

PROPIEDADES FÍSICO-MECÁNICAS DEL FRUTO Y DEL SISTEMA FRUTO-PEDÚNCULO DEL CAFÉ VARIEDAD COLOMBIA

Elizabeth Alvarez Tobón¹; Fernando Alvarez Mejía²,
Carlos Oliveros Tascón³; Esther Cecilia Montoya Restrepo⁴

RESUMEN

En el Centro Nacional de Investigaciones de café CENICAFÉ, se estudió para café cereza variedad Colombia de frutos amarillos y rojos, de 2, 3 y 4 años en estado de maduración verde, pintón y maduro, las propiedades físicas y mecánicas del sistema fruto-pedúnculo: dimensiones de los frutos, peso, momentos de inercia con respecto a los tres ejes (x, y, z), longitud, diámetro y rigidez del pedúnculo, fuerza de tracción y los momentos flectores y torsores necesarios para el desprendimiento de los frutos

El estado de maduración es el factor que mayor efecto tiene en las propiedades físico-mecánicas de los frutos y del sistema fruto-pedúnculo del café. La diferencia en la fuerza tractiva de desprendimiento entre los frutos maduros y verdes, es la propiedad más importante a considerar para el estudio de los principios que permitan el desprendimiento selectivo de los frutos de café, respuesta similar a la encontrada en otros estudios en Hawái y Australia. Se encontró que hay otras propiedades favorables para la cosecha selectiva aplicando vibraciones, como son las dimensiones ortogonales y los momentos de inercia observadas en los frutos maduros, y una propiedad desfavorable la longitud del pedúnculo, debido a su menor longitud.

Palabras Claves: *café cereza, coffea arabica, propiedades físico-mecánicas, cosecha de café.*

¹ Ingeniera Agrícola, disciplina de Ingeniería Agrícola. CENICAFÉ. Apartado 2427

² Profesor Asociado. Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín. Facultad de Ciencias Agropecuarias. Apartado 1779.

³ Investigador Científico III. Ingeniería Agrícola. CENICAFÉ. Apartado 2427

⁴ Investigador Científico I. Biometría. CENICAFÉ. Apartado 2427

ABSTRACT

At the Centro Nacional de Investigaciones de Café (CENICAFÉ) we obtained the following physical and mechanical properties of the fruit and the fruit-peduncle system of coffee cherries of Colombia variety, yellow and red fruits, of 2, 3 and 4 years of age. dimensions of fruits, weight, moment of inertia with respect to the three axis (x, y and z), length, diameter and stiffness of peduncle, traction force and bending and torsion moments required for the detachment of fruits.

The stage of maturity was found the main factor affecting the physical and mechanical properties of fruits and the fruit-peduncle system. As found by other researchers at Australia and Hawaii, the difference in the traction force of detachment for ripe and immature fruits is the more important property to be considered in the study of principles proposed for the selective harvest of coffee cherries. Some physical properties were found favoring the detachment of ripe fruits by means of vibrations such as orthogonal dimensions and moments of inertia, however the length of the peduncle, due to its lowest length, was found unfavoring for the selective detachment.

Key words: coffee cherry, *coffea arabica*, physical and mechanical properties, coffee harvest.

INTRODUCCIÓN

La alta calidad del café colombiano es el resultado de factores tales como las variedades cultivadas, la recolección selectiva de los frutos maduros y el beneficio húmedo. La cosecha es una de las labores que exige mayor mano de obra, incrementando notoriamente los costos de producción de café y comprometiendo la competitividad del producto en el mercado internacional.

La mecanización de la recolección ha permitido en muchos cultivos hortifrutícolas reducir los costos de producción. En el caso del café esta se ha logrado realizar en áreas planas de Australia, Brasil y Hawaii, utilizando vibradores de follaje y batidores mecánicos. Con estas máquinas la calidad de la cosecha no es comparable

con los estándares de Colombia debido al alto porcentaje de frutos inmaduros que se desprenden.

En CENICAFÉ se adelanta un macroproyecto de investigación en cosecha de café en el cual se exploran diferentes técnicas y principios empleados en otros países para el desprendimiento de los frutos, tales como vibración de ramas y tallo, vibradores de follaje, batidores mecánicos, aplicación de momentos flectores, herramientas para asistir la cosecha manual, entre otros.

En cada una de estas técnicas el desprendimiento de frutos se logra por el efecto combinado de esfuerzos mecánicos actuando en diferentes partes del sistema fruto-pedúnculo. En este experimento se obtuvo información

básica sobre las principales propiedades de los frutos y del sistema fruto-pedúnculo, importante para el desarrollo de cualquier dispositivo empleado para desprender selectivamente los frutos de café.

REVISIÓN DE LITERATURA

Diferentes propiedades físico-mecánicas del café a nivel del fruto y del subsistema fruto-pedúnculo han sido estudiadas en Hawaii (Wang, 1965, Crisosto y Nagao, 1991), en Brasil (Watson *et al*, 1979 y Watson, 1980), en Cuba (Martínez, 1988), en Australia (Winston *et al*, 1995) y en Colombia (Alvarez, 1990, Ciro 1997, Alvarez, 1998).

La propiedad mecánica que más ha sido investigada es la fuerza de tracción requerida para desprender los frutos en sus diferentes estados de maduración (desde inmaduros hasta sobramaduros y secos). En estos trabajos los autores encontraron que la fuerza de tracción depende de la variedad del café, la región geográfica y disminuye con la edad del fruto (grado de madurez) desde más de 10 N para los frutos verdes hasta menos de 6 N para los frutos maduros (Wang, 1965, Watson, 1980, Crisosto y Nagao, 1991, Alvarez, 1990).

Alvarez (1990), también encontró una menor diferencia de esta fuerza en los frutos maduros a medida que la edad del árbol aumenta. El autor determinó que la variedad Colombia requiere de mayor fuerza que la variedad Caturra

para desprender el fruto en su unión con el pedúnculo.

Martínez (1988), determinó el momento flector para desprender los frutos de variedad Caturra; ésta propiedad también se encontró que disminuye con la maduración del fruto desde 7,81 N-mm hasta 3,33 N-mm.

Wang (1965) a partir de propiedades como la constante elástica, la masa del fruto, el diámetro y la longitud del pedúnculo determinó la frecuencia natural del sistema fruto-pedúnculo.

Martínez (1988), considerando el sistema fruto-pedúnculo como un sistema de dos grados de libertad, en el que incluyó la rigidez ($E \cdot I$) del pedúnculo encontró una frecuencia natural más aproximada.

Ciro (1997) en un estudio del sistema fruto-pedúnculo del café variedad Colombia Rojo, encontró que la constante de elasticidad y el módulo de rigidez se incrementan con el grado de Localización. Las mediciones de campo se llevaron a cabo en la Estación Central Naranjal de CENICAFÉ ubicada en el municipio de Chinchiná (Caldas), con las siguientes condiciones:

- Altitud: 1.400 m.s.n.m
- Precipitación media: 2.711 mm
- Temperatura media: 20,7 °C
- Brillo solar: 1.800 horas
- Humedad relativa: 78%.

Materiales y Métodos. Las mediciones se efectuaron en plantaciones de variedad Colombia Amarillo (V.CoIA) y Rojo (V.CoIR) de tres edades diferentes (dos, tres y cuatro años) utilizando los siguientes equipos:

- Balanza electrónica, Mettler Pe 360 g sensibilidad 0,01 g.
- Calibrador digital, sensibilidad 0,001 mm.
- Transformador lineal, diferencial variable (LVDT) rango 0 - 0,25 mm.
- Fuente AC (Amplificador-demodulador DTR 451 de 3v y 2.500 Hz).

- Registrador portátil.
- Sensor de torque MARK-10 serie BGI.
- Sensor de fuerza MARK-10 serie BG.
- Medidor de momento flector, con sensor de fuerza (hasta 5N), motor DC, procesador de señales A&D y software para el control del equipo y la adquisición automática de datos.

Metodología. De cada plantación fueron seleccionados 30 árboles, en cada árbol fueron escogidos tres sistemas fruto-pedúnculo (Figura 1) en cada uno de los tres estados de maduración (maduro, pintón y verde).

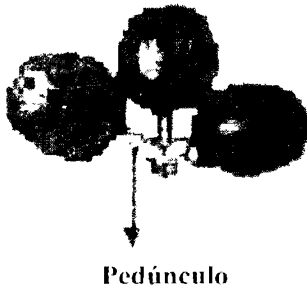


Figura 1. Sistema fruto-pedúnculo con frutos maduros.

A cada fruto se le midió sus dimensiones ortogonales largo (L), ancho (A) y espesor (E) con las cuales se

calculó los diámetros característicos (d1, d2, d3) y con estos el radio característico (R) utilizando las siguientes expresiones:

$$d_1 = \frac{L^2 + A^2 + E^2}{3} \quad (1)$$

$$d_1 = \sqrt{\frac{L^2 \cdot A^2 + A^2 \cdot E^2 + E^2 \cdot L^2}{3}} \quad (3)$$

$$d_2 = \sqrt[3]{L \cdot A \cdot E} \quad (2)$$

$$R = \frac{d_1 + d_2 + d_3}{6} \quad (4)$$

El peso de los frutos se determinó con una balanza electrónica. El diámetro y la longitud del pedúnculo se midió utilizando un calibrador digital.

El momento de inercia másico del fruto con respecto a los tres ejes (I_x , I_y , I_z), se determinó simulando el fruto en el espacio con el programa computacional en lenguaje AUTOLISP de AUTOCAD*, utilizando como valores de entrada las dimensiones ortogonales del fruto y la densidad real

promedio del fruto. Esta última se determinó mediante el principio de Arquímedes (citado por Ciro, 1997).

Para determinar la rigidez (EI) del pedúnculo, se asumió éste como una viga elástica, empotrada en un extremo y con una carga puntual en el otro. Utilizando el dispositivo mostrado en la Figura 2, se aplicaron diferentes fuerzas y se midió la deformación, con estos datos utilizando un modelo de regresión lineal se determinó la constante elástica.

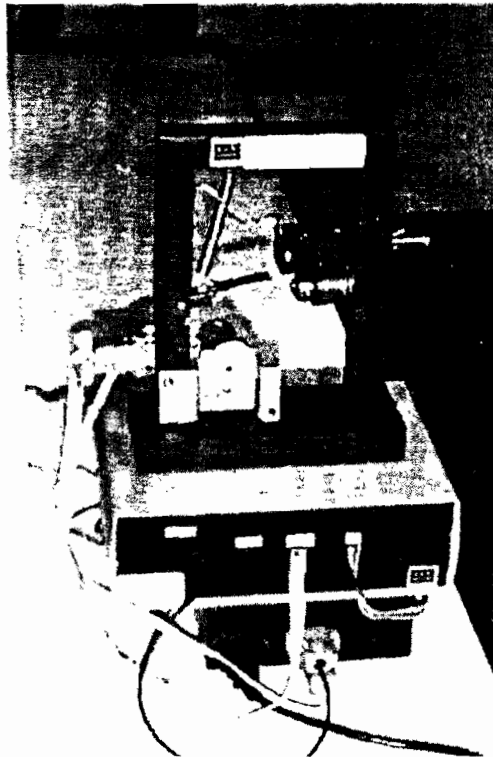


Figura 2. Dispositivo utilizado para medir la rigidez y el momento flector del pedúnculo.

También se midió la longitud del pedúnculo (l) y con los valores de l y K se determinó la rigidez, utilizando la siguiente ecuación:

$$EI = \frac{Kl^3}{3} \quad (5)$$

Donde:

- EI : Rigidez del pedúnculo [$N \cdot m^2$]
 K : Constante elástica del pedúnculo [N/mm]
 l : Longitud del pedúnculo [mm]

La fuerza de tracción (F_t) y el momento torsor (M_t) necesarios para desprender el fruto del pedúnculo se determinaron utilizando sensores y un registrador portátil que permitieron el registro directo en el campo (Figuras 3, 4 y 5).

Para determinar el momento flector necesario para desprender el fruto se utilizó el dispositivo mostrado en la Figura 2. En cada ensayo se registró la fuerza perpendicular aplicada al eje longitudinal del fruto en el punto de unión con el pedúnculo y se midió la distancia desde el punto de aplicación de la fuerza hasta el punto de empotramiento del fruto, por medio de un calibrador digital. Con los valores de fuerza y distancia se determinó el momento flector utilizando la siguiente expresión:

$$M_f = F \times l \quad (6)$$

Donde:

- M_f : Momento flector de desprendimiento ($N \cdot mm$)
 F : Fuerza perpendicular al fruto (N)
 l : Distancia (mm)

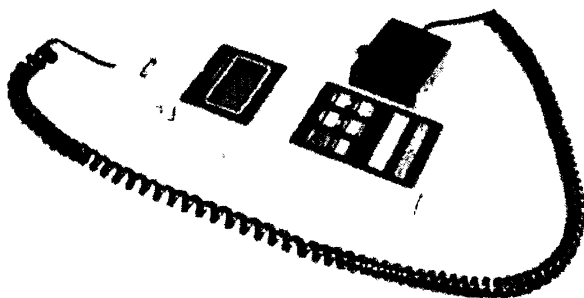


Figura 3. Sensor de fuerza y registrador.

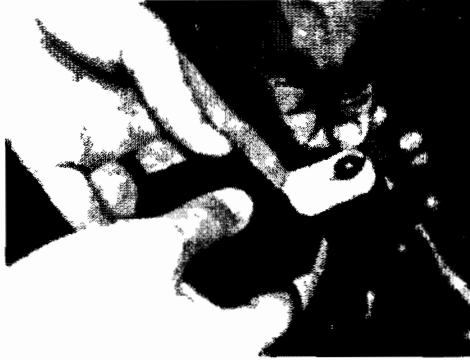


Figura 4. Medición de la fuerza de tracción.



Figura 5. Medición del momento torsor.

Análisis estadístico. Se realizó un análisis descriptivo que consistió en estimar las medidas de tendencia central, coeficiente de variación y rango. Se realizó un análisis de varianza de una vía con arreglo factorial 2x3x3 (dos variedades, tres edades del árbol y tres estados de madurez del fruto), al nivel del 5%. Cuando la interacción fue significativa, se aplicó la prueba de contraste al nivel del 5%. Además se aplicó un análisis multivariado, con el propósito de identificar las variables de respuesta con mayor peso en la variación total e identificar grupos de tratamientos, teniendo en cuenta el conjunto de variables de respuesta, de acuerdo con el dendograma y análisis "Cluster". Para la comparación de los grupos, con los promedios de las variables estudiadas, se aplicó la prueba de Duncan, al nivel del 5%.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Análisis descriptivo. Para todas las variables evaluadas el coeficiente de variación asociado al promedio fue menor del 21%. En general las medidas de tendencia, principalmente la media y mediana tienen estimaciones muy cercanas, descriptivamente, lo cual puede estar indicando que la distribución de las variables analizadas en cada uno de los factores estudiados presenta una distribución simétrica.

Análisis de varianza. Para las variables longitud "Lf", ancho "Af", espesor "Ef", radio característico "R" y peso del fruto

"Pf", diámetro (Dp) y longitud del pedúnculo (Lp), fuerza de tracción "Ft" y momento flector "Mf" de desprendimiento, el análisis de varianza mostró efecto de la interacción doble, lo cual implica que la respuesta de estas variables depende de los factores variedad, edad y estado de madurez. En la Figura 9 se observa que la V.ColR en árboles de dos años en el estado de fruto maduro presentó mayor radio, mientras que la variedad Colombia de frutos amarillos (V.ColA) en árboles de cuatro años de edad en el estado verde presentó el menor radio característico. Igual comportamiento fue observado en las variables Af (Figura 7), Ef (Figura 8) y en las variables Lf (Figura 6), Pf (Figura 10) los menores valores en variedades de ColR y ColA en árboles de cuatro años (Figuras 6 a 10). Estos resultados fueron corroborados a través de la prueba de contraste al nivel del 5%, bajo el análisis de varianza utilizado.

En general se observó que a medida que aumentó el grado de madurez del fruto aumentó el valor del peso y las dimensiones ortogonales del fruto, tendencia similar a la observada por Alvarez (1990) para el peso del fruto. Este aumento permite prever posibles diferencias en la respuesta dinámica del fruto bajo condiciones de vibración, succión u otro principio mecánico para los diferentes estados de madurez, lo cual podría ser aprovechado para el diseño de equipos.

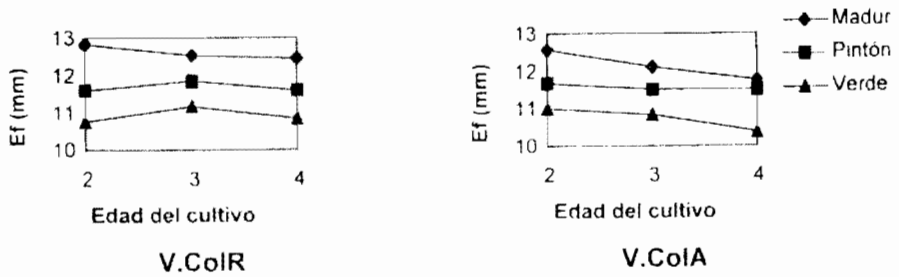


Figura 6. Comportamiento de la variable longitud del fruto “Lf” bajo la interacción variedad x edad de la planta x estado de madurez.

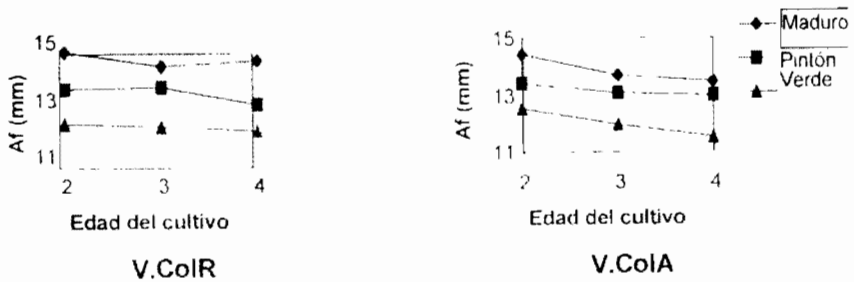


Figura 7. Comportamiento de la variable ancho del fruto “Af” bajo la interacción variedad x edad de la planta x estado de madurez.

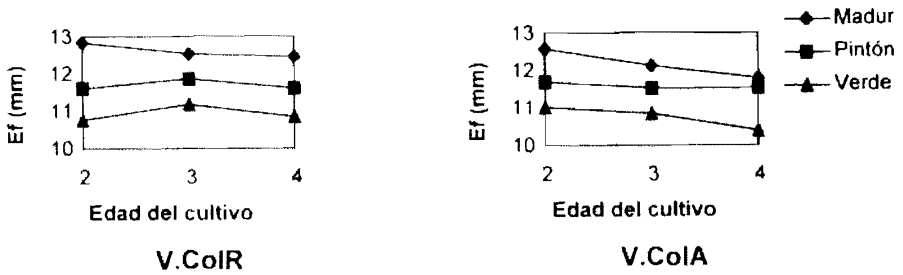


Figura 8. Comportamiento de la variable espesor del fruto “Ef” bajo la interacción variedad x edad de la planta x estado de madurez.

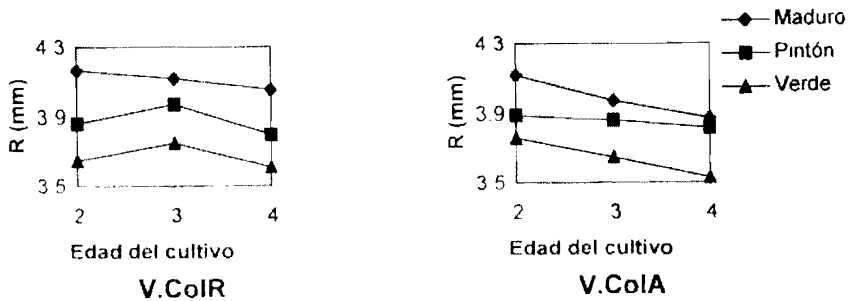


Figura 9. Comportamiento de la variable radio característico “R” bajo la interacción variedad x edad de la planta x estado de madurez.

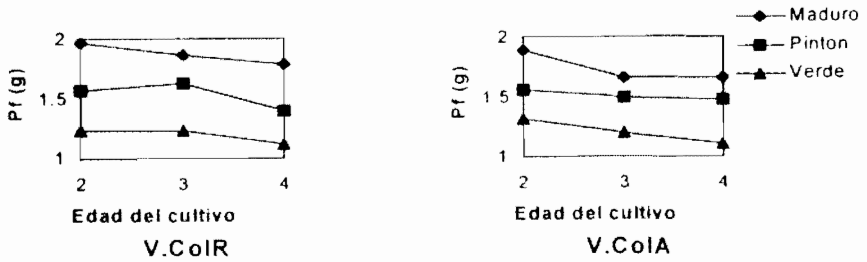


Figura 10. Comportamiento de la variable peso del fruto “Pf” bajo la interacción variedad x edad de la planta x estado de madurez.

En la variable diámetro del pedúnculo “Dp” el mayor valor fue observado en la V.CoIR en árboles de cuatro años de edad en el estado maduro del fruto y el

menor valor en V.CoIA de la misma edad en el estado pinton del fruto (Figura 11).



Figura 11. Comportamiento de la variable diámetro del pedúnculo “Dp” bajo la interacción variedad x edad de la planta x estado de madurez.

Para la variable Lp el mayor valor se presentó en la V.CoIA en árboles de tres años en el estado pinton del fruto y los menores valores se dieron en la

misma variedad en árboles de cuatro años en los tres estados de madurez (Figura 12). Esta menor longitud del pedúnculo mostrada por los frutos

maduros es una característica desfavorable desde el punto de vista de selectividad de la cosecha con la aplicación de vibraciones, ya que una

mayor longitud media de pedúnculo significa una disminución de la frecuencia natural del S.F.P necesario para el desprendimiento del fruto.

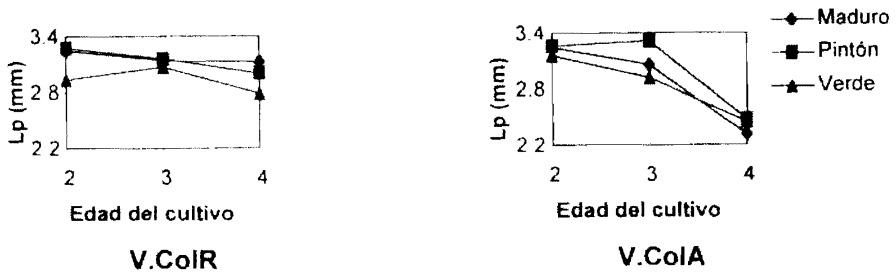


Figura 12. Comportamiento de la variable longitud del pedúnculo “Lp” bajo la interacción variedad x edad de la planta x estado de madurez.

Para cada uno de los momentos de inercia máxicos (I_x , I_y , I_z), el análisis de varianza no mostró efecto de la interacción doble pero sí de las interacciones simples.

Los mayores valores para I_x y I_y , en la interacción variedad por edad se dieron en árboles de tres años en V.CoIR y el I_z ocurrió en árboles de dos años en la V.CoIA y V.CoIR (Figura 13), el cual fue corroborado con la prueba de contraste al nivel del 5%. En la interacción edad por estado de madurez los mayores valores de I_x , I_y e I_z , fueron en árboles de dos años de edad y para el estado maduro del fruto y el menor valor para los frutos verdes en

árboles de cuatro años (Figura 14). El mayor momento de inercia mostrado por los frutos maduros es una característica positiva si se quiere lograr selectividad en la cosecha mecanizada por vibración, ya que esto se ve reflejado en una disminución de la frecuencia natural del sistema fruto-pedúnculo.

En la interacción variedad por estado de madurez, los mayores valores de I_x , I_y e I_z se dieron en la V.CoIR en el estado maduro del fruto y los menores valores de estas tres variables en el estado verde del fruto (Figura 15), lo cual fue corroborado con la prueba de contraste, al nivel del 5%.

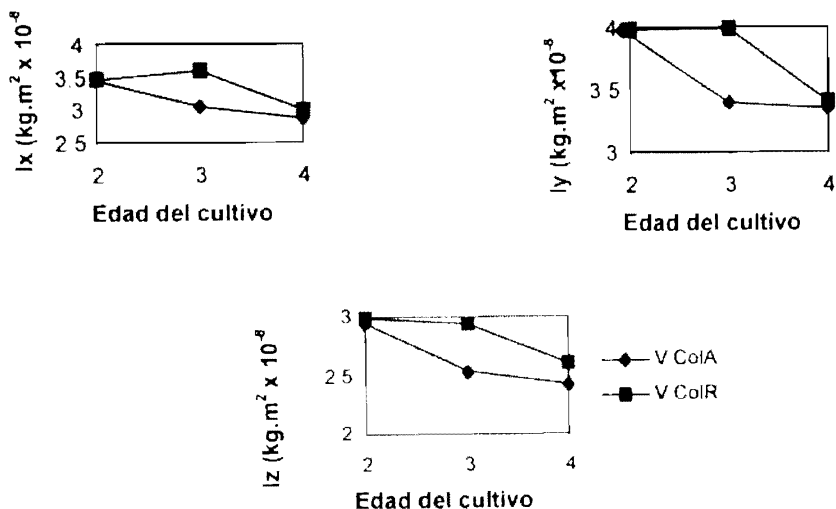


Figura 13. Comportamiento de la variable momento de inercia bajo la interacción variedad x edad de la planta.

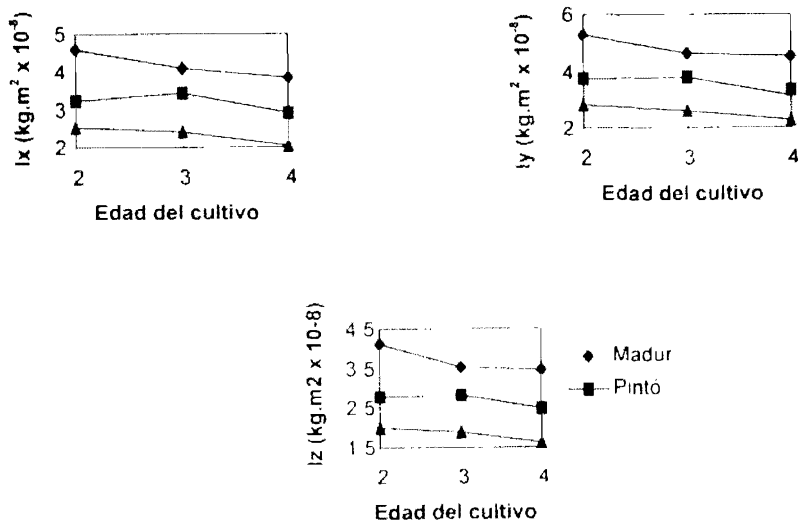


Figura 14. Comportamiento de la variable momento de inercia bajo la interacción edad x madurez.

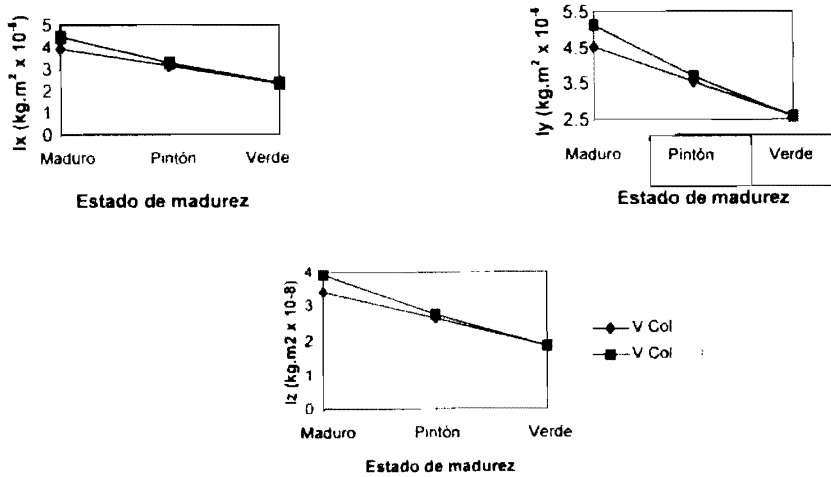


Figura 15. Comportamiento de la variable momento de inercia bajo la interacción variedad x madurez.

En la propiedad rigidez (EI), el análisis de varianza no mostró efecto de la interacción doble pero sí de las interacciones simples. Los mayores

valores de EI en la interacción edad x variedad se presentaron para la V.ColA en árboles de dos años de edad y para la V.ColR en las tres edades (Figura 16).

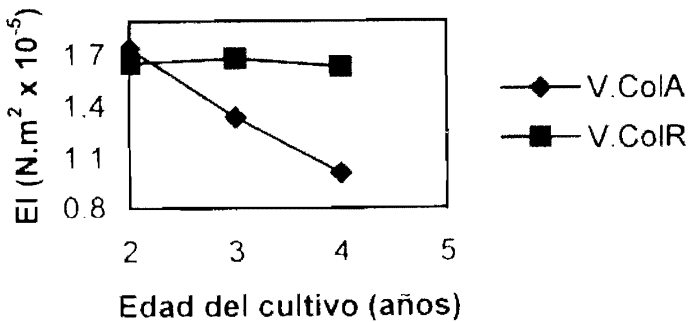


Figura 16. Comportamiento de la variable rigidez del pedúnculo "EI" bajo la interacción edad x variedad.

En la interacción variedad x madurez los menores valores de EI se presentaron en las dos variedades en el estado verde de los frutos y los mayores valores para los frutos maduros de V.ColR (Figura 17).

En la Figura 18, se puede observar que los menores valores de la variable rigidez bajo la interacción edad del árbol x estado de madurez del fruto se presentaron en el estado verde del fruto de las tres edades del cultivo; y el mayor valor se presentó en los frutos maduros de un árbol de dos años.

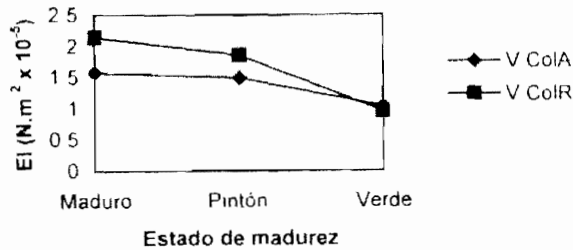


Figura 17. Comportamiento de la variable rigidez del pedúnculo “EI” bajo la interacción variedad x madurez.

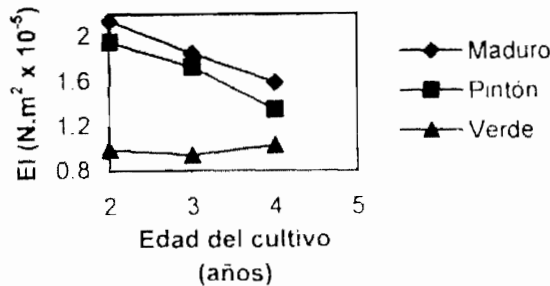


Figura 18. Comportamiento de la variable rigidez del pedúnculo “EI” bajo la interacción edad x madurez.

Este mayor valor de los frutos maduros es una característica negativa para la cosecha selectiva con la aplicación de vibraciones ya que aumenta la frecuencia natural del sistema fruto-pedúnculo, lo cual

contrasta con las ventajas encontradas en los momentos de inercia. Los mayores valores de fuerza de tracción F_t se presentaron en la V.ColA en el estado verde en árboles de tres años y en los estados verde y pintón en árboles

de cuatro años y los menores valores fueron para la V.ColR de los frutos

maduros en árboles de dos y tres años de edad (Figura 19).

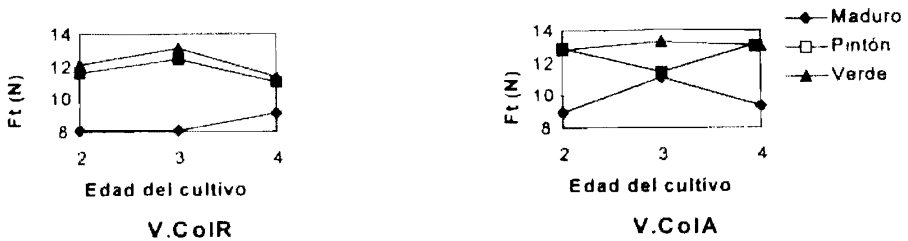


Figura 19. Comportamiento de la variable fuerza de tracción “Ft” bajo la interacción variedad x edad de la planta x estado de madurez.

Los valores obtenidos por Alvarez (1990) en variedad Colombia para la fuerza de tracción Ft, fueron ligeramente inferiores a los observados en el presente estudio, resultado que podría ser atribuido a factores climáticos y edáficos prevalentes en cada estudio.

Para la variable Momento torsor Mt el análisis de varianza no mostró efecto de la interacción doble, pero si mostró efecto en las interacciones simples variedad por edad y variedad por madurez como puede ser observado en las Figuras 20 y 21.

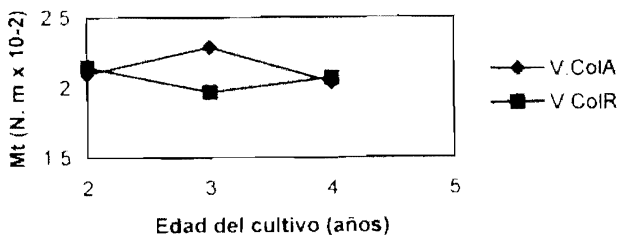


Figura 20. Comportamiento de la variable momento torsor “Mt” bajo la interacción variedad x edad.

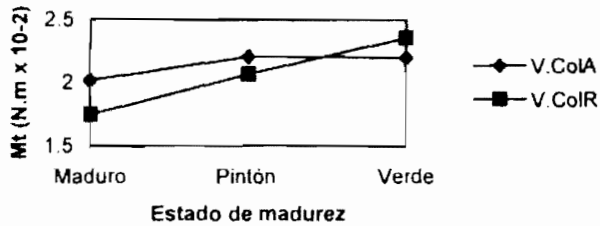


Figura 21. Comportamiento de la variable momento torsor “Mt” bajo la interacción variedad x madurez.

En la interacción variedad x edad de Mt el mayor valor se obtuvo en la V.ColA en árboles de tres años y el menor valor se obtuvo en la V.ColR en la misma edad del árbol. En la interacción variedad por madurez el valor mayor de Mt fue observado en los frutos verdes de V.ColR y el menor valor en los frutos maduros de la misma variedad, lo cual fue corroborado a través de la prueba de contraste al nivel del 5%. Resultado favorable, para lograr una cosecha selectiva con la aplicación

de los momentos torsores. En la V.ColA en el estado maduro de los frutos y en la V.ColR en los estados verde y pintón del fruto se presentaron los menores valores de momento flector de desprendimiento Mf (Figura 22). Lo anterior fue corroborado con la prueba de contraste al nivel del 5%. Desde el punto de vista de selectividad puede observarse un comportamiento desfavorable, ya que los menores valores fueron para los frutos maduros, pintones y verdes.

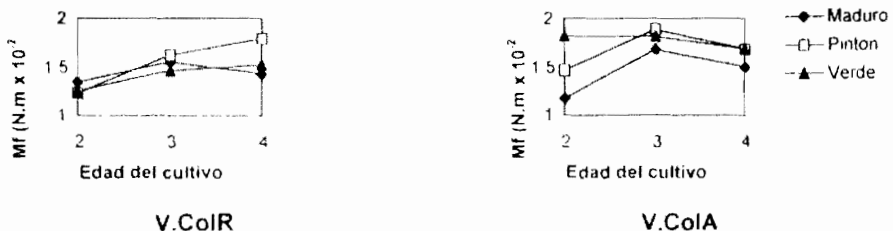


Figura 22. Comportamiento de la variable momento flector “Mf” bajo la interacción variedad x edad de la planta x estado de madurez.

Análisis Multivariado. El análisis de componentes principales mostró el siguiente orden de importancia en las variables de estudio, con respecto a la variación total:

Momento de inercia alrededor del eje x "Ix"
 Momento de inercia alrededor del eje z "Iz"
 Radio característico del fruto "R"
 Momento de inercia alrededor del eje y "Iy"
 Espesor del fruto "Ef"
 Peso del fruto "Pf"
 Ancho del fruto "Af"
 Rigidez del pedúnculo "El"
 Fuerza de tracción "Ft"
 Longitud del fruto "Lf"
 Momento torsor "Mt"
 Longitud del pedúnculo "Lp"
 Diámetro del pedúnculo "Dp"
 Momento flector "Mf"

En la Tabla 1, se ilustra la agrupación de los factores estudiados, a partir de la clasificación obtenida con el dendrograma y el análisis cluster y en la Tabla 2, se presentan los valores medios y coeficiente de variación para las variables físico-mecánicas, por grupo.

La prueba de comparación de Duncan, al nivel del 5%, mostró que los tres grupos fueron diferentes estadísticamente en las siguientes variables: R, Af, Ef, Lf, Pf, Iy, Ix e Iz. El mayor valor en las características dimensionales y en masa en los frutos maduros, es favorable para la aplicación de vibraciones, ya que el aumento de cualquiera de estas propiedades se ve reflejado en la disminución de las frecuencias de resonancia del S.F.P, previéndose diferencias entre los

diferentes estados de maduración. Lo cual se puede corroborar en los resultados encontrados por Ciro (1997) (Maduros: 1.506 cpm, pintones: 1.523,38 cpm y verdes: 1.618,35 cpm).

Los grupos dos y tres fueron iguales estadísticamente y a su vez diferentes del grupo uno en las siguientes variables Lp y Mf. Para Lp, al contrario del caso anterior esta mayor longitud mostrada por los grupos dos y tres no favorece la selectividad, ya que aumenta la frecuencia natural del S:F.P. Para Mf, no se esperaría lograr selectividad aplicando momento flectores en la unión fruto-pedúnculo.

El grupo uno y dos fueron iguales estadísticamente y a su vez diferentes del grupo tres en las siguientes variables Dp, Mt, Ft e El. La única característica desfavorable desde el punto de vista de selectividad es la mayor rigidez del pedúnculo.

Si se observa la agrupación de los tratamientos utilizando el análisis multivariado, en el grupo tres quedaron en las dos variedades en las edades del cultivo evaluadas en el estado maduro del fruto. De tal manera que en este grupo en promedio se presenta el mayor diámetro del pedúnculo y la mayor rigidez siendo diferentes estadísticamente de los otros dos grupos y se presenta el menor valor de momento torsor. Para las variables Dp, el análisis de la interacción (Figura 6), corrobora el resultado de la comparación de los grupos, es decir, en el estado maduro se presenta los mayores valores de Dp. Igual comportamiento fue observado para la variable El en el análisis de la interacción (Figura 15).

Tabla 1. Clasificación de los factores de variación según dendograma y cluster.

Grupo	Variedad	Edad del árbol	Estado de madurez
1	ColR	3	Pintón
		4	Pintón
	ColA	2	Verde
		3	Verde
2	ColR	3	Pintón
		4	Maduro
	ColA	2	Verde
		3	Pintón
3	ColR	2	Verde
		3	Verde
	ColA	2	Pintón
		4	Maduro
	ColR	2	Maduro
		3	Maduro
	ColA	2	Maduro
		4	Maduro

Tabla 2. Valor medio y coeficiente de variación para las variables físico-mecánicas según su peso para la conformación de grupos.

Grupo Variables	1		2		3	
	x	CV (%)	x	CV (%)	x	CV (%)
Ix (kg*m ² *10 ⁻⁸)	2.92	25.41	2.70	22.38	4.278	19.27
Iz (kg*m ² *10 ⁻⁸)	2.41	27.76	2.23	25.36	3.78	18.45
R (mm)	6.55	4.70	6.47	3.85	7.08	3.86
Iy (kg*m ² *10 ⁻⁸)	3.27	26.18	3.05	24.84	4.96	18.33
Ef (mm)	11.37	6.28	11.22	4.80	12.43	4.41
Pf (g)	1.40	16.19	1.34	15.81	1.83	10.99
Af (mm)	12.75	6.76	12.56	6.40	14.22	4.51
EI (N.m ² *10 ⁻³)	1.35	48.53	1.35	60.56	1.94	6.47
FT (N)	12.33	22.19	12.25	20.44	8.70	24.53
Lf (mm)	15.35	5.13	15.19	4.94	15.93	5.73
Mt (N*cm)	2.17	26.09	2.20	28.20	1.81	35.36
Lp (mm)	2.95	15.47	3.08	11.33	3.02	15.36
Dp (mm)	2.00	10.78	2.04	9.78	2.11	10.32
Mf (N*cm)	1.74	23.54	1.38	30.92	1.40	25.42

APLICACIÓN DE LOS RESULTADOS EN LA COSECHA MECÁNICA DEL CAFÉ

1. Las mayores dimensiones ortogonales del fruto (radio, ancho, longitud, espesor), el peso del fruto y los momentos de inercia (I_x , I_y , I_z), observados en los frutos maduros, son características favorables para la cosecha selectiva con la aplicación de vibraciones.
2. La menor longitud del pedúnculo de los frutos maduros es una característica desfavorable para lograr selectividad en la cosecha mecánica por aplicación de vibraciones.
3. La fuerza de tracción (F_t), necesaria para desprender el fruto de café, se constituye como el parámetro más importante a tener en cuenta en el diseño de dispositivos para la cosecha de café.
4. El momento flector aplicado a la unión fruto pedúnculo presenta desventajas para lograr selectividad en la implementación de la cosecha mecánica del café.

BIBLIOGRAFÍA

- ALVAREZ, Elizabeth. Estudio de las propiedades físico-mecánicas del sistema fruto pedúnculo del café variedad Colombia. Medellín, 1998, 112p. Trabajo de Grado (Ingeniería Agrícola). Universidad Nacional de Colombia. Facultad de Ciencias Agropecuarias
- ALVAREZ, Fernando. Cosecha mecánica de café en ladera Chinchiná. CENICAFÉ. Disciplina de Ingeniería Agrícola, 1993. (Informe de año Sabático)
- CIRO V., Hector. Estudio dinámico de la rama de café para el desarrollo de la cosecha mecánica por vibraciones. Medellín, 1997. 88 p. Trabajo de Grado (Ingeniero Agrícola). Universidad Nacional de Colombia. Facultad de Ciencias Agropecuarias
- CRISOSTO, CH and NAGAO, M.A. Evaluation of fruit removal force of coffee cultivars. *En: Hortscience*. Vol. 26, No. 2 (1991), p. 210
- MARTÍNEZ, Arturo. Reporte de investigaciones sobre cosecha mecanizada de café (parte 1). La Habana (Cuba): s.n., 1988. p. 29-39
- WANG, K. Jaw. Mechanical coffee harvestig (Part A). *En: Transactions of the ASAE*. Vol. 8, No. 3 (nov , 1965), p. 403-405
- WATSON, A. G. The mechanization of coffee production. *En: COI OQUE SCIENTIFIQUE INTERNATIONAL SUR LE CAFÉ*. (9: 1980: Londres). Paris: ASIC, 1980. P 681-686.
- WATSON, A G *et al.* Eficiência do derrçador e recolhedor de café pela colhedeira mecânica nas variedades Catuaí e Mundo Novo no estado de São Paulo. *En: CONGRESSO BRASILEIRO DE PESQUISAS CAFFEEIRAS*, (7º 1979: Araxá-M.G.) 1979. Resumos - SI - IBR. 1979. p.7-10.
- WINSTON, Ted *et al.* Coffee growing in Australia, a machine-harvesting perspective. Australia: Rebecca Lines-Kelly, 1995. 136 p.