

## COEFICIENTE DE FRICCIÓN, ANGULO DE REPOSO Y DENSIDADES APARENTES DE GRANOS DE CAFE *Coffea arabica* VARIEDAD CATURRA

Carlos Eugenio Oliveros-Tascón\*

Gonzalo Roa-Mejía\*\*

### RESUMEN

Se determinó la densidad aparente media, sin compactar, para granos de café de la especie *Coffea arabica* variedad Caturra, en cereza, despulpado, lavado, pergamino seco y en almendra. El valor más alto correspondió a café despulpado ( $826 \text{ kg m}^{-3}$ ) y el más bajo a café pergamino seco ( $401 \text{ kg m}^{-3}$ ). Se determinó también la densidad aparente media para granos compactados encontrándose un incremento máximo con relación a la densidad aparente media sin compactar de  $9,5\%$  con café pergamino seco ( $11,7\%$  o b.h.). Se midió el ángulo de reposo para los mismos estados de café. Esto se hizo determinando la altura de la cuña formada al descargar el producto contenido en un paralelepípedo de  $0,25 \times 0,15 \times 0,15 \text{ m}$ , construido en acrílico, mediante una compuerta lateral adecuadamente dispuesta. El valor más alto fue para café lavado ( $40,7^\circ$ ) y el más bajo para café en almendra ( $27,8^\circ$ ). También se determinó el coeficiente de fricción estático entre los granos mencionados, para diferentes materiales de construcción (concreto, madera, placas de arcilla, tubo de PVC), a partir de la relación entre la fuerza necesaria para iniciar el movimiento horizontal de un carrito de  $0,20 \times 0,15 \times 0,15 \text{ m}$ , soportado por pequeñas balineras, cargado con los granos y la fuerza normal ejercida por la masa del producto sobre la superficie. El café pergamino seco presentó los más altos valores de coeficiente de fricción. Los valores obtenidos fluctuaron entre 0,31 para superficie de PVC y 1,55 para superficie de concreto. El café despulpado presentó los más bajos valores de coeficiente de fricción, los cuales variaron entre 0,27 para superficie de PVC y 0,91 para superficie de madera tosca con flujo de los granos en dirección perpendicular a la fibra.

### SUMMARY

OLIVEROS T., C. E.; ROA M., G. Friction coefficient, angle of repose and aparent density of parchement coffee, *Coffea arabica*, Caturra variety. Cenicafé (Colombia) 36(1):22-38, 1985.

The average apparent density of coffee beans, *Coffea arabica*, Caturra variety without compactation, in different forms according to the farm process: whole fruit, pulped beans, washed beans, parchment beans and green beans, were determined experimentally. The highest value ( $826 \text{ kg m}^{-3}$ ) corresponded to the pulped beans and the lowest value ( $401 \text{ kg m}^{-3}$ ) to the dry parchment coffee beans. Apparent density of the same products was also obtained after compacting them manually. The maximum increment in the density, as the result of the compaction process, was of  $9.5\%$  for the dry parchment coffee beans ( $11.7\%$  moisture content, wet basis). The repose angle for the same products were determined by measuring of the length of two sides of the triangle (edge) formed by the natural discharge of the beans contained in an acrylic box ( $0.25 \times 0.15 \times 0.25 \text{ m}$ ) when one of the smaller vertical walls was lifted. The highest repose angle ( $40.7^\circ$ ) corresponded to the washed coffee beans, the lowest ( $27.8^\circ$ ) corresponded to the green coffee beans. The static friction coefficient between the same products and different construction materials (concrete, wood, clay plates, PVC tube, galvanized iron) were determined experimentally, as measured by the relation between the horizontal force needed to start the movement of samples of the beans contained in a small car ( $0.2 \times 0.15 \times 0.15 \text{ m}$ ) mounted in frictionless wheels, and the weight of the product exocered on the surfaces of the different materials. The dry parchment coffee beans presented the highest friction coefficient. The corresponding values of this product against concrete and the PVC surfaces were 1.55 and 0.31 respectively. Pulped coffee beans presented the lowest values varying between 0.27 for a PVC and 0.91 for rough wood with the fibers facing perpendiculary the grain flow direction.

Additional Key Words: Physical properties.

\* Asistente de la Sección de Ingeniería Agrícola del Centro Nacional de Investigaciones de Café, CENICAFE Chinchiná, Caldas, Colombia.

\*\* Jefe de la Sección de Ingeniería Agrícola del Centro Nacional de Investigaciones de Café, CENICAFE Chinchiná, Caldas, Colombia.

## INTRODUCCION

El valor de la densidad aparente indica la relación existente entre la masa y el volumen que ocupa un determinado producto. Esta densidad se diferencia de la densidad real en el volumen del aire comprendido en los espacios entre los granos. En la densidad aparente se adiciona este volumen al volumen de los granos. El conocimiento de esta propiedad física es útil en el diseño de equipos de manejo, silos, secadores y en general de cualquier contenedor de café. Algunos valores reportados en la literatura se presentan en el Apéndice 1.

El ángulo de reposo de un producto granular es el ángulo comprendido entre la horizontal y el lado del montículo formado por el grano en su caída libre sobre una superficie estática. Este ángulo es una propiedad del producto y está relacionado directamente con las fuerzas de fricción entre los propios granos. Se ha encontrado un aumento en el ángulo de reposo como consecuencia del incremento en el contenido de humedad y se sugiere que la capa de humedad que rodea cada partícula y los efectos de tensión son predominantes para mantener agregadas las partículas sólidas (6). El valor del ángulo de reposo es de importancia en el diseño de los equipos de manejo del café, los contenedores, las bandejas y correas transportadoras; sin embargo, son muy pocos los valores publicados en la literatura (Apéndice 2).

Los coeficientes de fricción estáticos entre los granos y las superficies de los contenedores, se definen como la relación entre la fuerza necesaria para vencer la resistencia que dichas superficies ofrecen al inicio del movimiento de los granos y la fuerza normal a la superficie de contacto. Los coeficientes de fricción dinámica representan la misma fuerza cuando los granos están en movimiento. Este coeficiente es menor que el estático, lo que indica que el ángulo mínimo de una superficie inclinada, sobre la cual se encuentra el producto granular, con la horizontal, y que permite iniciar su flujo es mayor que el ángulo correspondiente que permite continuar dicho movimiento. La fuerza de fricción puede considerarse como el resultado de la acción concurrente de dos tipos de fuerzas: una cortante y de deformación de asperezas, y otra de adhesión y de cohesión (6). Buelow, citado por Mohsenin (6) al determinar el coeficiente de fricción de maíz desgranado, sobre una lámina de acero, encontró que sobre un rango de valores desde muy bajas presiones hasta aquellos equivalentes a una altura de 0,61 m de grano, el efecto de la carga sobre el coeficiente de fricción no fue estadísticamente significativo. Además, que los granos de maíz con 19% y 12% de contenido de humedad (b.h.) presentaron un ligero aumento del coeficiente de fricción debido a la variación de la velocidad en el rango de 0,76 a 0,38 m. seg<sup>-1</sup>.

Para obtener resultados reproducibles, varios investigadores han encontrado que la superficie debe ser acondicionada haciendo pases repetidos antes de registrar los datos de fricción.

Bickert y Buelow, citados por Mohsenin (6) encontraron en maíz desgranado diferencias hasta de 50% en las fuerzas de fricción sobre una misma superficie de vidrio durante el acondicionamiento. Sobre lámina de acero fueron necesarios aproximadamente de 400 a 500 ciclos de pases repetidos antes de que el coeficiente de fricción cinético se estabilizara.

Lorenzen, citado por Mohsenin (6), observó que el coeficiente estático de fricción para trigo, maíz, cebada y arroz sobre madera y superficies de acero se incrementan con el aumento de su contenido de humedad a partir del 13%. También encontró que granos con cáscara intacta eran menos afectados por la humedad que granos sin cáscara. Aparentemente, la parte de cohesión de la fuerza de fricción es menos influenciada por la presencia de cáscaras ásperas.

Eschenwald y Hall (3) determinaron los coeficientes de fricción entre granos de café, especie *Coffea arabica* variedad nativa, en cereza y despulpado, y sobre distintos materiales de construcción mediante el método convencional del plano inclinado.

Se utilizaron anillos de cartulina para contener los granos de tal forma que éstos resbalaran sobre la superficie en estudio sin rodar. El plano fue inclinado lentamente hasta que el producto se deslizara sobre la superficie. El ángulo fue medido con un transportador y la tangente fue considerada como el coeficiente de fricción.

En el Apéndice 3 se presentan los promedios de los coeficientes de fricción obtenidos en cuatro ensayos donde el producto se deslizó sobre la superficie sin rodar y el anillo de cartulina no estuvo en contacto con la superficie.

## MATERIALES Y METODOS

Tanto en el caso de la medida de la densidad aparente como del ángulo de reposo y el coeficiente de fricción, se realizaron 20 ensayos para cada tipo de grano, de la especie *C. arabica* variedad Caturra (cereza, baba, húmedo, pergamino seco y almendra). En lo que se refiere a la densidad aparente, se hicieron ensayos adicionales con cisco de café.

### A. Densidad aparente.

Se construyó un cilindro de 0,19 de diámetro y de 0,20 de altura como se indica en la Figura 1.

Se colocó una tolva cónica de 0,006 m<sup>3</sup> encima del cilindro de forma que la parte inferior del tubo de descarga quedara 0,1 metros por encima de la parte superior del

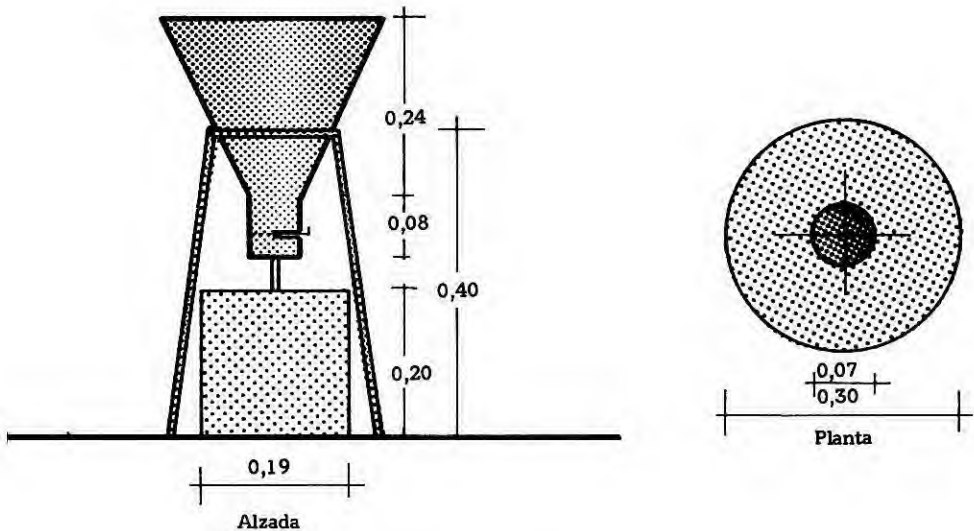


FIGURA 1.- Equipo para determinación de la densidad aparente del café.

cilindro. Mediante una compuerta en la parte inferior de la tolva se descargó el café por gravedad al cilindro. El exceso de grano en el recipiente se eliminó utilizando una superficie plana. El valor de la densidad aparente, sin compactar, se calculó como la relación entre la masa neta del producto contenido en el cilindro y el volumen del mismo.

En otras experiencias el recipiente cilíndrico que contenía los granos de café, fue dejado caer repetidamente desde una altura aproximada de 0,15 m con el fin de compactar la masa del producto. Cada cinco caídas se llenó el recipiente nuevamente con el producto, se niveló la superficie y se pesó. Se consideró como terminado el ensayo de compactación de la masa de granos de café cuando la variación en peso de un cilindro a otro después de volver a llenar y nivelar la superficie no excediera de 0,005 kg. Los mismos ensayos de compactación se hicieron para cisco de café.

#### B. Angulo de reposo.

Se construyó un paralelepípedo en lámina de acrílico transparente de espesor 0,003 m con dimensiones de 0,25 x 0,15 x 0,25 m según se indica en la Figura 2. Una de las caras laterales del paralelepípedo se construyó de forma que permitiera descargar libremente el producto contenido en su interior. Se determinó la altura media de la cuña formada al descargar el producto contenido en el recipiente.

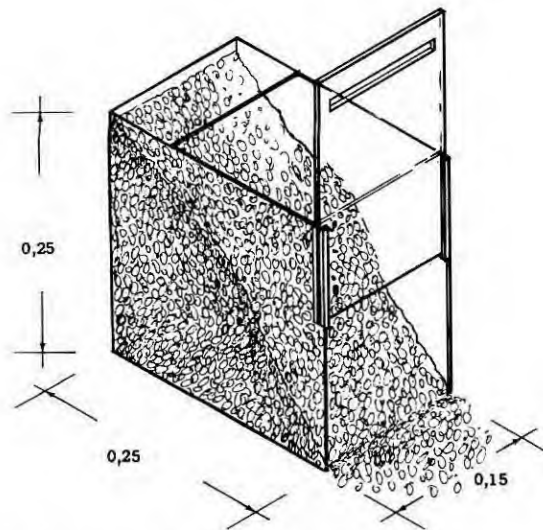


FIGURA 2.- Equipo para la determinación del ángulo de reposo del café.

### C. Coeficiente de fricción.

Se construyó un carrito en lámina de acrílico transparente de espesor 0,003 m, de dimensiones 0,20 x 0,15 x 0,15 m montado sobre pequeñas balineras, según se muestra en la Figura 3. Las paredes del carrito quedaron 0,002 m por encima de la superficie horizontal.

Los granos de café en el fondo del carrito y en contacto directo con la superficie de estudio ofrecen una resistencia al avance de éste. Se colocaron pesos de hierro en la canastilla hasta conseguir la fuerza necesaria ( $F$ ) para iniciar el movimiento. El coeficiente de fricción estática ( $f$ ) fue obtenido a partir de la relación entre la fuerza ( $F$ ) para iniciar el movimiento y la fuerza normal ( $N$ ) a la superficie ejercida por el producto.

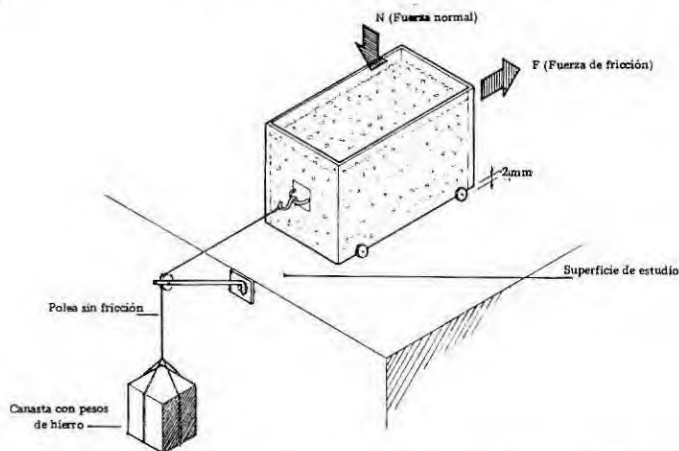


FIGURA 3.- Equipo para la determinación del coeficiente de fricción entre el café y diferentes superficies.

Los ensayos se hicieron sobre superficies planas de madera cepillada (con flujos de granos, paralelos y perpendiculares a la fibra), madera tosca (con flujos de granos, paralelos y perpendiculares a la fibra), concreto fraguado en contacto con formaletas de madera, lámina de hierro, plaquetas de mayólica y alfagres (arcillas con tratamiento a altas temperaturas) y canal circular de 0,15 m de diámetro en PVC. Para los ensayos de fricción sobre superficie de PVC se construyó un equipo adicional como se muestra en la Figura 4. Se colocaron capas gruesas de granos de café en los diferentes estados estudiados y se inclinó lentamente el canal hasta conseguir que los granos se deslizaran sin rodar. Con el valor de la altura a la cual se produjo el deslizamiento y la longitud del canal se calculó la pendiente, que se consideró como el coeficiente de fricción.

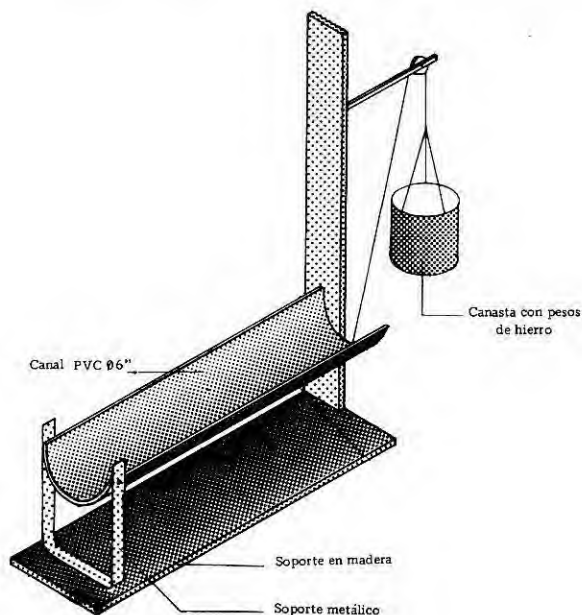


FIGURA 4.- Equipo utilizado para la obtención del coeficiente de fricción entre granos de café y la superficie de PVC.

## RESULTADOS Y DISCUSION

Los valores medios, coeficientes de variación e intervalos de confianza para las medias al 10/o y 50/o de probabilidad para la densidad aparente de los granos de café sin compactar, especie *Coffea arabica* variedad Caturra, en cereza, en baba, lavado, pergamino seco y en almendra se muestran en la Tabla 1. Los bajos coeficientes de variación reflejan poca dispersión de los datos de la densidad aparente en torno del valor medio para todos los estados de los granos de café.

Las posibles comparaciones entre los valores medios obtenidos en este estudio y los reportados por la literatura y reproducidos en el Apéndice 1 están limitadas por la falta de información sobre las propiedades físicas de los granos de café utilizado (tamaño y forma, especialmente) y detalles de la metodología seguida. Sin embargo, se encontró mayor similitud con los datos citados por Menchu (5), para todas las condiciones de los granos de café estudiados.

TABLA 1.- VALORES\* DE DENSIDAD APARENTE MEDIA (DAM), COEFICIENTES DE VARIACION (CV) Y LIMITES DE CONFIANZA PARA LA MEDIA INFERIOR (I) Y SUPERIOR (S) AL 0,05 Y 0,01 DE PROBABILIDAD PARA GRANOS DE CAFE EN DIFERENTE ESTADO.

Estado del café	DAM (Kg. m <sup>-3</sup> )	C.V. 0/o	Límites de confianza para la Media			
			I(0,05)	S(0,05)	I(0,01)	S(0,01)
En cereza	624,35	0,79	622,05	626,65	621,21	627,49
Despulpado	826,00	1,63	819,50	832,50	817,10	834,90
Lavado	697,65	0,52	695,96	699,34	695,34	699,96
Pergamino seco	400,75	0,40	399,99	401,51	399,71	401,79
Almendra	722,05	0,41	720,67	723,43	720,17	723,93
Cisco de café	257,0	1,26				

\* La caracterización de estos granos, es decir, sus dimensiones ortogonales medias, los coeficientes de variación de las mismas y los límites de confianza para las medias, se presentan en la Tabla 10.

En la Tabla 2 se muestran los valores de densidad aparente obtenidos para granos de café compactados manualmente. Se observa, en general, un incremento máximo de 9,5<sup>0</sup>/o con respecto al valor sin compactar. Este incremento de densidad debido a la compactación del pergamino seco, es similar al reportado por Castillo (1) para arroz sin cáscara almacenado en silos de concreto (8<sup>0</sup>/o).

Los valores medios de ángulo de reposo para granos de café en cereza, en baba, lavado, en pergamino seco y en almendra son mostrados en la Tabla 3. Los coeficientes de variación obtenidos muestran la poca dispersión de los datos en torno de las medias para cada uno de los estados de los granos. El ángulo de reposo medio obtenido para café en pergamino seco es mayor (11,5<sup>0</sup>/o) que el reportado en la literatura. Para café en almendra no se observó diferencia. Se observó que cuando los granos de café en baba contenían más agua (por adición durante el despulpado) se producía el deslizamiento de una masa gruesa de

TABLA 2.- VALORES DE DENSIDAD APARENTE PARA GRANOS DE CAFE EN DIFERENTES ESTADOS Y COMPACTADOS MANUALMENTE (Kg. m<sup>-3</sup>).

Estado del grano	Densidad
Café en cereza	565
Café despulpado	894
Café lavado	758
Café pergamino seco	439
Café en almendra	776
Cisco de café	322

TABLA 3.- VALORES DE ANGULO DE REPOSO MEDIO (ARM), COEFICIENTES DE VARIACION (CV) Y LIMITES DE CONFIANZA PARA LA MEDIA INFERIOR (I) Y SUPERIOR (S) AL 0,5 Y 0,01 DE PROBABILIDAD PARA GRANOS DE CAFE EN DIFERENTE ESTADO.

Estado del grano	ARM (°)	CV (°/o)	Límites de confianza para la Media			
			I(0,05)	S(0,05)	I(0,01)	S(0,01)
Cereza	40,29	2,44	39,83	40,75	39,66	40,92
Despulpado	32,91	5,90	31,88	33,95	31,48	34,34
Lavado	40,67	1,84	40,33	41,02	40,20	41,15
Café pergamino seco	35,01	1,55	34,76	35,27	34,67	35,36
Almendra	27,75	3,00	27,36	28,15	27,22	28,29

producto sobre una delgada en el fondo del recipiente, desapareciendo prácticamente la cuña. Este comportamiento (de pseudofluido) fue verificado adicionando agua al café despulpado sin agua, antes de cada ensayo.

En las tablas 4, 5, 6, 7 y 8 se muestran los valores medios, coeficientes de variación e intervalos de confianza al 10% y 50% de probabilidad de los coeficientes de fricción para granos de café en cereza, despulpado, lavado, pergamino seco y en almendra, sobre superficies de madera cepillada (con el flujo de los granos paralelo y perpendicular a la fibra), lámina de hierro, PVC, plaquetas de alfagres y mayólica. En general, fueron obtenidos valores de coeficientes de fricción altos para café en pergamino seco y bajos para granos de café despulpado, contrario a lo encontrado por Eschenwald y Hall. Los valores medios de los coeficientes de fricción se presentan en el Apéndice 3.

En los ensayos de fricción de café despulpado sobre PVC se observó que cuando se colocaban capas delgadas similares a las utilizadas por Eschenwald y Hall, el coeficiente de



TABLA 4.- VALORES DE COEFICIENTES DE FRICCION MEDIOS (CFM), COEFICIENTES DE VARIACION (CV) Y LIMITES DE CONFIANZA PARA LA MEDIA SUPERIOR (S) E INFERIOR (I) AL 0,05 Y 0,01 DE PROBABILIDAD PARA GRANOS DE CAFE EN CEREZA.

Tratamiento	Límites de confianza para la media					
	CFM	CV (%)	I(0,05)	S(0,05)	I(0,01)	S(0,01)
Metal	.62	10.56	.59	.66	.58	.67
Concreto (fraguado en contacto con formaletas de madera).	.55	9.18	.52	.57	.52	.58
Alfagres.	.76	9.71	.72	.79	.71	.80
Mayólica.	.62	9.50	.59	.64	.58	.66
P V C	.49	6.26	.47	.50	.47	.51
Madera cepillada (fibra perpendicular al flujo de grano).	.65	8.74	.63	.68	.62	.69
Madera cepillada (fibra paralela al flujo de grano).	.63	7.08	.61	.65	.60	.66
Madera tosca (fibra perpendicular al flujo de grano).	.74	11.26	.70	.78	.68	.79
Madera tosca (fibra paralela al flujo de grano).	.76	16.17	.70	.82	.68	.84

TABLA 5.- VALORES DE COEFICIENTES DE FRICCION MEDIOS (CFM), COEFICIENTES DE VARIACION (CV) Y LIMITES DE CONFIANZA PARA LA MEDIA SUPERIOR (S) E INFERIOR (I) AL 0,05 Y 0,01 DE PROBABILIDAD PARA GRANOS DE CAFE DESPULPADO.

Tratamiento	Límites de confianza para la media					
	CFM	CV (%)	I(0,05)	S(0,05)	I(0,01)	S(0,01)
Metal	.30	18.09	.27	.33	.26	.34
Concreto (fraguado en contacto con formaletas de madera).	.72	13.68	.66	.79	.63	.82
Alfagres.	.31	19.51	.28	.34	.27	.35
Mayólica.	.36	13.33	.34	.38	.33	.39
P V C	.27	12.29	.24	.29	.23	.30
Madera cepillada (fibra perpendicular al flujo de grano).	.58	12.97	.53	.64	.51	.66
Madera cepillada (fibra paralela al flujo de grano).	.67	22.74	.60	.74	.57	.77
Madera tosca (fibra perpendicular al flujo de grano).	.78	13.57	.73	.84	.71	.86
Madera tosca (fibra paralela al flujo de grano).	.78	16.97	.72	.85	.69	.88

TABLA 6.- VALORES DE COEFICIENTES DE FRICCIÓN MEDIOS (CFM), COEFICIENTES DE VARIACIÓN (CV) Y LÍMITES DE CONFIANZA PARA LA MEDIA SUPERIOR (S) E INFERIOR (I) AL 0,05 Y 0,01 DE PROBABILIDAD PARA GRANOS DE CAFE LAVADO

Tratamiento	Límites de confianza para la media					
	CFM	CV (%)	I(0,05)	S(0,05)	I(0,01)	S(0,01)
Metal	.67	14.32	.62	.72	.60	.73
Concreto (fraguado en contacto con formaletas de madera).	1.16	14.32	1.08	1.24	1.05	1.26
Alfagres.	.92	11.61	.87	.97	.85	.99
Mayólica.	.88	12.66	.83	.94	.81	.96
P V C	.60	6.89	.58	.62	.57	.62
Madera cepillada (fibra perpendicular al flujo de grano).	1.21	11.47	1.15	1.28	1.12	1.30
Madera cepillada (fibra paralela al flujo de grano).	1.08	11.36	1.02	1.13	1.00	1.15
Madera tosca (fibra perpendicular al flujo de grano).	1.25	13.74	1.16	1.34	1.13	1.37
Madera tosca (fibra paralela al flujo de grano).	1.20	17.70	1.10	1.30	1.06	1.34

TABLA 7.- VALORES DE COEFICIENTES DE FRICCIÓN MEDIOS (CFM) COEFICIENTES DE VARIACIÓN (CV) Y LÍMITES DE CONFIANZA PARA LA MEDIA SUPERIOR (S) E INFERIOR (I) AL 0,05 Y 0,01 DE PROBABILIDAD PARA GRANOS DE CAFE PERGAMINO SECO.

Tratamiento	Límites de confianza para la media					
	CFM	CV (%)	I(0,05)	S(0,05)	I(0,01)	S(0,01)
Metal	.56	11.56	.53	.59	.52	.60
Concreto (fraguado en contacto con formaletas de madera).	1.55	10.12	1.47	1.62	1.45	1.65
Alfagres.	1.02	13.34	.96	1.09	.94	1.11
Mayólica.	.97	13.60	.90	1.03	.88	1.05
P V C	.36	6.94	.35	.37	.34	.38
Madera cepillada (fibra perpendicular al flujo de grano).	.39	12.03	.37	.42	.36	.42
Madera cepillada (fibra paralela al flujo de grano).	.45	22.76	.40	.50	.38	.51
Madera tosca (fibra perpendicular al flujo de grano).	1.20	22.68	1.07	1.32	1.02	1.37
Madera tosca (fibra paralela al flujo de grano)	1.30	17.62	1.18	1.41	1.13	1.46

TABLA 8.- VALORES DE COEFICIENTES DE FRICCIÓN MEDIOS (CFM) COEFICIENTES DE VARIACION (CV) Y LÍMITES DE CONFIANZA PARA LA MEDIA SUPERIOR (S) E INFERIOR (I) AL 0,05 Y 0,01 DE PROBABILIDAD PARA GRANOS DE CAFE EN ALMENDRA.

Tratamiento	CFM	CV (%)	Límites de confianza para la media			
			I(0,05)	S(0,05)	I(0,01)	S(0,01)
Metal	.47	11.21	.44	.49	.43	.50
Concreto (fraguado en contacto con formaletas de madera).	1.00	15.44	.93	1.08	.90	1.10
Alfagres.	.62	11.55	.59	.66	.58	.67
Mayólica.	.57	12.62	.54	.61	.53	.62
P V C	.34	5.70	.33	.35	.32	.35
Madera cepillada (fibra perpendicular al flujo de grano).	.45	12.42	.43	.48	.42	.49
Madera cepillada (fibra paralela al flujo de grano).	.50	14.42	.46	.53	.45	.54
Madera tosca (fibra perpendicular al flujo de grano).	.57	17.04	.53	.62	.51	.63
Madera tosca (fibra paralela al flujo de grano)	.47	11.34	.44	.49	.44	.50

fricción era alto y al parecer las fuerzas de adhesión (responsables en gran parte de las fuerzas de fricción para granos de café en esta condición) entre el material y la superficie requerían de un mayor componente gravitacional para ser superadas. Lo anterior no se cumplió cuando se trabajó con capas de producto más espesas.

Se encontró por tanto, la influencia de la altura de la capa de granos sobre el coeficiente de fricción, lo cual no se verifica para los granos y otros productos de condiciones físicas distintas a la del café despulpado (7). Para el caso de fricción de los granos de café pergamino seco, en el estudio de Eschenwald y Hall, es posible que las fuerzas de adhesión sean menores que las otras fuerzas concurrentes en la fricción, de forma que el producto pueda deslizarse con una menor inclinación del plano.

Comparando los valores medios de los coeficientes de fricción de la Tabla 9 con los obtenidos por Eschenwald y Hall reportados en el Apéndice 3, se observan menores diferencias para café en cereza y mayores para café despulpado. A pesar de que la altura de la capa de café utilizada en este estudio (0,12 m aproximadamente) fue superior a la utilizada por Eschenwald y Hall, se esperaba obtener resultados similares para el café en cereza. Sin embargo, se encontró experimentalmente que para algunas condiciones de los granos de café en cereza y algunas superficies, los valores de los coeficientes de fricción variaron apreciablemente. La condición física de los granos de

TABLA 9.- VALORES MEDIOS DEL COEFICIENTE DE FRICCION PARA GRANOS DE CAFE EN DIFERENTE ESTADO Y CON DISTINTOS MATERIALES DE CONSTRUCCION

Tratamiento	Estado de los granos de café				
	En cereza	Despulpado	Lavado	Pergamino seco	Almendra
Metal	.62	.30	.67	.56	.47
Concreto	.55	.72	1.16	1.55	1.00
Alfagres	.76	.31	.92	1.02	.62
Mayólica	.62	.36	.88	.97	.57
P V C	.49	.27	.60	.36	.34
Madera cepillada (fibra perpendicular al flujo de grano).	.65	.58	1.21	.39	.45
Madera cepillada (fibra paralela al flujo de grano).	.63	.67	1.08	.45	.50
Madera tosca (fibra perpendicular al flujo de grano).	.74	.78	1.25	1.20	.57
Madera tosca (fibra paralela al flujo de grano)	.76	.78	1.20	1.30	.47

café en cereza una vez cosechados, experimenta un rápido deterioro por la acción de procesos bioquímicos que alteran su comportamiento en las pruebas de fricción. Por otra parte, granos de café en cereza muy maduros, una vez despulpados, sueltan rápidamente parte del mucílago, adquiriendo una textura semi-rugosa.

En la Tabla 11 se muestran los resultados obtenidos al comparar las medias de los coeficientes de fricción correspondientes a pares de superficies escogidos, para granos de café en cereza, despulpado, lavado, pergamino seco y en almendra. Las comparaciones fueron hechas a un nivel de significancia de 0,05 considerando número de muestras iguales o diferentes y varianzas para cada caso iguales o diferentes. La relación de varianza se estudió mediante la prueba de F.

TABLA 10.- DIMENSIONES ORTOGONALES MEDIAS (L1, L2 Y L3), COEFICIENTES DE VARIACION (CV) Y LIMITES DE CONFIANZA PARA LA MEDIA INFERIOR (I) Y SUPERIOR (S) AL .05 y .01 DE PROBABILIDAD PARA GRANOS DE CAFE EN CEREZA, EN BABA, LAVADO, PERGAMINO SECO\* Y EN ALMENDRA\*\*.

	Estado de los granos de café				
	En cereza	En baba	Lavado	Pergamino seco	Almendra
L1 (mm)	15,98	12,82	12,57	12,41	10,24
CV (o/o)	8,80	7,73	7,37	7,54	8,83
I (0,05)	15,33	12,36	12,14	11,97	9,82
S (0,05)	16,64	13,29	13,00	12,85	10,66
I (0,01)	15,08	12,19	11,98	11,81	9,66
S (0,01)	16,89	13,46	13,16	13,01	10,82
L2 (mm)	12,75	5,50	5,12	4,82	3,95
CV (o/o)	10,04	6,80	4,38	7,72	5,78
I (0,05)	12,16	5,32	5,02	4,65	3,84
S (0,05)	13,35	5,68	5,23	4,99	4,06
I (0,01)	11,94	5,26	4,98	4,58	3,80
S (0,01)	13,57	5,74	5,27	5,06	4,10
L3 (mm)	13,75	8,67	8,35	8,54	7,05
CV (o/o)	6,66	7,16	5,36	6,46	6,94
I (0,05)	13,32	8,38	8,14	8,28	6,82
S (0,05)	14,18	8,97	8,56	8,80	7,28
I (0,01)	13,16	8,28	8,06	8,19	6,74
S (0,01)	14,34	9,07	8,64	8,89	7,39

\* Contenido de humedad 11,7<sup>o</sup>/o b. h.

\*\* Contenido de humedad 12,1<sup>o</sup>/o b. h.

TABLA 11.- COMPARACION DE MEDIAS DE COEFICIENTES DE FRICCION PARA PARES ESCOGIDOS DE DIFERENTES SUPERFICIES CORRESPONDIENTES A DIFERENTES ESTADOS DE CAFE. VALORES DE t CALCULADOS.

Comparación	Condiciones de los granos de café				
	En cereza	En baba	Lavado	Pergamino seco	Almendra
Mayólica vs. Alfagres.	6,79*	2,86*	1,12	1,17	2,26*
Madera cepillada en dirección perpendicular vs. madera cepillada en dirección paralela al sentido de la fibra.	2,11*	2,15*	3,15*	2,40*	2,43*
Madera tosca en dirección perpendicular vs. madera tosca en dirección paralela al sentido de la fibra.	2,10*	0	79	1,20	4,00*
Metal vs. PVC.	7,63*	1,71	2,11*	11,99*	10,80*
Madera tosca en dirección paralela vs. madera lisa en dirección perpendicular.	4,60*	2,36*	2,22*	2,12	1,56

\* Diferencias significativas.

## CONCLUSIONES

El valor más alto de densidad aparente sin compactar fue obtenido para café despulpado ( $826 \text{ kg. m}^{-3}$ ) y el más bajo correspondió a café pergamino seco ( $401 \text{ kg. m}^{-3}$ ).

En los ensayos de densidad aparente con compactación, el café pergamino seco presentó el mayor incremento ( $9,50\%$ ) con relación a la densidad sin compactar.

El valor más alto del ángulo medio de reposo fue obtenido con café lavado ( $40,70^\circ$ ) y el más bajo con café en almendra ( $27,80^\circ$ ).

El café pergamino seco presentó los más altos valores de coeficiente de fricción el cual varió entre 0,31 para superficie de PVC y 1,55 con superficie de concreto. El café despulpado presentó los más bajos valores de coeficiente de fricción, entre 0,27 para superficie de PVC y 0,91 para madera tosca con flujo de los granos en dirección perpendicular a la fibra.

l

A un nivel de significancia de 0,05 de probabilidad se tiene que:

- Existe diferencia entre los valores medios de coeficientes de fricción de granos de café en cereza, despulpado, lavado, pergamino seco y almendra, para superficies de madera cepillada, cuando el flujo de los granos es en dirección paralela y perpendicular al sentido de la fibra.
- No existe diferencia entre los valores medios de coeficientes de fricción para granos de café lavado y pergamino seco con superficies de madera tosca con dirección de flujo de granos paralelo y perpendicular al sentido de la fibra.
- Con excepción para el café lavado y pergamino seco, existe diferencia entre las medias de los coeficientes de fricción con superficies de mayólica y alfagres.

## BIBLIOGRAFIA

1. CASTILLO N., A. Almacenamiento y secamiento de granos en Colombia y en América Tropical. Bogotá, Colombia. Agrosíntesis. 1978. 246 p.
2. COSTE, R. El café. 1a. ed. Barcelona (España). Editorial Blume. 1969. 285 p.
3. ESCHENWALD, A.; HALL, C. W. Coefficient of friction, angle of repose, specific gravity, and bulk density of coffee fruits and coffee beans. Journal of Agriculture of University of Puerto Rico 45(1):19-25. 1961.

4. FEDERACION NACIONAL DE CAFETEROS DE COLOMBIA: Consideraciones a tener en cuenta al construir un beneficiadero de café. Bogotá (Colombia), Federacafé. 1972. 24 p. (Instructivo Interno de Extensión No. 8).
5. MENCHU, J. F. Manual práctico de beneficios de café. Guatemala. Asociación Nacional del Café. 1973. 96 p. (Boletín No. 13).
6. MOHSENIN, N. N. Physical properties of plant and animal materials. Volume I. Structure, physical characteristics and mechanical properties. New York (EE. UU.). Gordon and Breach Science Publishers. 1970. 733 p.
7. SIVETZ, M.; FOOTE, H. E. Coffee processing technology. Volume One. Fruits-Green, roast, and soluble coffee. Connecticut (EE. UU.). The Avi Publishing Company, Inc. 1963. 598 p.
8. TOSELLO, A. Angulo de talude natural. In: Tosello, A. Apostillas dos cursos de materias primas agropecuarias. Campinas (Brasil). Universidade Estadual de Campinas-UNICAMP. 1975. pp. 98 (Mecanografiado).
9. URIBE H., A. Constantes físicas y factores de conversión en café. Chinchiná. Centro Nacional de Investigaciones de Café. 1977. 4 p. (Avances Técnicos Cenicafé No. 65).
10. WANYONYI, J. J. M. An outline of coffee processing. Nairobi (Kenya). Ministry of Agriculture. 1972. 107 p.

APENDICE 1.- DENSIDAD APARENTE DE LOS GRANOS DE CAFE Y DE LA PULPA FRESCA  
(kg. m<sup>-3</sup>), SEGUN VARIAS FUENTES.

Tipo de café	Coste, R. (2)	Sivets &			Federacafé (5)	Uribe (9)	Eschenwald & Hall (4)
		Foot (8)	Menchu (6)	Brasil (3)			
Cereza	620	616	621	—	600	600	600
Despulpado	—	846	851	—	800	800	—
Lavado	—	665	671	—	—	650	—
Presecado (seco de agua)	—	—	521	—	—	—	—
Pergamino seco	—	352	373	395	—	380	—
Almendra	—	650	680	600-680	—	680	—
Pulpa fresca	—	—	—	—	—	—	248

APENDICE 2.- ANGULO DE REPOSO DEL CAFE PERGAMINO SECO Y DEL CAFE EN ALMENDRA.

Estado del café	Angulo de reposo
Café pergamino seco	31°
Café en almendra	27-30°

Fuente: Ministerio de Agricultura, Sao Paulo, Brasil.



APENDICE 3.- COEFICIENTES DE FRICCIÓN DE LOS FRUTOS DEL CAFE Y DEL CAFE PERGAMINO SECO MEDIDOS SOBRE DIFERENTES SUPERFICIES DE CONSTRUCCION, SEGUN ESCHENWALD Y HALL (3).

Tratamiento	Frutos maduros		Frutos verdes					
	Superficie seca	Superficie húmeda	Superficie seca	Superficie húmeda	Café despulpado	Pulpa fresca	Café lavado	Café pergamino seco
	Concreto (alisado con madera).	.64	.59	.64	.62	.94	.70	1.03
Concreto (fraguado en contacto con formaletas de madera).	.68	.55	.59	.59	.93	.62	.98	.51
Madera tosca (con fibra paralela al flujo de grano).	.61	.75	.77	.85	—	—	—	—
Madera tosca (con fibra perpendicular al flujo de grano).	.68	.74	.59	.66	—	—	—	—
Madera cepillada (con fibra paralela al flujo de grano).	.61	.70	.51	.67	.90	.75	1.07	.42
Madera cepillada (con fibra perpendicular al flujo de grano).	.61	.66	.59	.67	.93	.81	1.15	.49
Triplex (con fibra paralela al flujo de grano).	.59	.69	.50	.60	—	—	—	—
Triplex (con fibra perpendicular al flujo de grano).	.64	.71	.55	.47	.62	—	—	.53
Lámina de hierro galvanizado.	.57	.47	.50	.47	.54	.60	.87	.40
Lámina de aluminio.	.58	.52	.54	.47	.49	.58	.78	.40
Acero inoxidable.	.64	.55	.49	.45	—	—	.65	.34
Acero	.59	.49	.59	.58	.65	.73	.90	.53