que concuerda con los altos valores de zonas de microorganismos encontrados en el límite del café considerado como de buena calidad microbiológica; esto sucedió debido a las condiciones de hermetismo en que se encontraba, además de estar almacenando café, a una temperatura alta (temperatura del grano: 24°C), favorable para el desarrollo de los procesos de deterioro que se produjeron en todo el grano almacenado. En esta misma prueba se detectó un sabor a reposo y a leñoso, en el segundo y tercer mes de almace-

namiento en la última capa, siendo el único caso presentado en el almacenamiento en silos.

### LITERATURA CITADA

1. Boyce, D.S.; Pérez Fonrodona, A.A. Observations on the resistance to vertical airflow of green and parchment coffees. *Journal of Agriculture of the University of Puerto Rico*. 46(1): 55-64. 1962.
2. Brooker, D.B.; Bakker-Arkema, F.W.; Hall, C.W. *Drying cereal grains*. The AVI Publishing Company, Inc. Westport, Connecticut. 1974, 265p.
3. Carvalho, V.D.; Chalfoun, S.M. Aspectos qualitativos do café. *Ing. Agropec.*, Belo Horizonte, 11 (126), Junho de 1985. p: 79-92.
4. Cleves, S.R. Informe sobre almacenamiento de café. Compañía Salvadoreña del Café S.A. Reproducido por la Oficina del Café de Costa Rica, Subtítulo: Condiciones que originan el "Blanqueo" del café. Requisitos básicos de almacenamiento para prevenirlos. 7 p. Febrero 24, 1964.
5. Federación Nacional de Cafeteros de Colombia. Centro Nacional de Investigaciones del Café. Chinchiná. (Colombia). Curso básico de Beneficio de Café. 3a. ed. Chinchiná (Colombia), Cenicafé, 1990. 80 p.
6. González, H. Diseño de un cuarto frío para el control de maduración de 40 toneladas de tomate. Cali (Colombia), Universidad del Valle, 1976. 99 p. (Tesis de Ingeniería Mecánica).
7. Hall, C.W. *Drying and storage of agricultural crops*. Dean college of Engineering. Washington State University. The AVI publishing Company. Westport, Connecticut, 1980. 377 p.
8. International Standard Organization. ISO. Proyecto de norma Dis 6673. De 05-06. 1982.
9. Jaramillo, H. Normas para la revisión de excelso de exportación. Normas de calidades No. 2 V2 de agosto de 1988. Gerencia Comercial Unidad de Control de Calidades. pp. 1-4.
10. Jaramillo, G. Propiedades físicas del café pergamino (**Coffea Arabica**), Bogotá - Colombia., Universidad Nacional de Colombia, 1989. 190 p. (tesis master science).
11. Lasseran, J.C. Aeração de graos. Viçosa, Centro Nacional de Treinamiento em Armazenagem, (serie Centrenair, n. 2), 1981. 128 p.
12. López, C.I.; Moreno, E.G.; Bautista, E. Influencia de los microorganismos sobre la calidad del café almacenado. Laboratorio de Investigaciones sobre la Química del Café. Tercera reunión del grupo de control de Calidad de Café de Federacafé. Bogotá. D.E. 1985.
13. López, C.I. Café pergamino. Análisis microbiológico, método rápido: Siembra directa del grano. 4p. 1990.
14. Montoya, E.C. Optimización operacional del secador intermitente de flujos concurrentes para café pergamino. Pereira (Colombia), Universidad Tecnológica 1989. 114 p. (Tesis Magister en Investigación de Operaciones y Estadística).
15. Multon, J.L. *Preservation and storage of grains, seeds and their by products*. New York, Lavosier Publishing, 1988. 1095 p.
16. Oliveros, C.E.; Roa, G.M. Pérdidas de presión por el paso del aire a través de café pergamino, variedad caturra, dispuesto a granel. Federación Nacional de Cafeteros de Colombia. Centro Nacional de Investigaciones de Café. Chinchiná, Caldas. 19 p. 1985.

17. Sanderson, D.B.; Muir, W.E.; Sinha, R.N. Intergranular Air temperatures of Ventilated Bulk of Wheat. Agric. Engng. 1988. 40:33-53.
18. -----, Moisture Contents Within Bulks of Wheat Ventilated With Near Ambient Air: experimental results. Agric. Engng. 1988.
19. Stirling, H. Storage research on Kenya Arabica coffe. National Research development corporation. London 13 p. 1975.
20. ----- Warehouse design for durable produce in non-humid tropics with particular reference to coffe storage in Kenya. Coffe Board of Kenya. 11 p. Dec. 1974.
21. ----- Further experiments on the factors affecting quality in stored arabica coffe. Kenya coffe, january, 1975. 8 p.
22. ----- The effects of temperature and moisture content on the quality of parchment arabica coffe during a 12 month sealed storage trial, Kenya coffe, March 1974. p: 73-79.
23. Trejos, R.A. Determinación de la humedad relativa de equilibrio y del calor latente de vaporización del café pergamino y trillado. Cali (Valle), Universidad del Valle, 1986. 171 p. (tesis de ingeniería agrícola).
24. Trejos, R.A.; Roa, G.M. Uso del aire tratado para la conservación del café pergamino. Almacenes Generales de Depósito ALMACAFE, Centro Nacional de Investigación Laboratorio de Investigaciones de la Química del Café. Propuesta de investigación. Chinchiná (Colombia), 1989. 126 p.

# INGENIERIA E INVESTIGACION

Revista de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional de Colombia, Sede Santafé de Bogotá, D.C.

Publicación especializada al servicio de la comunidad científica y técnica del país.

## TARIFAS PUBLICITARIAS

Contraportada exterior	\$ 350.000.00
Contraportadas interiores	\$ 300.000.00
Página Interior	\$ 220.000.00
Media Página	\$ 150.000.00

Publicacion trimestral

¡ ANUNCIE EN ELLA!