

# COSECHA MECÁNICA DE CAFÉ APLICANDO VIBRACIONES CIRCULARES AL TALLO DEL CAFETO

Iván Darío Aristizábal-Torres\*; Carlos Eugenio Oliveros-Tascón\*\*; Juan Rodrigo Sanz-Uribe\*\*;  
Esther Cecilia Montoya-Restrepo\*\*; Fernando Álvarez-Mejía\*\*\*

---

## RESUMEN

**ARISTIZÁBAL T., I. D.; OLIVEROS T., C. E.; SANZ U., J. R.; MONTOYA R., E. C. ; ÁLVAREZ M., F. Cosecha mecánica de café aplicando vibraciones circulares al tallo del cafeto. *Cenicafé* 51(1): 41-53. 2000.**

En Cenicafé y como parte de las investigaciones sobre la cosecha mecanizada, se estudió el efecto de la aplicación de vibraciones circulares al tallo del cafeto, en árboles de cinco años de la especie *Coffea arabica*. El prototipo utilizado para las pruebas constó de un brazo mecánico de movimiento circular, un cilindro para sujetar el tallo y un par de masas excéntricas para balancear dinámicamente la estructura. Para accionar el vibrador se utilizó el circuito hidráulico de un tractor de 90 HP. Los resultados mostraron que el menor desprendimiento de cerezas verdes ocurre cuando la frecuencia, amplitud y tiempo de vibración fueron de 500cpm, 3cm y 40s, respectivamente. El desprendimiento de cerezas verdes se redujo cuando la vibración se aplicó en tres puntos diferentes del árbol. El menor porcentaje de desprendimiento de hojas ocurrió en las variedades Caturra rojo y Colombia amarillo. El porcentaje de desprendimiento de cerezas maduras estuvo entre 38 y 63%, con rendimientos entre 50 y 118kg de café cereza/hora. Además, se observó desprendimiento de la corteza del tallo en el punto de acople del órgano vibrador y el tallo, cuando la vibración circular aplicada tuvo una amplitud de 3cm.

**Palabras Claves:** Cosecha mecánica, vibraciones circulares, café, *Coffea arabica*.

---

## ABSTRACT

The effect of circular vibrations applied to stems of five-year-old coffee trees (*Coffea arabica*) was evaluated in Cenicafé as a part of an investigation regarding the mechanical harvest of coffee berries. The prototype used for the tests was composed of a mechanical arm of circular movement, a hydraulic cylinder to fix the vibrating arm to the stem, and a pair of excentric weights to balance the vibrating structure dynamically. Power to operate the prototype was supplied by the hydraulic system of a 90 HP tractor. Results obtained indicated that the lowest detachment of green berries occurred when frequency, amplitude and vibration times were 500cpm, 3cm, and 40s, respectively. Detachment of green berries was reduced when vibrations were applied in three different parts of the stem. Varieties Red Caturra and Yellow Colombia showed the lowest detachment of leaves. Detachment of ripe berries ranged from 38 to 63%, with a capacity of 50 to 118kg of berries/h. Physical damage to the stem and removal of bark at the joint point was observed when circular vibration amplitude was 3cm.

**Keywords:** Mechanical harvesting, circular vibrations, coffee, *Coffea arabica*.

---

\* Ingeniero Agrícola. Joven Investigador del Convenio Cenicafé-Colciencias.

\*\* Investigador Científico III, Auxiliar de Investigación e Investigador Científico I, respectivamente. Ingeniería Agrícola, Ingeniería Agrícola y Biometría, respectivamente. Centro Nacional de Investigaciones de Café, Cenicafé. Chinchiná, Caldas, Colombia.

\*\*\* Profesor Asociado, Departamento de Ingeniería Agrícola y Alimentos. Facultad de Ciencias Agropecuarias. Universidad Nacional de Colombia, sede Medellín.

Desde el punto de vista de la cosecha, en los sistemas de recolección se puede establecer categorías según la localización física del producto por cosechar en la planta. Los arbustos y árboles que concentran su producción en zonas con mucho follaje requieren de la transferencia de una cantidad relativamente grande de energía. La aplicación de esta energía se logra mediante vibraciones suministradas a las ramas o al tallo en sitios adecuados, con características de vibración propias para cada cultivo (12).

En la cosecha por vibración se trasmite momentum a través del tallo y las ramas hasta los frutos. Cuando las fuerzas inerciales resultantes son superiores a las que retienen los frutos a la rama o al pedúnculo se produce el desprendimiento (3, 6, 9, 15).

La literatura encontrada sobre cosecha mecánica de café por vibración aplicada a la rama o al tallo, muestra que los estudios teóricos han sido dirigidos a determinar las características óptimas de vibración; es decir, frecuencia y amplitud de la fuerza aplicada, desplazamiento y aceleración en varios puntos a lo largo de la rama, punto de aplicación con referencia a la estructura del árbol, dirección y tiempo de aplicación y tipo de vibración (6, 7, 9).

Según Wang (13) y Fridley y Yung (5), un criterio importante para el diseño de un cosechador mecánico por vibración es la frecuencia natural del sistema fruto-pedúnculo (SFP), pues al excitar todo el sistema, en este caso el árbol, con dicha frecuencia este último responde con la máxima amplitud y los esfuerzos internos inducidos mediante la vibración forzada facilitan el desprendimiento de los frutos (4, 7).

Para una amplitud particular la selectividad es función principalmente de la frecuencia aplicada, el tiempo total de vibración y la relativa cantidad de cerezas maduras e inmaduras en el árbol (13). Ciro (2), aplicando vibraciones trans-

versales a la rama encontró que a medida que se incrementa la amplitud y la frecuencia, mayor porcentaje de frutos maduros se desprende y para un mismo valor de frecuencia el desprendimiento es mayor a medida que se incrementa la amplitud de vibración.

Según Fridley y Yung (5), la transmisibilidad de la estructura del árbol influye en el desprendimiento de los frutos por vibración. El árbol de café ha sido definido como una estructura con buena transmisibilidad de la vibración debido a que el tallo y las ramas primarias son relativamente rectas y cortas, comparados con los de otras especies.

El efecto de vibrar el tallo en más de un punto fue considerado por Shellenberger *et al.* (11). Según estos autores, el tiempo de vibración para que más del 50% de los frutos se desprendan se prolonga demasiado cuando se vibra el tallo en un solo punto. El efecto que tiene la maduración de las cerezas presentes en el árbol en el momento de aplicar las vibraciones fue considerado por Monroe y Wang (8), y Wang y Shellemberger (14); ellos plantearon que es posible utilizar bajas frecuencias cuando el porcentaje de maduración es menor al 50% y frecuencias altas cuando la maduración es mayor del 50%. Martínez (7) inclusive, concluye que con un grado de maduración inferior al 50% no es posible obtener resultados satisfactorios bajo ninguno de los rangos que este autor estudió.

Los resultados en vibración mecánica del tallo y las ramas de café obtenidos con máquinas experimentales, registrados en la literatura, indican que es posible alcanzar algún grado de selectividad en la cosecha mecánica (2, 7, 8, 10, 13). Sin embargo, estos prototipos sólo utilizaron vibraciones unidireccionales transmitidas a las ramas.

Yung y Wang (16) realizaron un estudio teórico del comportamiento de las ramas laterales del café cuando el tallo principal es sometido

a movimientos circulares de vibración pero no fueron publicados resultados de campo.

El movimiento circular se puede considerar como la combinación de dos movimientos armónicos simples a lo largo de líneas perpendiculares que tiene igual período y amplitud con una diferencia de fase de un cuarto de período. Considerando que este tipo de vibración aplicada al tallo del café tiene la ventaja de transmitirle a la base de la rama un movimiento circular generando dos vibraciones, una transversal y otra longitudinal simultáneamente, se planteó esta investigación con el objetivo de estudiar el efecto de estas vibraciones en el rendimiento y en la selectividad de la cosecha mecánica de café.

## MATERIALES Y MÉTODOS

**Localización.** Los ensayos se realizaron en la Estación Central Naranjal, en Chinchiná, Caldas, con árboles de café variedades Caturra

Rojo, Colombia Rojo, plantillas de 54 meses de edad sembradas en cuadro a 2m x 1m, y variedad Colombia Amarillo, una plantilla de 60 meses sembrada a 1m x 1m. Los lotes estaban ubicados en topografía plana, muy similares entre sí.

**Materiales y equipos.** Se utilizó como fuente de potencia el sistema hidráulico de un Tractor FORD 6610 de 90 HP (Figura 1-a). Se realizó un montaje hidráulico para el accionamiento y control del mecanismo de vibración (Figura 1-b). Este montaje estuvo constituido por los siguientes elementos: control remoto del hidráulico del tractor, motor hidráulico PARKER serie 113 de 9 HP, válvula direccional CASAPPA VCD25, cilindro hidráulico para 500N, presión de trabajo 447kPa (65 PSI), válvula reductora de presión PARKER PR101S30, válvula de cheque PARKER C600S, válvulas de control de flujo PARKER F600S, válvulas aisladoras PARKER PN400S, manómetro ASHCROFT con rango de presión de 0 a 20,6KPa (0 a 3.000 PSI), adaptadores, tapones y racores para alta presión y manguera hidráulica de alta presión de 12,7mm (1/2") y 9,5mm (3/8").



(a)



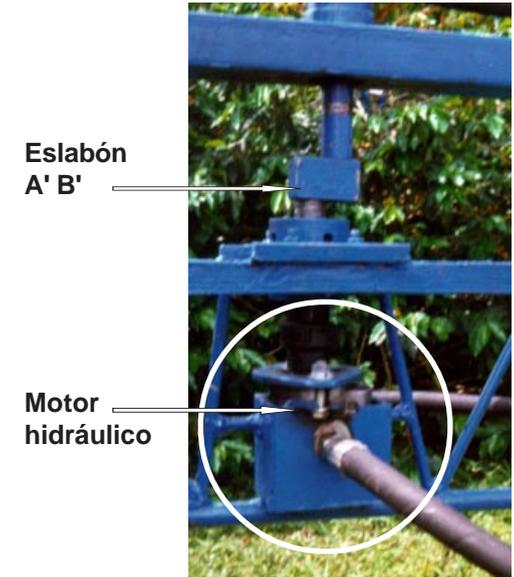
(b)

**Figura 1.** Prototipo diseñado en Cenicafé para aplicar vibraciones circulares al tallo del cafeto. (a) Tractor utilizado como fuente de potencia. (b) Detalle del sistema hidráulico empleado para accionar y controlar el mecanismo vibrador.

**Mecanismo vibrador.** Se diseñó como un brazo o viga soportada en tres puntos, con una carga en voladizo. Los apoyos en los extremos fueron dos masas excéntricas diseñadas para el balanceo dinámico del brazo y el apoyo intermedio lo hacía el motor hidráulico que trasmite el torque y el movimiento necesario al mecanismo.

En la Figura 2 se muestra un esquema del mecanismo diseñado para el prototipo. Los puntos B, B' y C representan los tres puntos de apoyo del brazo; estos están unidos a los puntos A, A' y D, respectivamente, formando tres eslabones de igual excentricidad o radio de giro, sobre los cuales el brazo se restringe a hacer rotaciones en el plano horizontal, generando un movimiento de trayectoria circular descrita por el punto E. Acoplados a los puntos A y D se muestran las masas de balanceo M1 y M2, que contrarrestan la masa total del brazo vibrador. El eslabón A'B' permite eliminar los puntos de agarrotamiento o "puntos muertos" del mecanismo, facilitando su libre movimiento y disminuyendo los requerimientos de torque y de potencia que deben ser transmitidos por el motor hidráulico acoplado en A' (Figuras 2 y 3). Este motor de 9 HP de potencia transmite el movimiento con un torque de 30,5 N-m a 3.600rpm y permite variar la frecuencia del brazo vibrador en un rango de 1.000cpm.

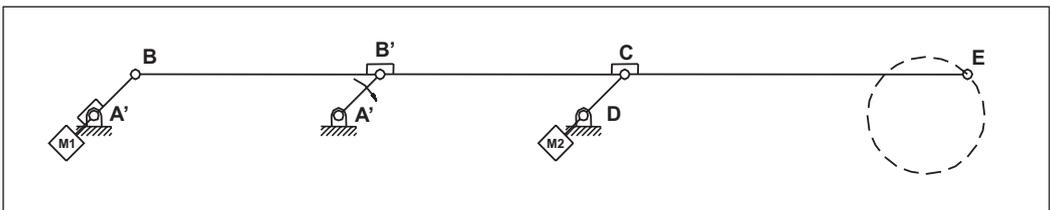
El brazo (Figura 4) se diseñó para trabajar hasta frecuencias de 4.551cpm con un factor de seguridad de 1,26 para evitar su falla por resonancia durante la generación de vibraciones. Se calculó el esfuerzo y el balanceo de esta estruc-



**Figura 3.** Detalle del eslabón A'B' y el motor hidráulico acoplado en A' que transmiten el movimiento al brazo vibrador del prototipo.

tura (1), la cual se construyó utilizando un perfil en "U" de acero de 76,2mm con un espesor de 4,76mm y una longitud de 1.700mm. También se diseñaron y construyeron en bronce dos pares de masas excéntricas de 2 y 3cm de radio de giro de los eslabones (excentricidad) con las cuales se varió la amplitud del movimiento circular de vibración.

**Mecanismo de sujeción.** Se diseñó un cilindro hidráulico de doble efecto (Figura 5), con una carrera del vástago de 70mm para facilitar el acoplamiento del brazo al tallo del cafeto en cualquier punto. La fuerza de agarre se reguló



**Figura 2.** Esquema del mecanismo que genera un movimiento circular del vibrador diseñado en Cenicafé.



**Figura 4.** Brazo del prototipo diseñado en Cenicafé para aplicar vibraciones circulares.



**Figura 5.** Mecanismo de sujeción al tallo del vibrador circular diseñado en Cenicafé.

mediante una válvula reductora de presión y permitió mantener fija la abertura del mecanismo de agarre (mantener la presión constante durante la vibración, sin abrirse).

**Estructura de soporte.** Se utilizó una estructura metálica para soporte del mecanismo y enganche al tractor (Figura 6). Consistió en una viga aligerada tipo correa, de sección triangular de 2m de longitud empotrada en un extremo con un apoyo en el medio. Con dos ángulos de hierro de 25,4mm x 3,2mm en los dos vértices superiores y en el vértice inferior una varilla de 19,05mm. Como elementos de unión a lo largo de la viga se utilizaron varillas de hierro de 9,5mm. La estructura de acople utilizó los tres puntos de enganche del tractor; por tanto, se pudo nivelar el equipo y alzarlo a diferentes alturas (hasta 1,50m) mediante el levante hidráulico. También se diseñó con una rotación de 180° y luz de 2 metros para facilitar el acceso con el tractor a los cafetos.

**Evaluación del prototipo.** La evaluación del prototipo se realizó entre los meses de noviem-

bre de 1997 y enero de 1998 y constó de tres fases. En la primera se evaluó el efecto de la frecuencia, la amplitud y el punto de aplicación de la vibración; en la segunda se evaluó el efecto de uno y varios puntos de aplicación y en la tercera, el efecto de la vibración en tres variedades de café.

**Primera fase.** Se evaluaron ocho tratamientos que resultaron de la combinación de dos frecuencias (500 y 700cpm), dos amplitudes (2 y 3cm) y dos puntos de aplicación de la vibración sobre el tallo (30% y 60% de la altura total), utilizando 10 árboles de variedad Colombia de fruto rojo por tratamiento, tomando como unidad experimental el árbol. El efecto de los tratamientos se evaluó en un tiempo de 20 y 40 segundos de vibración, bajo un modelo de análisis para el diseño experimental completamente aleatorizado, en arreglo factorial 2x2x2 con las siguientes variables de respuesta: porcentaje de desprendimiento de frutos maduros y pintones (DMP), porcentaje de desprendimiento de frutos verdes (DV), porcentaje de frutos verdes en



**Figura 6.** Estructura de soporte del brazo vibrador.

el café cosechado (VC), porcentaje de desprendimiento de hojas (DH) y rendimiento\* del desprendimiento mecánico (R). En la Figura 7, se muestra el procedimiento empleado durante la evaluación.

**Segunda fase.** Se evaluó el efecto de la vibración en tres puntos sobre el tallo (tratamientos), bajo un modelo de análisis para el diseño completamente aleatorizado, con las variables de respuesta descritas en la primera fase. Se aplicó

la vibración con una frecuencia de 500cpm y una amplitud de 3cm, de acuerdo con los resultados de la primera fase. Por cada tratamiento se tomaron 10 unidades experimentales y como unidad experimental se tomó el árbol. En la Tabla 1 se describen los tratamientos.

---

\* Kilogramos desprendidos de café por unidad de tiempo, sin tener presente los tiempos de desplazamiento, sujeción del tallo y recolección de mallas.



**Figura 7.** Procedimiento empleado durante las evaluaciones del prototipo para aplicar vibraciones circulares. (a) Aplicación de la vibración. (b) Recolección de frutos y hojas desprendidos sobre mallas.

**TABLA 1.** Tratamientos aplicados al tallo del cafeto, en la segunda fase de evaluación con el vibrador circular. Cenicafé.

| TRATAMIENTO                                      | DESCRIPCION                                     |
|--|---|
| Punto de aplicación en el tallo (% de la altura) | Tiempo de vibración (s) por punto de aplicación |
| 30   | 40,0  |
| 30 - 50  | 20,0  |
| 30 - 50 - 60                                     | 13,3  |

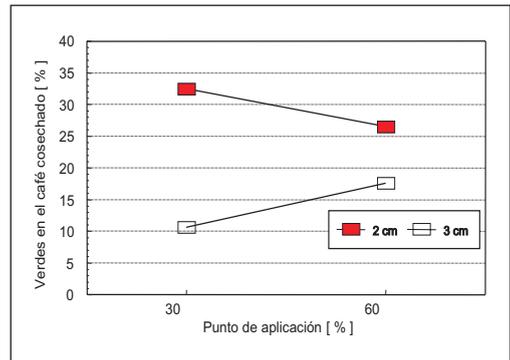
**Tercera fase.** En las variedades de café Colombia de fruto rojo, de fruto amarillo y Caturra fruto rojo se evaluó el efecto de la aplicación de las vibraciones circulares en tres puntos sobre el tallo, con las variables de respuesta descritas en las fases anteriores, empleando 10 árboles por variedad y tomando como unidad experimental el árbol.

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

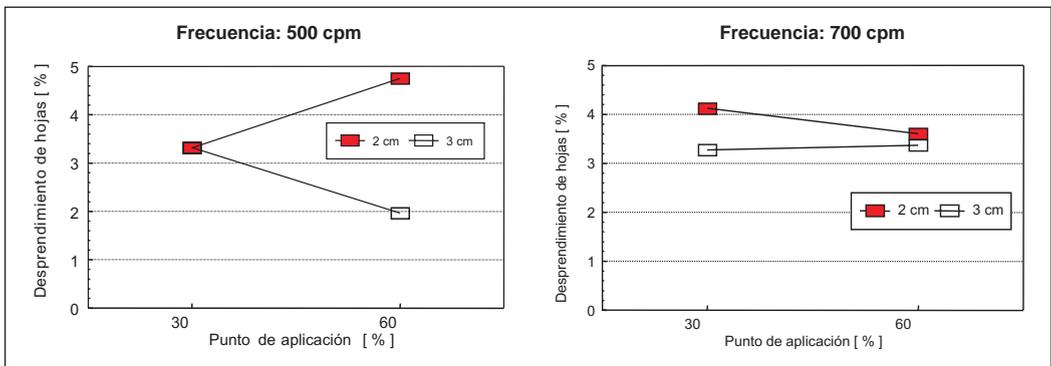
**Primera fase.** En la Tabla 2 se presentan los valores promedios y variación de cada una de las variables estudiadas en cada uno de los tratamientos evaluados. El análisis de varianza no mostró efecto de la interacción ni de las fuentes de variación en las variables: total de frutos en el árbol y altura del árbol, lo cual indicó homogeneidad inicial de las unidades experimentales.

Al aplicar los tratamientos, a los 20 segundos sólo hubo efecto de la interacción frecuencia por amplitud por punto de aplicación en la variable porcentaje de hojas desprendidas, a favor de la combinación 500cpm de frecuencia, amplitud de 3cm y punto de aplicación del 60%, según prueba de contraste (Figura 8).

A los 20 segundos el análisis de varianza también mostró efecto de la interacción amplitud por punto de aplicación, en el porcentaje de frutos verdes en la masa cosechada a favor de la amplitud de 3cm y del punto de aplicación del 30% (Figura 9).



**Figura 9.** Comportamiento en el porcentaje de frutos verdes presentes en el café cosechado a los 20 segundos de aplicar la vibración, según la interacción amplitud y punto de aplicación.



**Figura 8.** Comportamiento del desprendimiento de hojas a los 20 segundos, según la interacción frecuencia por amplitud por punto de aplicación.

TABLA 2. Valores promedios y variación de las variables estudiadas durante la primera fase de evaluación del prototipo para aplicar vibraciones circulares al tallo del café. Cenicafé.

| TRATAMIENTO |        | CONDICIONES INICIALES             |         |      |              |      |         |      |        |      |        | VARIABLES DE RESPUESTA |         |      |        |       |        |      |        |      |          |      |
|-------------|--------|-----------------------------------|---------|------|--------------|------|---------|------|--------|------|--------|------------------------|---------|------|--------|-------|--------|------|--------|------|----------|------|
|             |        | TIEMPO DE VIBRACIÓN : 20 SEGUNDOS |         |      |              |      |         |      |        |      |        |                        |         |      |        |       |        |      |        |      |          |      |
| F (cpm)     | A (cm) | P. de A. (%)                      | Ht (cm) | CV   | Total frutos | CV   | MPI (%) | CV   | VI (%) | CV   | SI (%) | CV                     | DMP (%) | CV   | DV (%) | CV    | VC (%) | CV   | DH (%) | CV   | R (kg/h) | CV   |
| 500         | 2      | 30                                | 219     | 10,8 | 1.718        | 43,2 | 49,4    | 40,0 | 33,4   | 40,0 | 17,2   | 65,1                   | 53,5    | 36,3 | 33,2   | 46,6  | 30,8   | 51,7 | 3,3    | 30,3 | 182,5    | 51,7 |
| 500         | 2      | 60                                | 213     | 10,3 | 1.626        | 51,0 | 56,9    | 41,2 | 23,3   | 44,4 | 19,8   | 103,9                  | 48,3    | 56,9 | 35,6   | 92,6  | 20,7   | 70,9 | 4,7    | 60,3 | 177,8    | 73,1 |
| 500         | 3      | 30                                | 226     | 5,8  | 1.737        | 49,1 | 54,2    | 24,5 | 28,7   | 52,6 | 17,1   | 75,3                   | 43,1    | 41,1 | 14,6   | 80,1  | 13,2   | 61,5 | 3,3    | 35,2 | 141,9    | 49,4 |
| 500         | 3      | 60                                | 222     | 7,6  | 2.159        | 45,3 | 52,4    | 20,9 | 30,9   | 26,3 | 16,6   | 50,6                   | 37,8    | 66,8 | 15,0   | 100,6 | 15,8   | 59,9 | 2,0    | 41,1 | 144,6    | 68,8 |
| 700         | 2      | 30                                | 225     | 12,7 | 2.693        | 53,6 | 41,2    | 46,2 | 42,3   | 38,3 | 16,6   | 51,5                   | 52,7    | 37,9 | 27,8   | 72,0  | 34,1   | 41,9 | 4,1    | 49,1 | 213,5    | 38,8 |
| 700         | 2      | 60                                | 225     | 5,2  | 1.741        | 53,7 | 45,7    | 34,9 | 42,2   | 38,7 | 12,0   | 60,3                   | 49,6    | 46,9 | 24,1   | 50,1  | 32,3   | 40,5 | 3,6    | 49,5 | 141,3    | 59,4 |
| 700         | 3      | 30                                | 225     | 13,1 | 2.184        | 46,3 | 56,7    | 17,8 | 25,0   | 48,6 | 18,2   | 65,5                   | 40,4    | 51,3 | 8,00   | 70,7  | 8,0    | 62,3 | 3,3    | 51,8 | 195,0    | 76,0 |
| 700         | 3      | 60                                | 234     | 6,7  | 2.313        | 74,4 | 54,2    | 31,5 | 31,7   | 50,5 | 14,2   | 57,3                   | 43,7    | 37,3 | 19,1   | 87,1  | 19,2   | 74,9 | 3,4    | 43,1 | 189,2    | 58,1 |

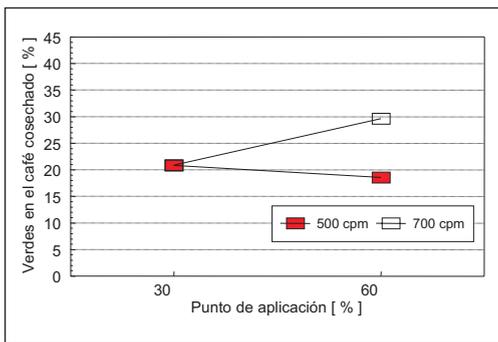
  

|         |        | TIEMPO DE VIBRACION : 4 0 SEGUNDOS |         |      |              |      |         |      |        |      |        |       |         |      |        |      |        |      |        |      |          |      |
|---------|--------|------------------------------------|---------|------|--------------|------|---------|------|--------|------|--------|-------|---------|------|--------|------|--------|------|--------|------|----------|------|
| F (cpm) | A (cm) | P. de A. (%)                       | Ht (cm) | CV   | Total frutos | CV   | MPI (%) | CV   | VI (%) | CV   | SI (%) | CV    | DMP (%) | CV   | DV (%) | CV   | VC (%) | CV   | DH (%) | CV   | R (kg/h) | CV   |
| 500     | 2      | 30                                 | 219     | 10,8 | 1.718        | 43,2 | 49,4    | 40,0 | 33,4   | 40,0 | 17,2   | 65,1  | 57,0    | 34,4 | 38,2   | 52,0 | 26,9   | 47,0 | 5,8    | 42,9 | 138,7    | 63,4 |
| 500     | 2      | 60                                 | 213     | 10,3 | 1.626        | 51,0 | 56,9    | 41,2 | 23,3   | 44,4 | 19,8   | 103,9 | 46,3    | 51,7 | 34,3   | 78,8 | 17,8   | 70,8 | 6,8    | 65,9 | 108,8    | 73,9 |
| 500     | 3      | 30                                 | 226     | 5,8  | 1.737        | 49,1 | 54,2    | 24,5 | 28,7   | 52,6 | 17,1   | 75,3  | 60,6    | 28,4 | 28,0   | 69,4 | 17,2   | 54,6 | 6,5    | 32,2 | 118,7    | 48,3 |
| 500     | 3      | 60                                 | 222     | 7,6  | 2.159        | 45,3 | 52,4    | 20,9 | 30,9   | 26,3 | 16,6   | 50,6  | 41,7    | 54,4 | 17,8   | 74,3 | 19,2   | 44,8 | 3,6    | 48,5 | 107,5    | 65,2 |
| 700     | 2      | 30                                 | 225     | 12,7 | 2.693        | 53,6 | 41,2    | 46,2 | 42,3   | 38,3 | 16,6   | 51,5  | 52,4    | 17,2 | 29,2   | 41,6 | 35,6   | 34,9 | 5,9    | 37,5 | 167,0    | 27,6 |
| 700     | 2      | 60                                 | 225     | 5,2  | 1.741        | 53,7 | 45,7    | 34,9 | 42,2   | 38,7 | 12,0   | 60,3  | 52,4    | 41,9 | 32,8   | 39,3 | 41,9   | 36,8 | 7,1    | 34,1 | 109,4    | 47,1 |
| 700     | 3      | 30                                 | 225     | 13,1 | 2.184        | 46,3 | 56,7    | 17,8 | 25,0   | 48,6 | 18,2   | 65,5  | 50,0    | 44,2 | 15,5   | 60,4 | 12,0   | 55,0 | 6,3    | 37,4 | 129,2    | 58,5 |
| 700     | 3      | 60                                 | 234     | 6,7  | 2.313        | 74,4 | 54,2    | 31,5 | 31,7   | 50,5 | 14,2   | 57,3  | 53,8    | 35,6 | 24,9   | 52,4 | 21,5   | 68,0 | 6,1    | 34,0 | 150,2    | 61,0 |

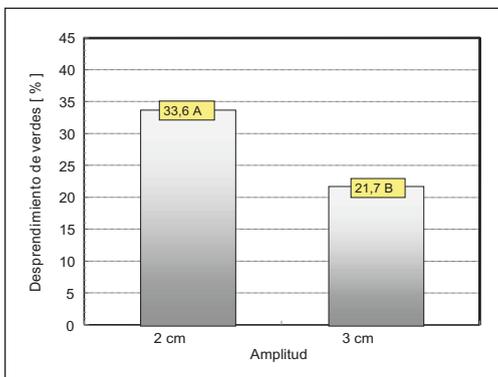
F= Frecuencia  
A= Amplitud  
P. de A.= Punto de aplicación  
Ht= Altura total del árbol  
MPI = Proporción inicial de frutos maduros y pintonos  
VI = Proporción inicial de frutos verdes  
SI = Proporción inicial de frutos secos  
DMP = Desprendimiento de frutos maduros y pintonos  
DV = Desprendimiento de frutos verdes  
VC = Frutos verdes en el café cosechado  
DH = Desprendimiento de hojas  
R = Rendimiento del desprendimiento mecánico  
CV = Coeficiente de variación

En las demás variables, a los 20 segundos de vibración, el análisis de varianza no mostró efecto de la interacción ni de los factores por separado. A los 40 segundos de vibración el análisis de varianza no mostró efecto de la interacción ni de los factores por separado, en las variables: porcentaje de desprendimiento de frutos maduros y pintones, porcentaje de desprendimiento de hojas y rendimiento; pero si mostró efecto de las interacciones frecuencia por punto de aplicación en la variable porcentaje de verdes en la masa cosechada (Figura 10) y para el factor amplitud en el porcentaje de desprendimiento de frutos verdes (Figura 11).

Aplicando una frecuencia de 700cpm en el punto de aplicación del 60% de la altura del tallo,



**Figura 10.** Porcentaje medio de frutos verdes presentes en el café cosechado a los 40 segundos de aplicar la vibración, bajo la interacción de frecuencia y punto de aplicación.



**Figura 11.** Efecto de la amplitud a los 40 segundos en el desprendimiento de frutos verdes.

se observó el mayor porcentaje de desprendimiento de frutos verdes y el mayor porcentaje de éstos en la masa cosechada, según prueba de contraste (Figura 10).

El menor porcentaje de desprendimiento de frutos verdes y el menor porcentaje de ellos en la masa cosechada se presentó con la amplitud de 3cm (Figuras 9 y 11).

De acuerdo con estos resultados, para aplicar las vibraciones circulares en la siguiente fase de evaluación se seleccionó la amplitud de 3cm, con una frecuencia de 500cpm.

**Segunda fase.** El análisis de varianza no mostró diferencias en las variables: total de frutos, porcentaje inicial de frutos maduros y pintones, verdes y secos presentes en los cafetos seleccionados para aplicar los tres tratamientos y tampoco mostró diferencias en la altura total (Ht) del árbol (Tabla 3). Lo anterior indica que para esta evaluación se utilizaron cafetos con condiciones similares respecto a estas variables.

Una vez aplicados los tratamientos, el análisis de varianza mostró efecto de tratamientos en la variable porcentaje de frutos verdes cosechados y la prueba de comparación de Tukey mostró que el menor valor de esta variable se presentó cuando se hizo vibrar el árbol durante 40 segundos, en tres puntos distintos del tallo (Tabla 4).

La aplicación de la vibración circular en diferentes puntos del tallo permite transmitir en forma más directa los esfuerzos requeridos para el desprendimiento de los frutos localizados en las ramas próximas al punto de aplicación de la vibración. Cuando se aplicó la vibración en un solo punto del tallo, la arquitectura de los cafetos principalmente en el primer tercio del árbol (traslape de ramas primarias, secundarias y hasta terciarias que disminuye la transmisión de la vibración del tallo al sistema fruto-pedúnculo), dificultó el desprendimiento de frutos maduros y pintones debido a la escasa amplitud del movi-

**TABLA 3.** Proporción media de frutos iniciales y altura de los árboles vibrados en la segunda fase de evaluación.

| Punto de Aplicación | TOTAL DE FRUTOS | CV   | MPI [ % ] | CV   | VI [ % ] | CV   | SI [ % ] | CV   | Ht [ cm ] | CV  |
|---------------------|-----------------|------|-----------|------|----------|------|----------|------|-----------|-----|
| 30%                 | 804             | 50,4 | 39,1      | 31,5 | 44,5     | 44,7 | 16,5     | 54,9 | 239       | 6,1 |
| 30-50%              | 845             | 49,8 | 41,7      | 27,2 | 34,7     | 63,4 | 23,6     | 58,9 | 238       | 6,2 |
| 30-50-60%           | 968             | 58,7 | 47,7      | 11,9 | 24,6     | 53,3 | 27,7     | 40,7 | 236       | 9,1 |

MPI = Proporción inicial de frutos maduros y pintones. VI = Proporción inicial de frutos verdes. Ht = Altura total del árbol. SI = Proporción inicial de frutos secos. CV = Coeficiente de variación.

**TABLA 4.** Efecto del punto de aplicación de la vibración en la selectividad, defoliación y rendimiento de la recolección en la segunda fase de evaluación.

| Punto de Aplicación | DMP [ % ] | CV** | DV [ % ] | CV   | VC [ % ] | CV   | DH [ % ] | CV   | R [ kg cc/h ] | CV   |
|---------------------|-----------|------|----------|------|----------|------|----------|------|---------------|------|
| 30%                 | 61,0a*    | 33,3 | 31,9a    | 93,0 | 24,8a    | 78,1 | 4,0a     | 34,9 | 42,0a         | 36,0 |
| 30-50%              | 64,5a     | 25,1 | 34,3a    | 93,2 | 17,4a    | 97,6 | 3,9a     | 35,5 | 53,2a         | 40,9 |
| 30-50-60%           | 60,5a     | 23,8 | 22,8a    | 96,8 | 8,8b     | 80,1 | 3,7a     | 22,8 | 64,7a         | 66,0 |

DMP = Desprendimiento de frutos maduros y pintones. DV = Desprendimiento de frutos verdes. VC = Frutos verdes en el café cosechado. DH = Desprendimiento de hojas. R = Rendimiento del desprendimiento mecánico. CV = Coeficiente de variación.

\* En una columna promedios seguidos por la misma letra no presentan diferencias significativas. Tukey al 5 %

\*\* Los datos del análisis de varianza fueron transformados a  $(X+5)^{1/5}$ .

miento alcanzada por estos. Por tanto, se seleccionó para ser evaluado en la tercera fase el tratamiento correspondiente a la aplicación de la vibración en tres puntos diferentes del tallo (30, 50 y 60% de su altura) con una frecuencia de 500cpm y una amplitud de 3cm.

**Tercera fase.** En el período de realización de esta evaluación (mediados de diciembre/97 a enero/98) los árboles presentaron mayor proporción de frutos verdes en el árbol, comparado con el período de evaluación de las fases anteriores, lo cual implica una condición desfavorable para la aplicación de vibraciones, debido a la menor presencia de frutos maduros.

Con relación a las condiciones iniciales de las variedades, el análisis de varianza mostró que al menos una de ellas difería de las demás en las variables porcentaje inicial de frutos maduros, verdes y secos, y en el total de frutos (Tabla 5). Se deduce que no hubo homogeneidad en la condición inicial de las variedades. Por ello, al

hacer el análisis de la información se seleccionó como covariable el número total de frutos, para evaluar las variedades en las variables de respuesta: porcentaje de desprendimiento de maduros y pintones, desprendimiento de verdes, porcentaje de frutos verdes en el café cosechado y rendimiento del desprendimiento mecánico.

El análisis de varianza no mostró efecto de la variedad en el porcentaje de desprendimiento de frutos maduros y pintones, frutos verdes y rendimiento del desprendimiento, pero sí, efecto de la variedad en la variable: porcentaje de desprendimiento de hojas. La prueba de comparación de Tukey mostró diferencias a favor de las variedades Caturra rojo y Colombia amarillo (Tabla 6).

El análisis de covarianza mostró efecto de las variedades en el porcentaje de frutos verdes presentes en el café cosechado (Tabla 7).

La mejor respuesta a la aplicación de vibraciones circulares en tres puntos del tallo (30, 50

**TABLA 5.** Proporción media de frutos iniciales en los árboles de café vibrados en la tercera fase de evaluación.

| Tratamiento            | TOTAL   | CV** | MPI<br>[ % ] | CV   | VI<br>[ % ] | CV    | SI<br>[ % ] | CV   |
|------------------------|---------|------|--------------|------|-------------|-------|-------------|------|
| Var. Caturra rojo      | 1.090b* | 50,7 | 34,7a        | 19,1 | 15,3b       | 113,5 | 50,0a       | 30,9 |
| Var. Colombia amarillo | 2.712a  | 36,3 | 22,0b        | 30,2 | 67,5a       | 10,9  | 10,5b       | 51,4 |
| Var. Colombia rojo     | 2.216ab | 87,7 | 15,0b        | 68,0 | 58,6a       | 49,6  | 26,4b       | 96,5 |

\*En una columna promedios seguidos por la misma letra no presentan diferencias significativas. Tukey al 5 %

\*\*Los datos del análisis de varianza fueron transformados a  $(X+5)^{1/5}$ .

**TABLA 6.** Respuesta de tres variedades de café a la aplicación de vibraciones circulares en la selectividad, defoliación y rendimiento de la recolección en la tercera fase de evaluación.

| Tratamiento            | DMP<br>[ % ] | CV** | DV<br>[ % ] | CV    | DH<br>[ % ] | CV   | R<br>[ kg CC/h ] | CV   |
|------------------------|--------------|------|-------------|-------|-------------|------|------------------|------|
| Var. Caturra rojo      | 63,1a*       | 28,7 | 32,6a       | 80,5  | 3,3b        | 46,5 | 70,3a            | 47,6 |
| Var. Colombia amarillo | 37,6a        | 62,7 | 15,5a       | 116,4 | 3,2b        | 35,6 | 61,3a            | 44,5 |
| Var. Colombia rojo     | 53,5a        | 64,3 | 21,3a       | 108,4 | 6,2a        | 72,8 | 50,5a            | 55,4 |

\*En una columna promedios seguidos por la misma letra no presentan diferencias significativas. Tukey al 5 %

\*\*Los datos del análisis de varianza fueron transformados a  $(X+5)^{1/5}$ .

**TABLA 7.** Promedio y error de estimación del porcentaje de frutos verdes en el café cosechado.

| Tratamiento            | VC** [ % ] | E.E. |
|------------------------|------------|------|
| Var. Caturra rojo      | 10,0b*     | 4,78 |
| Var. Colombia amarillo | 33,2a      | 4,62 |
| Var. Colombia rojo     | 28,8a      | 4,41 |

\* En la columna, promedios seguidos por la misma letra no presentan diferencia estadística. Tukey al 5%

\*\* Promedio ajustado por la covariable total de frutos.

y 60% de su altura total) durante un tiempo de 40 segundos (13,3 segundos por punto de aplicación) con una frecuencia de 500cpm y una amplitud del movimiento de 3cm, se obtuvo en la variedad Caturra de fruto rojo. Este resultado estuvo influenciado por el mayor porcentaje de frutos maduros y pintones y el menor porcentaje de frutos verdes iniciales en el árbol, comparados con las otras variedades. Adicionalmente, los árboles de variedad Colombia fruto amarillo presentaron en promedio una altura significativamente mayor que las otras variedad

des, ofreciendo mayor rigidez en el punto de agarre, es decir, mayor exigencia de potencia y menor transmisibilidad.

**Daño físico a los árboles.** Se realizaron observaciones del daño físico ocasionado por la fuerza de excitación aplicada al tallo en el punto de agarre del mecanismo vibrador. El registro se hizo en 131 árboles y los resultados fueron los siguientes; 16 cafetos resultaron descopados, es decir un 12,2% (Figura 12), 64 (48,9%) tallos fueron anillados o se desprendió su corteza (Figura 13) y un 30,5% (40 árboles) presentaron desprendimiento de ramas, el cual correspondió al 0,9% del total de ramas (12.344) de todos los árboles.

El descortezamiento del tallo, principal problema fisiológico ocasionado al cafeto por la eliminación de los vasos conductores de agua desde la parte superior hasta la raíz, con el consecuente secamiento superior del árbol a partir del punto de agarre se produjo con la



**Figura 12.** Cafeto descopado por acción de la vibración circular aplicada al tallo.



**Figura 13.** Anillamiento de la corteza del tallo en el punto de sujeción.



**Figura 14.** Detalle de la necrosis generada a los tres meses sobre la zona anillada en el tallo.

mayor amplitud, equivalente a 3cm. A pesar que el sistema de agarre fue recubierto con un polímero de 5mm de espesor, este no fue suficiente para evitar el daño por fricción durante el movimiento. Observaciones a los tres meses mostraron necrosis en el área anillada y síntomas de pudrición (Figura 14). También se observaron chupones en formación justo debajo del anillo, como respuesta al posible secamiento (Figura 15).



**Figura 15.** Emisión de brotes o chupones como respuesta de la planta al daño causado por el equipo vibrador.

Como resultado de esta investigación se encontró que las vibraciones circulares aplicadas en dos o en tres puntos del tallo del café con la combinación de baja frecuencia (500cpm) y gran amplitud (3cm) resultan promisorias como principio para la recolección mecánica por vibración del café variedad Caturra o Colombia; no obstante, se recomienda investigar las vibraciones circulares utilizando alta frecuencia (más de 1.500cpm) y baja amplitud (menos de 2cm) con el propósito de disminuir el daño físico al cafeto, lo cual se podría conseguir utilizando un vibrador de masas excéntricas desbalanceadas de bajo peso. Se recomienda evaluar esta clase de prototipos en la época de cosecha principal (60% o más de frutos maduros y pintones en el árbol) para evaluar el verdadero potencial que se puede alcanzar en su rendimiento.

## AGRADECIMIENTOS

Al Dr. Celso Arboleda, al personal de la Estación Central Naranjal y a los auxiliares de investigación de Ingeniería Agrícola de Cenicafé, Mario Espinoza, Ricardo Grisales y Farid Lopez por su permanente colaboración.

## LITERATURA CITADA

1. CENTRONACIONAL DE INVESTIGACIONES DE CAFÉ, Cenicafé. Informe anual de labores de la Disciplina de Ingeniería Agrícola 1995-1996. Chinchiná, Cenicafé, 1996. s.p.
2. CIRO, H. J. Estudio dinámico de la rama de café para el desarrollo de la cosecha mecánica por vibración. Medellín, Universidad Nacional de Colombia. Facultad de Ciencias Agropecuarias, 1997. 98 p. (Tesis: Ingeniero Agrícola).
3. FRIDLEY, R. B.; ADRIAN, P. A. Some aspects of vibratory fruit harvesting. *Agricultural Engineering* 41(1): 28-31. 1960.
4. FRIDLEY, R. B.; LORENZEN, C. Computer analysis of tree shaking. *Transactions of the ASAE* 8(1): 8-11,14. 1965.
5. FRIDLEY, R.B.; YUNG, C. Computer analysis of fruit detachment during tree shaking. *Transactions of the ASAE* 18(3): 475 - 481. 1975.
6. HUSSAIN, A. M.; REHKUGLER, G. E.; GUNKEL, W.W. Tree limb response to a periodic discontinuous sinusoidal displacement. *Transactions of the ASAE* 18(2): 614 - 617. 1975.
7. MARTÍNEZ R., A.; MORALES, F. J.; GOMEZ, A. D.; ALOYSIUS, H. N. Determinación de parámetros de un órgano de trabajo para cosecha mecanizada de café por vibración. *In: Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias* 2 (3): 27-49. 1989.
8. MONROE, G. E.; WANG, J. K. Systems for mechanically harvesting coffee. *Transactions of the ASAE* 11(2): 270-272, 278. 1968.
9. PHILLIPS A., L. Computer formulation of forced vibrations of tree limbs with secondary branches. Davis, University of California, 1967. 154 p. (Tesis: Ph. D: Engineering Agricultural).
10. REVOLUCIONARÁ la recolección de café esta nueva máquina? *Agricultura de las Américas* 15(7) : 46 - 47. 1966.
11. SHELLENBERGER, F. A.; MYERS, A. L.; MONROE, G. E. Hand-carried, coffee-harvesting equipment. *Transactions of the ASAE* 12(6): 763 - 765. 1969.
12. SRIVASTAVA, A. K.; GOERING, C. E.; ROHRBACH, R. P. Engineering principles of agricultural machines. Michigan, Pamela DeVore-Hansen Editor, 1993. 601 p.
13. WANG, J. K. Mechanical coffee harvesting (Part A, B). *Transactions of the ASAE* 8(3): 400 - 405. 1965.
14. WANG, J. K.; SHELLENBERGER, F.A. Effects of cumulative damage due to stress cycles on selective harvesting of coffee. *Transactions of the ASAE* 10 (2): 252 - 255. 1965.
15. WONG, C. K. Dynamics of a torsional type inertial coffee harvester. Honolulu, University of Hawaii, 1995. 66 p. (Tesis: M. Sc.: Mechanical Engineering)
16. YUNG, C.; WANG, J.K. Response of coffee laterals to circular base motion. *Transactions of the ASAE* 12 (5): 580 - 583. 1969.