

ESTUDIO DINAMICO BAJO OSCILACION FORZADA DEL SISTEMA FRUTO-PEDUNCULO (S.F.P) DEL CAFE VARIEDAD COLOMBIA

Héctor J. Ciro¹; Carlos E. Oliveros T.²;
Fernando Alvarez Mejía³

RESUMEN

En CENICAFE, Chinchiná, Caldas, se estudió la respuesta de las ramas de café variedad Colombia a la aplicación de vibraciones forzadas transversales, aplicadas en un sólo punto. Se vibraron ramas de café variedad Colombia a frecuencias de 1.500, 1.800, 2.000 y 2.200 cpm y, amplitudes de 0,5, 1,0 y 1,5 cm en puntos localizados a 1/3 y 1/2 de su longitud, durante 5 segundos. El mejor resultado (74% de desprendimiento de cerezas maduras y 30% de cerezas verdes en el café desprendido) se obtuvo vibrando las ramas a 1.500 c.p.m., amplitud de 1,5 cm y sujetándolas a 1/3 de su longitud.

Se determinaron propiedades físico-mecánicas a las cerezas verdes, pintonas y maduras (masa, densidad, radio característico, longitud y diámetro de pedúnculo, momento de inercia másico del fruto, rigidez, constante de elasticidad), de importancia para el estudio de la respuesta del sistema fruto pedúnculo (S.F.P.) a las vibraciones forzadas. Se observó que la constante de elasticidad, módulo de rigidez y el momento de inercia aumentan a medida que aumenta el grado de madurez de la cereza.

Con las propiedades físico-mecánicas antes mencionadas se implementó el modelo de grados de libertad propuesto por Martínez (1983) para estudiar la respuesta del S.F.P. a la aplicación de vibraciones forzadas. Los resultados obtenidos con este

¹ Ingeniero Agrícola. Disciplina de Ingeniería Agrícola CENICAFE.

² Investigador científico III. Disciplina de Ingeniería Agrícola CENICAFE.

³ Profesor Asociado. Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín. Apartado 1779.

modelo indican que las frecuencias naturales de resonancia del S.F.P. para frutos pintones y maduros son inferiores a las de las cerezas verdes, en el primero y segundo modos de vibración. Para cerezas maduras en el primer modo de vibración la frecuencia de resonancia varía de 1.500 a 1.530 c.p.m. En el segundo modo de vibración la frecuencia de resonancia de cerezas maduras es 28.000 c.p.m.

Palabras clave: *café, cosecha mecánica, vibración forzada, frecuencias de resonancia, propiedades mecánicas, fruto-pedúnculo, análisis modal.*

ABSTRACT

Response of branches of Colombian coffee variety subjected to transversal forced vibrations was studied at CENICAFE, Chinchiná, Caldas, considering four frequencies 1.500, 1.800, 2.000 y 2.200 cpm, three amplitudes 0,5, 1,0 y 1,5 cm. and one application point of vibration (1/3 and 1/2 of branch length) during five seconds. The best result (73% of detaching of ripe cherries present in the branch and 30% of green cherries in the coffee harvested) was achieved with a frequency of 1.500 c.p.m., 1,5 cm of amplitude and application point at 1/3 of branch length.

Physical and mechanical properties of importance for theoretical study of response of fruit-pedunculus-system (F.P.S) subjected to forced vibrations were measured: mass, density, characteristic radius, length and diameter of pedunculus, moment of mass inertia, elastic constant and stiffness of pedunculus. Increase of elastic constant and stiffness modulus of pedunculus when degree of maturity of cherries increases was noted.

Theoretical analysis of response of the F.P.S. subjected to forced vibration was done using physical and mechanical properties, cited above, and a two degree of freedom model for F.P.S proposed by Martínez (1983). Results obtained with this model indicate that frequencies of resonance for unripe and ripe cherries (red cherries) are lower than the value obtained for green cherries. For ripe cherries in the first vibration mode frequency of resonance ranges from 1.500 to 1.530 c.p.m. while in the second mode of vibration frequency of resonance is 28.000 c.p.m.

Key-words: *coffee, mechanical harvesting, forced vibration, frequency of resonance, mechanical properties, stem-fruit, modal analysis.*

INTRODUCCION

La cosecha selectiva de café empleada en Colombia, granos maduros principalmente, es importante para obtener la alta calidad reconocida mundialmente. Para lograrlo, se requiere retirar una a una las cerezas maduras localizadas en diferentes partes del árbol, por lo cual el rendimiento de la actividad no es alto y dependiendo del tamaño de la plantación, se necesita de abundante mano de obra. Los costos de recolección dependen entre otros factores de: la productividad del cafetal, su estado, la estructura existente de la finca, la topografía, la oferta de mano de obra y principalmente del precio del café y del salario mínimo existente. Los costos de recolección de café actualmente en Colombia representan el 32,7% del valor de la venta del grano y del 40% de los costos totales de producción.

La mecanización de la recolección ha sido importante en otros cultivos para reducir los costos de producción. En el caso del café en Colombia, las condiciones topográficas, el alto número de floraciones que ocasionan desuniformidad en la floración, las condiciones climáticas en la época de recolección lluviosas y la alta calidad exigida en la recolección

dificultan, en el caso de que se pueda dar la inversión, el uso de tecnologías actualmente utilizadas en otros países.

Los equipos utilizados comercialmente para la recolección del café están basados en la aplicación de vibraciones al follaje. Para mejorar su selectividad es necesario conocer la respuesta a las vibraciones de las diferentes partes del árbol comprometidas, principalmente del sistema fruto-pedúnculo(S.F.P). Los resultados obtenidos a nivel de laboratorio y de campo en Hawai y en Cuba indican la necesidad de estudiar para cada variedad cultivada en cada país la respuesta del S.F.P. En este trabajo se presentan los resultados teóricos y experimentales de la respuesta dinámica de la ramas de café variedad Colombia a la aplicación en un solo punto de vibraciones forzadas transversales.

REVISION DE LITERATURA

Son varios los autores que han estudiado las vibraciones mecánicas como medio de recolección. Varias teorías se han conformado para explicar el mecanismo que origina el desprendimiento del fruto de la rama del árbol. Los análisis están dirigidos principalmente a estudiar y modelar el comportamiento dinámico

del sistema fruto-pedúnculo (S.F.P).

Phillips (1967), Cooke (1972) y Tsatsarelis (1987) sugieren que el objetivo principal que se pretende con la aplicación a las ramas es lograr que el sistema fruto-pedúnculo (S.F.P) alcance su frecuencia natural o de resonancia, teniendo la posibilidad el fruto de desprenderse de la rama. Los mismos autores comentan que posiblemente con una adecuada aplicación de las vibraciones a las ramas se logran obtener unas fuerzas inerciales superiores a las fuerzas que retienen al fruto.

Gunkel (1975) y Lorenze (1965), afirman que el fruto puede ser separado de la rama por fuerzas de vibración que son transmitidas a lo largo de ella, las cuales son función de la frecuencia aplicada, del desplazamiento, aceleración en varios puntos a lo largo de la rama y el punto de aplicación de la fuerza externa.

Shellenberger (1967) y Diener (1973) indican que el desprendimiento del fruto de la rama se debe a la fatiga creada por los ciclos repetitivos. Martínez (1988) analizando las frecuencias de resonancia del S.F.P a través de un modelo de dos grados de libertad encontró que el momento flector

originado en la unión fruto-pedúnculo tiene una gran incidencia en el desprendimiento del fruto de café.

Alvarez (1993) y Wang (1965) encontraron que la relación entre la fuerza para desprender el fruto del café a su peso (F/W), disminuye a medida que se incrementa la maduración de la cereza de café, dando la posibilidad de conseguir selectividad mediante vibraciones. El primer autor en investigaciones adelantadas en CENICAFE, encontró que para un mismo estado de maduración la relación F/W es mayor para la Variedad Colombia que para la caturra.

Según Yung y Fridley (1975), para frutas tales como el café, la frecuencia de resonancia del S.F.P es un importante criterio para seleccionar la frecuencia de vibradores, ya que en esta etapa los esfuerzos internos inducidos por la vibración son muy grandes.

Wang (1965) encontró por medio de un modelo de un solo grado de libertad que la frecuencia de resonancia para el S.F.P del café maduro está entre el rango de 1.100 a 3.300 c.p.m. Monroe y Wang (1968) comentan que con una frecuencia de 1.500.c.p.m. es posible desprender el fruto del café

en forma selectiva.

Martínez (1988) y Martínez *et al* (1989), analizando la dinámica oscilatoria del S.F.P a través de un modelo de dos grados de libertad encontró frecuencias de resonancia para el café Variedad Caturra rojo en el primer modo de vibración alrededor de los 1.750 c.p.m. El mismo autor encontró vibrando ramas de café con la frecuencia de resonancia del S.F.P y una amplitud de 1 cm, desprendimientos DE alrededor del 85% de los frutos maduros presentes en la rama.

Según Miller y Morrow (1976), el desprendimiento del fruto de la rama sin pedúnculo se debe a las altas

frecuencias aplicadas y con pedúnculo a la aparición de bajas frecuencias en el S.F.P.

MODELAMIENTO DEL S.F.P

MODELO DE UN SOLO GRADO DE LIBERTAD:

De acuerdo a Wang (1965) y Tsatsarelis (1987), el sistema fruto-pedúnculo se asimila a una viga en voladizo de longitud L , en donde un extremo se encuentra empotrado y el otro extremo se encuentra cargado con una fuerza puntual que representa el peso del fruto y origina la deformación X , como se muestra en la Figura 1.

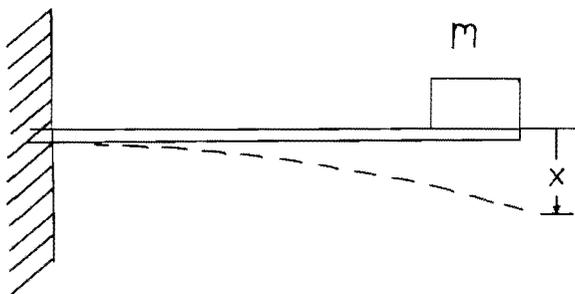


Figura 1. Modelo de viga en voladizo para el sistema fruto-pedúnculo.

Considerando para efectos de análisis de vibración, que la estructura anterior no es sometida a fuerzas externas y que presenta características elásticas y no de amortiguamiento, a través de la segunda ley de movimiento de Newton se llega a la siguiente expresión para la frecuencia natural:

$$F_n = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k}{m}} \quad (1)$$

$$k = \frac{3EI}{L^3} \quad (2)$$

En donde:

F_n : Frecuencia natural o de resonancia del S.F.P. c.p.s

m : Masa de la cereza de café. kg

EI : Rigidez del pedúnculo. $N \cdot m^2$

L : Longitud del pedúnculo. m

K : Constante elástica del pedúnculo.

N / m

MODELO DE DOS GRADOS DE LIBERTAD PROPUESTO POR MARTINEZ.

Martínez (1983, 1988) propone un modelo considerando las propiedades elásticas del pedúnculo y el momento de inercia del fruto con respecto a un eje vertical que pasa

por la unión pedúnculo-fruto. El pedúnculo lo considera cilíndrico y la unión del pedúnculo, tanto del fruto como a la rama se considera rígida. Considera la masa del fruto, así como el momento de inercia y sus dimensiones. La masa del pedúnculo se desprecia y el sistema se considera sin amortiguamiento. Este modelo (Figura 2), define las frecuencias de resonancia y los modos de vibración del fruto.

En la Figura 2, las coordenadas que describen el movimiento del fruto en el plano son Y y ϕ , la diferencia entre $Y - X$ que es igual a d , representa el desplazamiento que sufre el fruto debido a la vibración con respecto a la unión rama-pedúnculo, ϕ representa el ángulo de rotación del fruto con respecto a una vertical que pasa por la unión fruto-pedúnculo, M es el momento flector originado en la unión fruto-pedúnculo debido a las oscilaciones, P y N son las fuerzas que producen la flexión del pedúnculo y la fuerza normal respectivamente. Las dos fuerzas actúan en la unión fruto-pedúnculo. La rigidez del pedúnculo es representada por EI , I_0 es el momento de inercia másico del fruto con respecto a un eje que pasa por la unión fruto-pedúnculo. L es la longitud del pedúnculo, mg es el peso del fruto y r es su radio.

normal actuando en la misma zona N, en función de la amplitud y frecuencia externa de aplicación sobre las ramas.

$$\phi_{(iw)} = w^2 \frac{D}{C} * \frac{x(iw)}{k(iw)} \quad (3)$$

$$\delta_{(iw)} = \left(\frac{w^2}{A} - w^4 \frac{1-BD}{AC} \right) * \frac{x(iw)}{k(iw)} \quad (4)$$

$$M_{(iw)} = \left(w^4 \frac{(I_p D - mr)}{C} + w^2 mr \right) * \frac{x(iw)}{k(iw)} \quad (5)$$

$$N_{(iw)} - mg = \left(mr w^2 \left(w^2 \frac{D}{C} \right)^2 \right) * \frac{x(iw)}{k(iw)} \quad (6)$$

$$K(iw) = w^4 \frac{(1-BD)}{AC} - w^2 \frac{(A+C)}{AC} - 1 \quad (7)$$

$$I_0 = I_g + mr^2 \quad (8)$$

A, B, C y D son constantes que dependen de las propiedades del sistema fruto-pedúnculo, tales como longitud y rigidez del pedúnculo, radio y masa del fruto, I_g es el

momento de inercia del fruto con respecto al su centroide, $x(iw)$ es la amplitud de aplicación sobre las ramas y w es la frecuencia de excitación externa.

Las expresiones anteriores definidas por unidad de amplitud aplicadas a la rama son las siguientes:

$$\beta_\phi = \frac{\phi(iw)}{x(iw)} \quad (9)$$

$$\beta_m = \frac{M(iw)}{x(iw)} \quad (10)$$

$$\beta_\delta = \frac{\delta(iw)}{x(iw)} \quad (11)$$

$$\beta_N = \frac{N(iw) - mg}{x(iw)} \quad (12)$$

β_ϕ , β_m , β_δ y β_N , son los valores unitarios de el ángulo de giro del fruto, el momento flector el desplazamiento del fruto y la fuerza normal, en función de la amplitud y frecuencia impuesta a las ramas.

MATERIALES Y METODOS

El trabajo de investigación fue realizado en el laboratorio para cosecha de café ubicado en

CENICAFE, municipio de Chinchiná (Caldas), a una altitud de 1.310 msn.m, temperatura promedio de 20,6°C y humedad relativa promedio de 75%.

Las fases desarrolladas en la investigación fueron: la caracterización de las propiedades físicas del sistema fruto-pedúnculo, la aplicación de los modelos teóricos y la construcción de un vibrador que aplicó vibraciones unidireccionales a las ramas de café.

Caracterización física del sistema fruto-pedúnculo y aplicación de los modelos teóricos.

Del café variedad Colombia cosechado de la sub estación Naranjal se tomaron 400 frutos maduros, 400 frutos verdes y 400 frutos pintones, y a cada uno se le midió: la masa (m), las dimensiones ortogonales (diámetro mayor, diámetro medio y el diámetro menor) y la densidad real. La longitud (L_p) y diámetro (ϕ_p) del pedúnculo se midieron con un calibrador digital, seleccionando 800 pedúnculos para cada grado de maduración.

Con la dimensiones ortogonales de los granos, en cada estado de maduración citado, se estimó su radio característico (R^*) con las siguientes expresiones:

$$R^* = \frac{d^*}{2} \tag{13}$$

$$d^* = \frac{F_1 + F_2 + F_3 + F_4}{4} \tag{14}$$

$$F_1 = \sqrt{\frac{\phi_1 * \phi_2 + \phi_2 * \phi_3 + \phi_1 * \phi_3}{3}} \tag{15}$$

$$F_3 = \frac{\phi_1 + \phi_2 + \phi_3}{3} \tag{16}$$

$$F_2 = (\phi_1 * \phi_2 * \phi_3)^{\frac{1}{3}} \tag{17}$$

$$F_4 = \sqrt{\frac{6 * V}{\Pi}} \tag{18}$$

En donde:

ϕ_1 : Diámetro mayor de la cereza de café

ϕ_2 : Diámetro medio de la cereza de café.

ϕ_3 : Diámetro menor de la cereza de café.

F_1, F_2, F_3 : Diámetros lineales.

F_4 : Diámetro equivalente calculado por el principio de Arquímedes.

d^* y R^* : Diámetro y radio característico.

V : Es el volumen desalojado por la cereza de café por el principio de

Arquímedes.

La determinación del momento de inercia máscico de la cereza de café el cual sirvió para determinar el valor de la frecuencia natural del sistema fruto-pedúnculo por medio del modelo físico de dos grados de libertad, se hizo mediante la ayuda del programa AUTO-CAD, con las dimensiones ortogonales y densidad real promedio de los granos de café, de acuerdo con su estado de maduración.

La densidad real de la cereza de café, se determinó mediante la aplicación del principio de Arquimidez, midiendo la fuerza de empuje al sumergir una cereza en agua destilada, la densidad del agua y la masa de la cereza de café (Ciro 1997).

Con la información obtenida, de las diferentes propiedades físicas del sistema fruto-pedúnculo, se hizo un análisis de varianza de una sola vía, para evaluar el efecto del grado de madurez. En el caso de existir efecto, fue aplicada la prueba de Tukey al 5%, para la comparación de los promedios.

Con el propósito de encontrar el valor de la frecuencia natural o de resonancia, fueron utilizados los modelos físicos de uno y dos grados de libertad, determinando la rigidez del pedúnculo de café de la siguiente forma: Asumiendo que el pedúnculo de café se comporta como una viga en voladizo, se determinó la deformación del eje neutro⁴ de la viga (pedúnculo) en el extremo utilizando un LVDT conectado a una fuente de voltaje A.C. (3 V y 2.500 Hz), la cual amplificó y demoduló la señal proveniente del desplazamiento de un núcleo << CORE >> ocasionado por la deformación. Además se midió la masa del fruto y la longitud del pedúnculo. El equipo estaba conectado a un multímetro, en el cual se registró el voltaje amplificado en milivoltios (m.v). El voltaje real originado en el núcleo del L.V.D.T se obtuvo dividiendo el voltaje leído en el multímetro por el factor de amplificación del demodulador. Se realizaron un total de 120 ensayos para cada estado de madurez. Ver Figura 3.

Las cargas puntuales (P), las cuales originaban la deformación (δ), se

⁴ Es el eje de una sección transversal de un elemento prismático que contiene al plano neutro en el cual todos sus elementos sufren una deformación y esfuerzo nulos.

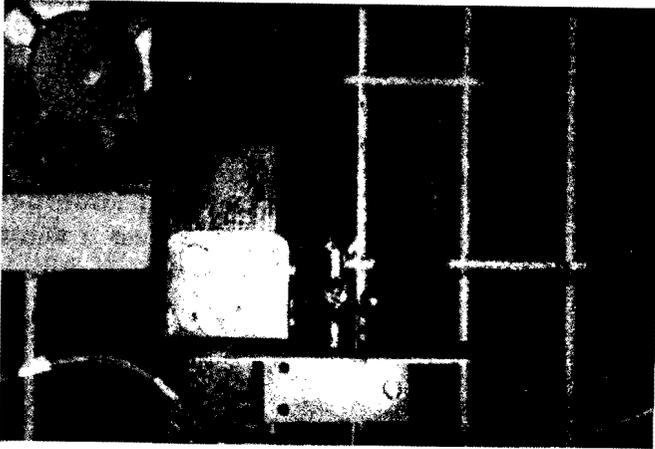


Figura 3. Dispositivo experimental construido para determinar las deflexiones del pedúnculo.

obtuvieron de pequeños trozos de acero de peso conocido ($1g$) sujetos al extremo del pedúnculo por medio de un hilo de peso despreciable. Con los valores de P y δ para los estados de madurez, se construyó la gráfica P vs. δ . De la parte lineal de la curva a través de un modelo lineal simple se obtuvo la pendiente, la cual correspondió a la

elasticidad promedio K del pedúnculo. Una vez obtenido el valor de K y la longitud del pedúnculo, su rigidez (EI) se obtuvo de la siguiente manera:

$$EI = \frac{K * L^3}{3} \quad (19)$$

Una vez obtenidos los valores de la frecuencia natural para cada uno de

los estados de madurez de los frutos se procedió a aplicar un análisis de varianza de una sola vía, para evaluar el efecto del grado de madurez. En el caso de existir efecto, se procedió a comparar los promedios a través de una prueba Tukey al 5 %.

Obtenido de forma teórica el valor de la frecuencia natural del sistema fruto-pedúnculo se procedió a verificarla experimentalmente. Para

esto se construyó un dispositivo mecánico compuesto de: excéntrica, motor eléctrico, variador de frecuencia, biela, prensa, transmisión de cadenas por rodillos y un contra-eje.

En el contra-eje del dispositivo experimental mostrado en la Figura (4), se instaló una polea que permitió excentricidades de 0,5, 1,0 y 1,5 cm acoplada a una manivela de 1 m de longitud la cual produjo

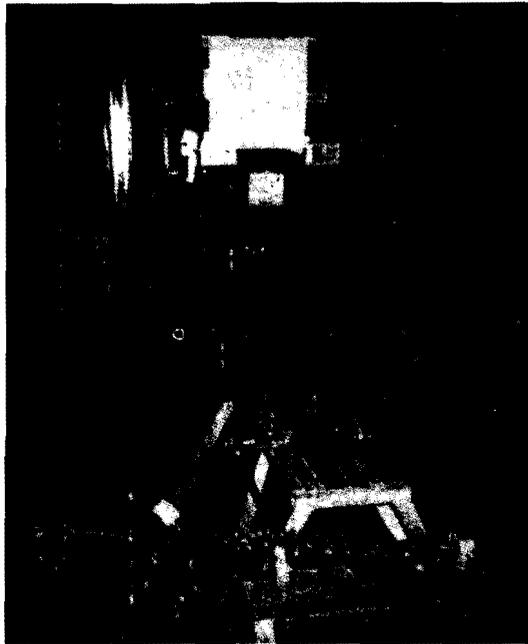


Figura 4. Vibrador unidireccinal para vibrar ramas de café.

el movimiento rectilíneo alternativo. En el extremo de la manivela fue acoplado un mecanismo de agarre para sujetar la rama. La amplitud de vibración quedó determinada por la excentricidad y la velocidad de rotación del motor se fijó mediante un variador de frecuencia. La velocidad de rotación del contra-eje (F_N : 1.800, 2.000, 2.200 c.p.m) quedó determinada por la relación de transmisión y se midió con un tacómetro. F_N es una de las frecuencias naturales para el primer modo de vibración de los modelos teóricos propuestos para el fruto maduro.

El prototipo fue evaluado durante tres ciclos diferentes de la cosecha (Inicio, mitad y final), con tres amplitudes, cuatro frecuencias de vibración y dos puntos de aplicación.

De la Subestación Naranjal se tomaron 168 ramas con frutos para cada estado de la cosecha, de café variedad Colombia escogidas de forma aleatoria de la zona productiva de diferentes árboles, éstas se llevaron al laboratorio de cosecha mecánica para ser vibradas. Las ramas se fijaron a una prensa mecánica que simuló la unión tronco-rama al restringir el movimiento en el punto de unión con relación a los ejes X, Y y Z,

para ser vibradas a 1 / 2 y 1 / 3 de su longitud (punto de aplicación) con un tiempo de vibración de 5 s. Después de efectuar la vibración se procedió a contar los frutos de café maduros, verdes y pintones que quedaron en la rama y los que fueron desprendidos. Los porcentajes de desprendimiento se determinaron como:

$$PD_{ij} = \frac{ND_{ij}}{ND_{ij} + NND_{ij}} * 100 \quad (20)$$

En donde

ij : Grado de madurez (i = maduro, verde y pintón) en la rama j

PD: Porcentaje de desprendimiento

ND: Número de frutos desprendidos

NND: Número de frutos no desprendidos

El porcentaje de frutos verdes en la masa cosechada, se determinó como:

$$PVM = \frac{NDV}{ND} * 100 \quad (21)$$

PVM: Porcentaje de frutos verdes

NDV: Número de frutos verdes desprendidos

ND: Número de frutos totales desprendidos (maduros+verdes + pintones).

El porcentaje de defoliación de calculó como:

$$PDF = \frac{NDH}{NHT} * 100 \quad (22)$$

PDF: Porcentaje de defoliación

NDH: Número de hojas de la rama desprendidas por vibración,

NHT: Número de hojas totales en la rama antes de la vibración

El efecto de los tratamientos se evaluó bajo un modelo de Análisis de Varianza de una sola vía con arreglo factorial 4 x 3 x 2 (3 amplitudes, 4 frecuencias y 2 puntos de aplicación a L/2 y L/3 sobre la longitud de la rama), en la variable respuesta proporción de frutos maduros, verdes y pintones desprendidos y porcentaje de defoliación. La unidad experimental fue la rama con frutos de café y por tratamiento se obtuvieron 7 unidades experimentales.

En el caso de que las interacciones fueran significativas se tomó la mejor combinación en cuanto a mayor porcentaje de desprendimiento de frutos maduros con un mínimo desprendimiento de frutos verdes y hojas. En el caso que las interacciones no sean significativas, sería tomado el valor de la

frecuencia de mil ochocientos cpm, amplitud de 1 cm y un punto de aplicación en la parte media de la longitud de la rama.

Para determinar si el desprendimiento del fruto se debe a la presencia del momento flector que se origina en la unión fruto pedúnculo, se tomaron 40 ramas con frutos, a cada una de ellas se les aplicó el valor de la frecuencia, amplitud y punto de aplicación correspondientes al mejor tratamiento encontrado en la evaluación del prototipo. Para el momento flector estimado en función de la frecuencia y la amplitud, se tomaron la proporción de frutos maduros desprendidos con o sin pedúnculo. Si la proporción media de frutos desprendidos con pedúnculo fue menor estadísticamente que la proporción de frutos desprendidos sin pedúnculos (prueba T al 5 %), entonces se estaría aceptando que el desprendimiento del fruto se debe al momento flector.

RESULTADOS Y DISCUSION

Propiedades físicas del S.F.P café variedad Colombia. Para cada grado de madurez del café cereza en la Tabla 1, se muestran los promedios y la variabilidad de las propiedades físicas medidas al

sistema fruto- pedúnculo. La masa del fruto, la longitud y diámetro del pedúnculo presentan la más alta variación entre las variables medidas (mayor del 14%) mientras que la densidad representó la variable con menor variación (menor del 3%). Estas diferencias en las características físicas del sistema fruto-pedúnculo, hace prever bajo un ana-

lisis teórico diferencias dinámicas(frecuencias de resonancia) para cada estado de madurez. El análisis de varianza (ANAVA) mostró que hay diferencias estadísticas para la masa, densidad y radio característico (R*) del fruto de café como en el diámetro del pedúnculo, pero no en la variable longitud del pedúnculo.

Tabla 1. Valores promedios de las propiedades físicas del sistema fruto pedúnculo del café

Cereza Madura	C. V. %	Media X	Cereza Píntón	C. V. %	Media X	Cereza Verde	C. V. %	Media X
Masa. gr	19,70	1,84 ^A	Masa. gr	18,04	1,77 ^A	Masa. gr	16,02	1,33 ^B
Densidad (gr / c.c)	1,98	1,075 ^A	Densidad (gr / c.c)	1,415	1,07 ^B	Densidad (gr / c.c)	2,285	1,07 ^B
R*(mm)	6,75	7,18 ^A	R*(mm)	6,83	7,43 ^B	R*(mm)	6,15	6,79 ^C
L _p (mm)	14,86	4,19 ^A	L _p (mm)	14,20	4,21 ^A	L _p (mm)	13,75	4,21 ^A
φ _p (mm)	14,99	2,05 ^A	φ _p (mm)	16,43	1,85 ^B	φ _p (mm)	14,72	1,90 ^C

** Promedios con la misma letra son estadísticamente iguales. Tukey 5%.

En la Tabla 2, se muestran los resultados del momento de inercia máxico obtenidos para los frutos de café de acuerdo a su estado de madurez a partir de los valores promedios de la masa y las dimensiones ortogonales. De acuerdo a éstos valores la cereza verde presenta menor resistencia a rotar alrededor del eje centroidal que

las maduras y píntonas, lo cual hace que su frecuencia de resonancia sea más alta. Debido a que los valores del momento de inercia para los frutos maduros y píntones son superiores a los verdes en más de un 30% , se espera teóricamente que el valor de su frecuencia natural sea inferiores a la del verde.

Tabla 2. Valores del momento de inercia másico para la cereza de café, según su estado de maduración.

Estado	I_x (Kg m ² *10 ⁻⁸)	I_y (Kg m ² *10 ⁻⁸)	I_z (Kg m ² *10 ⁻⁸)	Teórico (Kg m ² *10 ⁻⁸)
Maduro	4,9464	6,3627	5,9657	3.790
Pintón	4,7215	6,3065	6,1015	3.914
Verde	3,1860	4,6020	4,2294	2.493

I_x : Inercia alrededor del eje x. I_y : Inercia alrededor del eje y. I_z : Inercia alrededor del eje z.

** Para los momentos de inercia calculados por computador por medio del programa AUTOCAD, los diámetros mayor, menor y medio están dirigidos en la dirección X, Y, Z respectivamente.

Los valores teóricos de las frecuencias de resonancia para los frutos maduros, pintones y verdes, su constante de elasticidad (K) y el módulo de rigidez (EI) para el pedúnculo obtenidos experimentalmente se presentan en la Tabla 3. El análisis de varianza (ANAVA) realizado para cada variable, mostró diferencias estadísticas al 5%. La constante de elasticidad y el módulo de rigidez se incrementan a medida que aumenta el grado de madurez del fruto. Esto indica que el pedúnculo en su estado de madurez rojo presenta más resistencia a deformarse que cuando los frutos están verdes y pintones, lo cual no contribuye a conseguir selectividades completas mediante la cosecha por vibración. Los coeficientes de

variación (C.V), para los módulos de rigidez oscilaron alrededor del 28%.

Se observó que el valor de la frecuencia natural disminuye a medida que aumenta el grado de madurez, lo cual se esperaba de acuerdo a los resultados obtenidos con las propiedades físicas y momentos de inercia. Esta disminución en la frecuencia de resonancia se puede atribuir al hecho de que los frutos maduros y pintones presentan en promedio un valor superior de inercia, masa y radio característico con respecto al fruto verde. Un incremento en estos valores tienden a disminuir este valor.

Tabla 3. Constantes dinámicas y análisis modal del sistema fruto-pedúnculo (S.F.P) para el fruto de café Variedad Colombia.

Fruto	K (N / m)	EI (N* m ²)	F _{FP Máx} c.p.m	F _{FP Mín} c.p.m	F ₁ c.p.m	F ₂ c.p.m
Maduro	1.321.34 ^A	1.960* 10 ^{1A}	7.702.1 ^A	1.453.4 ^A	1.506 ^A	28.257.07 ^A
Pintón	1.268.26 ^B	1.76* 10 ^{1B}	8.891.7 ^B	1.580.8 ^A	1.523.38 ^A	29.035.33 ^A
Verde	962.55 ^C	1.478* 10 ^{1C}	8.575.5 ^B	1.732.9 ^B	1.618.35 ^B	31.127.60 ^B

** Valores con la misma letra para una misma variable son estadísticamente iguales (prueba Tukey al 5%).

En el modelo de un grado de libertad se idealizó el sistema fruto - pedúnculo como una viga en voladizo. En este modelo el sistema fruto pedúnculo se representó como una viga empotrada en un extremo y en el otro con una carga concentrada que representa la masa del fruto. Se calculó la frecuencia máxima ($F_{FP Máx}$), considerando que el centro de gravedad del fruto estaba a una distancia L (longitud del pedúnculo) y para la frecuencia mínima ($F_{FP Mín}$) el centro de gravedad se consideró a una distancia (L + R*) siendo R*, el llamado radio característico de la cereza de café, cuyo valor se calculó con las dimensiones ortogonales del fruto y con expresiones teóricas que relacionan las tres dimensiones 9ortogonales. Los valores de la frecuencia pertinentes al modo 1 y modo 2, fueron obtenidos conside-

rando el modelo propuesto por Martínez (1983).

No se observó diferencias estadísticas entre las frecuencias naturales para los frutos maduros y pintones, pero si entre estos y los verdes.

Los valores de la frecuencias naturales para el primer modo de vibración (F_{1PMIN} y F_1) presentadas en la Tabla 3 muestran diferencias escasas, lo cual permite prever el desprendimiento de cerezas pintonas y cerezas (selectividad incompleta), cuando se vibre el sistema fruto-pedúnculo en el primer modo de vibración del fruto maduro.

En el segundo modo de vibración, correspondiente a la variable F_2 , se puede apreciar que posiblemente

estas sean las frecuencias óptimas para lograr una buena selectividad, ya que las diferencias de frecuencias entre los estados de madurez se amplían (diferencias por encima de 2.200 c.p.m), lo que hace que las bandas de resonancia sean mucho más amplias comparadas con las bandas de resonancia del primer mo-

do de vibración.

En la Figura 5, se presenta las bandas de resonancia del sistema fruto-pedúnculo para cada estado de maduración del fruto; se observa que el rango de frecuencia de 1.500 - 9.000 c.p.m. hay interferencias de las bandas de frecuencias, lo

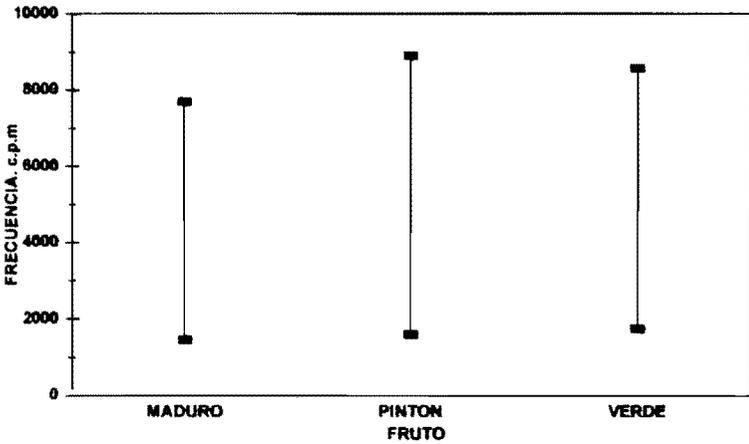


Figura 5. Bandas de resonancia para el modelo de un solo grado de libertad.

cual teóricamente se traduce en una baja selectividad en la cosecha mecánica por vibración.

La respuesta dinámica del sistema fruto-pedúnculo en las variables momento flector y desplazamiento en el punto de unión fruto-pedúnculo

para café Variedad Colombia calculados a través del modelo de dos grados de libertad propuesto por Martínez, es presentada en las Figuras 6 y 7. Se aprecia la banda estrecha de resonancia para los estados de madurez maduro, pintón y verde, resultado similar al encon-

trado para la banda resonante del modelo de un solo grado de libertad. Los picos máximos indican

zonas de resonancia y los valores en los cuales se producen corresponden a la frecuencia natural.

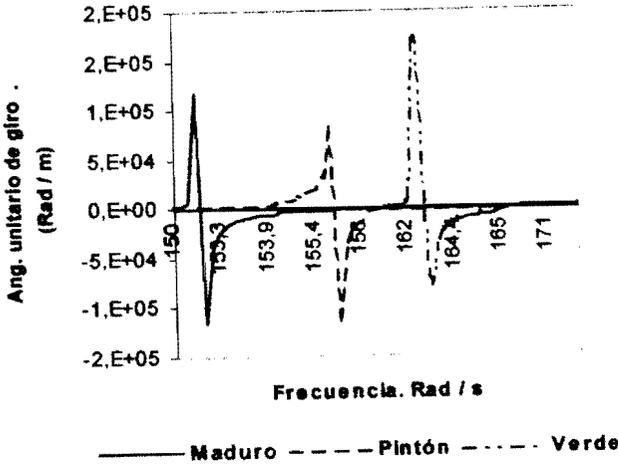


Figura 6. Rotación unitaria del S.F.P.(sistema fruto-pedúnculo).

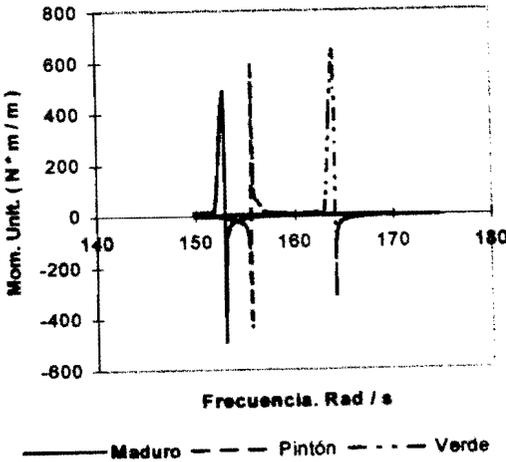


Figura 7. Momento unitario del S.F.P. según la amplitud y frecuencia de excitación

Efecto de la vibración en las ramas de café.

Para evaluar el efecto de las vibraciones unidireccionales en el desprendimiento de café y corroborar los resultados teóricos de las frecuencias de resonancias para el primer modo de vibración, se diseñó y construyó un vibrador mecánico tipo unidireccional, el cual permitió obtener vibraciones con frecuencias entre 0-2.500 r.p.m y amplitudes de 0,5 cm. hasta 1,5 cm y variar el punto de aplicación sobre la longitud de la rama. El efecto de la vibración se midió sobre las variables respuestas: porcentaje de desprendimiento de frutos maduros (PDM), pintones (PDP) y verdes (PVM) así como en el grado de defoliación (PDF). Las vibraciones fueron ejecutadas a inicio, final y mitad de cosecha vibrando en cada ciclo 168 ramas correspondientes a 24 tratamientos con siete (7) replicaciones. El tiempo de vibración por rama fue de 5 s.

En la Tabla 4, se muestran los resultados obtenidos durante la vibración para los tres ciclos de cosecha. El análisis de varianza (ANAVA) mostró diferencias significativas al 5% para una misma variable en un mismo ciclo de la

cosecha. Se observa como bajas amplitudes de vibración se traducen en bajos desprendimientos de frutos aunque las frecuencias excesivamente altas (por encima de 1.800 c.p.m en el rango estudiado). Este hecho indica que para lograr un desprendimiento aceptable de frutos maduros para Café Variedad Colombia utilizando frecuencias que no sobrepasen los 2.000 c.p.m, la amplitud aplicada directamente sobre la longitud de las ramas debe estar comprendida entre los 1,0 y 1,5 cm, amplitudes mayores afectan enormemente la selectividad de la cosecha mediante vibración.

El análisis estadístico realizado sobre el tratamiento cinco (5), donde se logró desprender alrededor del 90% de los frutos maduros aplicando la vibración en la parte media de la rama indicaron que no es posible desprender más del 90 % de los frutos maduros aplicando la vibración en la parte media de la rama bajo las condiciones de maduración existente en la zona cafetera colombiana y los parámetros establecidos de esta investigación (rango de frecuencias entre los 1.000 y 2.200 c.p.m, amplitud entre 0,5 y 1,5 cm y un tiempo de aplicación de las vibraciones de 5 segundos).

Tabla 4. Efecto de la vibración en el desprendimiento del fruto de café en el ciclo inicial (1), mitad (2) y final (3) de la cosecha.

Tratamiento	PDM1	PDM2	PDM3	PDPI	PDP2	PDP3	PDV1	PDV2	PDV3	PVMI	PVM2	PVM3	PDF1	PDF2	PDF3
1	22,77	16,31	27,84	4,51	24,07	5,25	3,07	1,95	3,73	12,23	7,27	16,65	0,39	4,32	0
2	12,55	18,88	23,02	0,71	27,55	5,22	1,48	5,62	0,83	21,43	13,28	4,87	0	0	0
3	49,34	60,43	80,16	41,46	55,95	60,41	45,06	28,12	45,52	58,72	24,14	31,94	6,0	0	12,94
4	53,27	60,91	67,16	43,51	49,65	47,83	23,71	26,16	33,04	47,85	24,74	35,31	1,49	0	2,22
5	92,04	72,76	91,66	82,75	79,60	88,16	67,18	70,92	60,39	51,48	37,29	37,49	15,83	1,44	3,32
6	82,25	73,18	90,31	78,65	41,73	95,92	56,89	44,11	78,61	39,67	34,83	50,03	5,31	3,22	3,24
7	24,84	17,11	36,06	26,19	9,92	8,82	10,48	3,75	7,99	44,86	16,21	15,50	3,21	0	3,51
8	23,59	22,83	32,81	32,73	10,03	17,44	15,37	4,40	2,08	36,84	14,49	5,22	0,89	0	0
9	64,37	65,42	80,08	54,36	63,68	73,12	47,97	47,38	48,76	47,77	30,59	41,99	4,75	3,22	6,82
10	60,10	71,37	71,87	48,36	27,18	62,65	34,95	38,65	45,01	58,59	35,69	34,96	1,19	0	0
11	83,85	76,67	79,84	92,35	87,86	71,60	70,84	73,37	75,24	51,34	47,63	52,10	5,82	6,95	25,31
12	82,45	80,72	85,33	88,69	84,05	83,33	65,35	57,66	83,42	59,66	28,66	58,55	5,39	5,47	18,50
13	59,52	29,29	35,15	24,40	23,57	22,06	31,79	21,21	10,18	52,20	33,17	29,12	0,84	0	0
14	20,96	42,40	28,90	9,58	28,58	29,78	5,74	5,26	4,55	26,32	11,51	20,43	0,55	0	0
15	55,70	66,36	65,01	45,85	62,23	48,45	48,51	51,73	47,39	72,70	50,79	42,36	2,23	0	5,75
16	64,24	74,73	74,55	54,89	61,36	82,14	46,56	29,00	41,61	47,42	27,38	36,99	3,77	3,52	0
17	54,87	78,18	77,82	90,48	83,23	79,16	70,09	82,00	84,05	40,96	45,76	47,53	13,25	8,82	13,78
18	100	83,43	92,34	100	66,62	93,38	91,36	88,18	72,50	58,52	40,84	44,90	21,35	10,47	8,16
19	3,15	12,32	6,1	0	2,29	2,10	0	0	0,55	0	0	5,71	0	0	0
20	0	8,61	8,66	0	1,19	3,57	0	0	0,48	0	0	2,86	0	0	0
21	58,25	54,66	47,37	32,52	51,01	16,67	25,31	38,60	15,93	35,53	32,78	27,17	0,62	0	1,88
22	47,50	59,11	45,78	44,94	31,95	45	17,94	23,15	7,22	27,94	28,57	10,43	1,50	0	0
23	53,47	64,79	75,15	40,55	44,93	68,99	55,65	49,82	53,54	47,35	44,07	38,40	9,74	0	2,42
24	72,01	73,60	78,67	47,19	41,05	76,51	33,12	31,18	30,75	39,28	23,88	31,98	3,85	1,06	0

** PDM, PDP, PDV, PVMY PDF: Porcentaje de desprendimiento de maduros, pintones, verdes, verdes en la masa cosechada y porcentaje de defoliación.

En la Tabla 5, se muestran los tratamientos seleccionados, de acuerdo al ciclo de la cosecha, que cumplieron con una aceptable selectividad, baja defoliación y un buen

desprendimiento de frutos maduros y pintones. El grado de madurez promedio al inicio de cosecha mitad y final fue respectivamente de 46 %, 54 % y 48 %.

Tabla 5. Selección de tratamientos según el ciclo de la cosecha.

Ciclo	Tratamiento	PDM. %	PDP. %	PDV. %	PVM. %	DF. %
Inicio	6	82,25 ^a	78,65 ^b	58,69 ^c	39,67 ^d	5,31 ^c
	24	72,01 ^a	47,19 ^b	33,12 ^c	39,28 ^d	3,85 ^c
Mitad	12	80,72 ^a	84,05 ^b	57,66 ^c	28,66 ^d	5,47 ^c
	24	73,60 ^a	41,65 ^b	31,18 ^c	23,88 ^d	1,06 ^c
Final	3	80,16 ^a	60,41 ^b	45,52 ^c	31,94 ^d	12,94 ^c
	24	78,67 ^a	76,51 ^b	30,75 ^c	31,98 ^d	0 ^c

** Tratamientos para una misma variable en el mismo ciclo de la cosecha y con igual letra son estadísticamente iguales. (prueba Tukey 5%).

De la Tabla 5, se observa como el grado de madurez es un factor importante en las variables respuesta. Cuando este factor aumenta la tendencia general es disminuir la variable PVM y aumentar las variables PDM y PDP. Para los tratamientos seleccionados el efecto de la vibración sobre la variable defoliación es muy bajo. Los resultados obtenidos con el tratamiento 24 el cual se ejecutó bajo una frecuencia de excitación de 1.500 c.p.m seleccionada a partir de los resultados obtenidos con los modelos teóricos determinada, se

repetió en todos los ciclos de la cosecha, lo cual indica la efectividad de los modelos propuestos para predecir el rango resonante del fruto maduro en el primer modo de vibración.

Los tratamientos (3, 6 y 12), los cuales se ejecutaron bajo frecuencias de vibración altas en el rango estudiado, no presentaron incrementos notorios en el desprendimiento de frutos maduros y pintones, ni tampoco en el porcentaje de verdes en la masa cosechada con respecto al

tratamiento (24). Los resultados obtenidos con los tratamientos son estadísticamente iguales lo que implica para fines prácticos, utilizar el tratamiento (24) el óptimo para vibrar ramas de café variedad Colombia.

El valor adecuado de la frecuencia es de 1.500 c.p.m, amplitud de vibración de 1,5 cm aplicada a un tercio de la longitud de la rama, lográndose un desprendimiento del 81% de frutos maduros, 65% de frutos pintones y un porcentaje de verdes en la masa cosechada alrededor del 31%.

En la Figura 8, se observa el efecto de la frecuencia y la amplitud en el porcentaje de desprendimiento de frutos maduros. A medida que se incrementa la amplitud y frecuencia mayor cantidad de frutos maduros se desprenden y para un mismo valor de frecuencia el desprendimiento es mayor a medida que se incrementa la amplitud de la vibración.

En la Figura 9, se observa el porcentaje de verdes en la masa cosechada (PVM), en función de la amplitud de vibración y frecuencia de excitación.

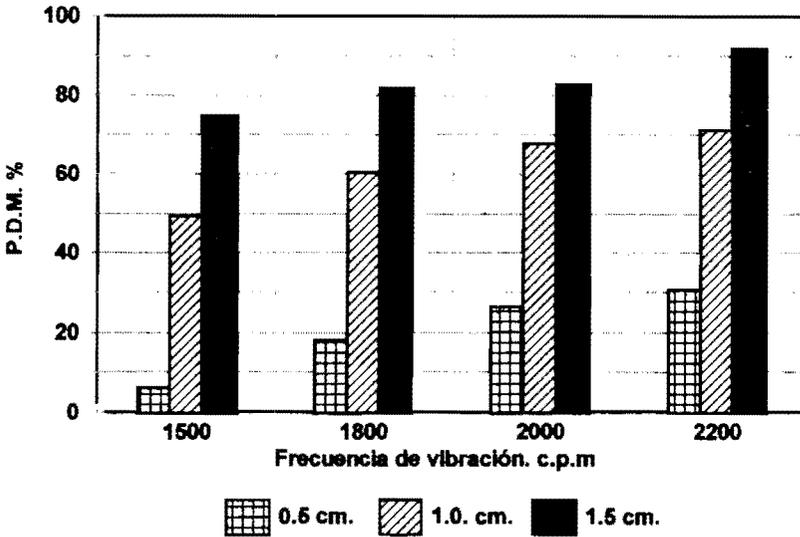


Figura 8. Desprendimiento de frutos maduros de café, según la frecuencia y amplitud de vibración.

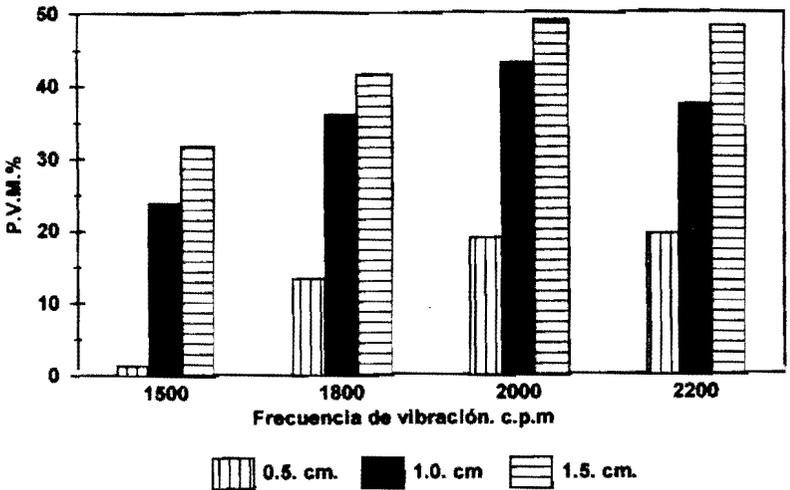


Figura 9. Porcentaje de verdes cosechados según la frecuencia y amplitud de vibración

Desde el punto de vista de la selectividad de la cosecha con la aplicación de las vibraciones unidireccionales a las ramas, la Figura 9, muestra importantes limitaciones en selectividad: PVM del 30% en mejor de los casos con (1.500 c.p.m y 1,5 cm). Con el fin de reducir el valor del PVM, se podría considerar la aplicación de las vibraciones en tiempos inferiores a 5s, realizando repases.

Para determinar la presencia del momento flector en el desprend-

dimiento de los frutos se vibraron 40 ramas de café con el tratamiento 24. Los resultados estadísticos en la Tabla 6, obtenidos con una prueba t al 5%, mostraron que el desprendimiento del fruto maduro se debe a la presencia del momento flector originado en la unión fruto-pedúnculo por las oscilaciones angulares del fruto. Para los frutos pintones desprendidos no hay evidencia de la presencia del momento flector ya que la cantidad de frutos desprendidos sin pedúnculo es estadísticamente iguales a los

frutos desprendidos con pedúnculo.

El análisis estadístico muestra que los frutos verdes no se desprenden por la acción del momento flector originado en la unión fruto-pedúnculo. Se notó gran desprendimiento de ramilletes (varios frutos

unidos a un pedúnculo principal), lo cual posiblemente se deba a la presencia de grandes fuerzas inerciales determinadas en gran parte por el aumento de masa y/o por su localización en zonas de gran amplitud de vibración (extremos de la rama).

Tabla 6. Prueba t al 5%, realizada para comprobar la acción del momento flector en el desprendimiento de frutos de café Variedad Colombia.

Estado de madurez	t calculado	t crítico	Conclusión
Maduro	6,7	1,67	$\mu_2 > \mu_1$
pintón	0,9	1,67	$\mu_2 = \mu_1$
verde	-4,64	-1,67	$\mu_2 < \mu_1$

** μ_1 y μ_2 : Frutos con y sin pedúnculo respectivamente.

CONCLUSIONES

1. Las propiedades físico-mecánicas del sistema fruto-pedúnculo (S.F.P) de café Variedad Colombia, varían de acuerdo a su estado de maduración.
2. La frecuencia natural del sistema fruto-pedúnculo (S.F.P) disminuye a medida que se incrementa la maduración del

fruto, siendo la frecuencia natural del fruto maduro y pintón estadísticamente inferior a la del verde.

3. El modelo de dos grados de libertad propuesto por Martínez (1983), y el modelo de un solo grado de libertad predicen baja selectividad para frecuencias comprendidas en los rangos de 1.500 c.p.m a 9.000 c.p.m.

4. La amplitud desarrollada mediante vibración unidireccional de un solo punto de excitación en las ramas de café, dependen de la localización del punto de agarre del vibrador sobre la longitud de la rama.
5. Los parámetros de vibración más adecuados para vibrar ramas de café variedad Colombia considerando un solo punto de vibración son : amplitud de 1,5 cm, frecuencia de 1.500 c.p.m, punto de agarre a $L / 3$ sobre la longitud de la rama y un tiempo de vibración de 5 s, lográndose desprender más del 74 % de los frutos maduros presentes en la rama con un 30% máximo de frutos verdes en la masa cosechada. La selectividad es una función directa de estos parámetros y del porcentaje de maduración de la rama en el momento de vibrar.
6. Con amplitudes aplicadas directamente a las ramas entre 1,0 y 1,5 cm de amplitud y frecuencia de vibración por encima de los 2.200 c.p.m. no se logra desprender de forma selectiva el fruto de café, siendo este desprendimiento más función del incremento de la amplitud que de la frecuencia.
7. El desprendimiento del fruto de café no se debe únicamente a la acción del momento flector, sino posiblemente a una acción combinada de cargas.
8. En el rango de 1.500 a 2.200 c.p.m. aplicando la fuerza de vibración en la parte media de la rama no se logra desprender más del 90% de los frutos maduros presentes en la rama.

BIBLIOGRAFIA

ALVAREZ, Fernando. Cosecha mecánica de café en ladera. Chinchiná: CENICAFE. 1989, 34p.

CIRO, V. J. H. Estudio dinámico de la rama de café para el desarrollo de la cosecha mecánica por vibración. Medellín, 1997. 98p. Tesis (Ingeniero Agrícola). Universidad Nacional de Colombia. Facultad de Ciencias Agropecuarias.

COOKE, J.R. and PARCHOM-CHUCK, P. Vibratory harvesting: an experimental analysis of fruit-stem dynamics. *En*: Transactions of the ASAE. Vol. 15, No. 4 (Jul-Ago. 1972); p.598-603.

DIENER, R. and STAFFORD, J.R. Design criteria for minimizing

predetachment fruit damage during mechanical shaking. *En: Transactions of the ASAE. Vol.16, No. 5 (Sep-Oct. 1973); p.840-843.*

GUNKEL, W ; REHKUNGLER, G. E and HUSSAIN, A.A. Tree limb response to a periodic discontinuous sinusoidal displacement. *En: Transactions of the ASAE. Vol.18, No. 2 (Mar-April. 1975); p.614-617.*

LORENZE, C; FRIDLEY, R. B and ADRIAN, P.A. Forced vibration of a tree limb. *En: Transactions of the ASAE. Vol.18, No. 4 (Jul.-Aug. 1965); p.473-475.*

MARTINEZ, A. Estudio teórico de la dinámica del sistema fruto-pedúnculo. *En: Revista Ciencias Técnicas, ISPJAE. No. 2. (1983); p.29-39.*

_____ *et al.* Reporte de investigaciones sobre cosecha mecanizada de café parte I. La Habana: s.n., 1988. p. 3-89.

_____ y MENDEZ, B. Estudio teórico de los regímenes de vibración para el desprendimiento de toronjas. *En: Monografías del CEMA, ISCAH. No. 2 (1983); p.1-14.*

_____ *et al.* Determinación de parámetros de un órgano de trabajo para cosecha mecanizada de café por vibración. *En: Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias. Vol. 2, No 3 (1989); p.27-49.*

MILLER, M. W and MORROW, J. Charles. Vibrational Characterization of the apple-stem system with respect to stem separation. *En: Transactions of the ASAE. Vol. 19, No.3 (May-Jun. 1976); p.409-411.*

MONROE, G. E and WANG, K. J. Systems for mechanically harvesting coffee. *En: Transactions of the ASAE. Vol.11, No. 3 (May-Jun. 1968); p. 270-278.*

PHILLIPS, Allan Lewis. Computer formulation of forced vibration of tree limbs with secondary branches. California, 1967. 154p. Tesis (Ph.D). University of California.

SHELLENBERGER, A. F and WANG, K. J. Effects of acumulative damage due stress cycles on selective harvesting of coffee. *En: Transactions of the ASAE. Vol. 10, No. 2 (Mar/Apr. 1967); p. 252-255.*

TSATSARELIS, C. A. Vibratory olive harvesting: the response of the fruit-stem system to fruit removing action. *En: Journal of Agricultural Engineering Research. Vol. 39, No. 2 (Jan., 1987); p.77-90.*

WANG, K. Jaw. Mechanical coffee harvesting, Parte A. *En: Transactions of the ASAE. Vol.8, No. 3 (May-Junio. 1965); p. 400-402, 405.*

WANG K., Jaw. Mechanical coffee harvesting (Parte B). *En: Transactions of the ASAE. Vol. 8, No. 3 (May-Jun. 1965); p. 403-405.*

YUNG, Ching and FRIDLEY, R.B. Analysis of fruit detachment during tree shaking. *En: Transactions of the ASAE. Vol. 18, No. 3 (May-Jun. 1975); p. 409-415.*