

ESTUDIO EXPERIMENTAL DE LA DINAMICA DE LAS VIBRACIONES LONGITUDINALES Y TRANSVERSALES APLICADAS A LAS RAMAS DE CAFE

Héctor José Ciro V.; Fernando Alvarez Mejía; Carlos Oliveros Tascón³

RESUMEN

Ramas de café variedad Colombia fueron sometidas a la aplicación de vibraciones longitudinales y transversales en rangos de frecuencia cercanos a la frecuencia de resonancia del sistema fruto-pedúnculo en su estado de madurez maduro. Las vibraciones transversales fueron aplicadas a lo largo de la longitud de la rama en uno y dos puntos de forma simultánea. Los resultados indicaron que vibrando la rama de café en un rango de 1.400 a 1.500 c.p.m. con amplitudes de 1,5 cm, se logra desprender más del 85% de los frutos presentes en la rama con un tiempo de vibración (tiempo de residencia) menor a 9 segundos. Se observó la aparición del primer modo para la vibración longitudinal y los modos 2 y 3 para las vibraciones transversales aplicadas en dos y un solo punto respectivamente.

Palabras Clave: Cosecha, Vibración, Café, frecuencias de resonancia, modo de vibración.

¹ Ingeniero Agrícola. Disciplina de Ingeniería Agrícola CENICAFE.

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

³ Investigador Científico III. Disciplina de Ingeniería Agrícola. CENICAFE. Apartado 2427 Manizales.

ABSTRACT

Longitudinal and transverse vibrations were applied to branches of coffee Colombia variety in ranges of frequency near to the resonance frequency of the fruit-stem system in its mature state of maturity. The transverse vibrations were applied along the branch length in one and two points in a simultaneous way. The results have indicated that vibrating the coffee branch with a frequency of 1.400 to 1.500 c.p.m with amplitudes of 1,5 cm., it is possible to remove more than 85% of ripe cherries present in the branch with a vibration time (residence time) smaller than 9 seconds. The appearance in the first mode was observed for longitudinal vibration and the modes 2 y 3 for the transvers vibrations applied respectively in two and single point, respectively.

Key words: Harvest, Vibration, Coffe, Frecuencies of resonance, mode vibration.

INTRODUCCIÓN

La tecnología utilizada actualmente para cosechar café se desarrolló en zonas planas con base a la existente para otros arbustos como cerezas. En estas tecnologías se aplican vibraciones a todo el follaje del árbol por medio de varillas de fibra de vidrio de hasta 40 cm de longitud que vibran a 800 c.p.m. amplitud variable (de 2,0 cm en el eje hasta 5,0 cm en el extremo de la varilla). La selectividad, en general, no es compatible con los estándares de calidad exigidos en Colombia para la recolección del café.

La técnica de las vibraciones mecánicas ha sido estudiada teórica y experimentalmente para el desprendimiento del café en Hawai

por Wang (1965), Shellenberger y Wang (1967) y Yung (1975), en Cuba por Martínez *et al* (1989) y en Colombia *Ciro et al* (1998). Los resultados obtenidos por estos autores, utilizando vibraciones transversales aplicadas en un sólo punto, en general, indican un alto desprendimiento de cerezas maduras (<90%), selectividad baja (desprendimiento de cerezas verdes > 20%) en tiempos de aplicación relativamente bajos (<10s).

Los estudios realizados por *Ciro et al* (1998), aplicando vibraciones transversalmente en un sólo punto, indican que a una frecuencia de 1.500 c.p.m., frecuencia de resonancia del fruto maduro, la rama vibra en su tercer y/o cuarto modos de vibración lo cual hace que parte

de ella experimente puntos de cero amplitud de respuesta a la excitación (no se desprende café) y puntos con alta amplitud de respuesta, en los cuales se generan grandes fuerzas inerciales, las cuales ocasionan el desprendimiento masivo no-selectivo del grano (se desprenden cerezas verdes, racimos, etc).

Como alternativa para obviar las limitaciones mencionadas se tiene la aplicación de vibraciones en varios puntos (simultáneamente) y el uso de vibraciones longitudinales. En ensayos preliminares realizados en el laboratorio de cosecha mecánica de CENICAFÉ, se observó que aplicando transversalmente las vibraciones (1.500 c.p.m. y 2,0 cm de amplitud), en dos puntos simultáneamente, se logra disminuir notoriamente el desprendimiento de cerezas verdes (15,0%) cuando el tiempo de aplicación es de 2 s. Así mismo se demostró teóricamente, que la rama vibra en su primer modo cuando se la excita con vibraciones longitudinales a la frecuencia de resonancia de los frutos maduros.

En ésta investigación se exploraron alternativas para mejorar la selectividad en el desprendimiento de café con vibraciones mecánicas y con el objetivo fundamental de

estudiar en forma experimental el efecto de la aplicación de vibraciones longitudinales y transversales en el desprendimiento del fruto de café. La información obtenida será de gran utilidad para orientar nuevas investigaciones y para el desarrollo y/o operación de equipos para la recolección mecanizada del café en Colombia.

REVISION DE LITERATURA.

Thimoshenko y Young (1955) y Thomson (1998) definen las vibraciones longitudinales como aquellas en las cuales el movimiento del cuerpo (en este caso la rama de café) es consecuencia de la aplicación de fuerzas axiales actuando en forma paralela al eje neutro de la sección transversal. Los mismos autores comentan que las vibraciones de tipo transversal son originadas por fuerzas que actúan en forma perpendicular al eje neutro del elemento.

Eisley (1989), define un modo normal de vibración, como la configuración de desplazamientos que tiene lugar en un elemento estructural, cuando la frecuencia de vibración se aproxima al valor de su frecuencia natural y/o de resonancia.

Aristizabal (1997) y Ciro (1998), citan una amplia bibliografía, en la cual se distinguen las investigaciones adelantadas en Hawai a partir del año 1965 por Wang y Shellenberger, en Cuba en el año 1988 por Martínez y por Alvarez en CENICAFÉ en el año 1993. Además se hace una extensa recopilación de los modelos teóricos propuestos para predecir las frecuencias de resonancia considerando el análisis del sistema - fruto - pedúnculo - rama - tallo, ideándolo totalmente mecánico, elástico e isotrópico.

Ciro *et al* (1998), en investigaciones adelantadas en CENICAFÉ, determinaron con los modelos de un solo grado de libertad y el de dos grados de libertad propuesto por Martínez *et al* (1988), las frecuencias de resonancia del sistema fruto-pedúnculo (S.F.P) del café Variedad Colombia. Los resultados indicaron que las frecuencias naturales, las cuales se determinaron con las propiedades físico-mecánicas del sistema fruto - pedúnculo, disminuyen a medida que se incrementa el estado de madurez, siendo estadísticamente iguales para la cereza madura y pintona. Los mismos autores encontraron que vibrando la rama en forma transversal a la frecuencia correspondiente al fruto maduro, con

una amplitud de 1,5 cm aplicada a L/3 sobre la longitud de la rama se logra desprender en 5 s. el 75% de los frutos maduros presentes en la rama con un porcentaje de verdes en la masa final cosechada del 30%, siendo este desprendimiento más función del incremento de la amplitud que de la frecuencia. Pero en la banda de frecuencias entre 1.500 a 8.000 c.p.m., se prevee baja selectividad debido al traslape o escasas diferencias entre las zonas de resonancia para el fruto maduro, pintón y verde.

Considerando la rama de café como una viga empotrada en voladizo, en CENICAFÉ se estudió el comportamiento modal de la rama de café bajo análisis dinámicos de vibración, determinando las frecuencias de resonancia para vibraciones aplicadas en forma transversal y longitudinal y el factor de amortiguamiento en forma transversal. Los resultados indicaron que cuando se vibra la rama de café en forma transversal a la frecuencia de resonancia del S.F.P., en su estado de madurez maduro, la rama experimenta su tercer y/o cuarto modo de vibración, mientras con la vibración longitudinal con el mismo valor de frecuencia, la rama experimenta su primer modo de vibración. Además los autores comenta que la rama de café es un

sistema subamortiguado y por lo tanto de forma individual de bajo desperdicio de energía y potencia (Ciro *et al* 1998).

MATERIALES Y METODOS

El trabajo de investigación fue realizado en el laboratorio de cosecha mecánica de CENICAFÉ, en el departamento de Ingeniería Agrícola con el apoyo de la Estación Central de Naranjal. Con el propósito de cumplir con los objetivos propuestos, ésta investigación fue llevada a cabo con

café variedad Colombia en dos etapas; la primera consistió en evaluar las vibraciones transversales en la rama de café y la segunda etapa en evaluar las vibraciones longitudinales.

PRIMERA ETAPA . Se utilizó el dispositivo vibratorio utilizado por *Ciro (1997)*, al cual se le acopló en el extremo de la manivela un mecanismo que permitió fijar la rama en dos puntos permitiendo variar la distancia de separación entre ellos (*Figura 1*).

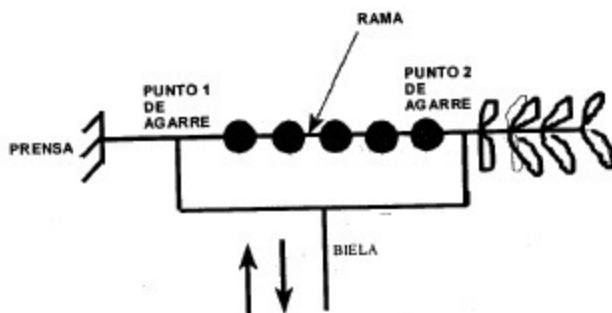


Figura 1. Vibración transversal de la rama de café considerando dos puntos de aplicación simultáneos.

En el contra-eje del dispositivo experimental mostrado en la Figura 2, se colocaron excéntricas con amplitudes de vibración de 1,0 y 1,5 cm, acopladas a una manivela de 1 m. de longitud para producir el movimiento rectilíneo alternativo. En el extremo de la manivela se

acopló 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 frecuencias a 1.500 c.p.m .

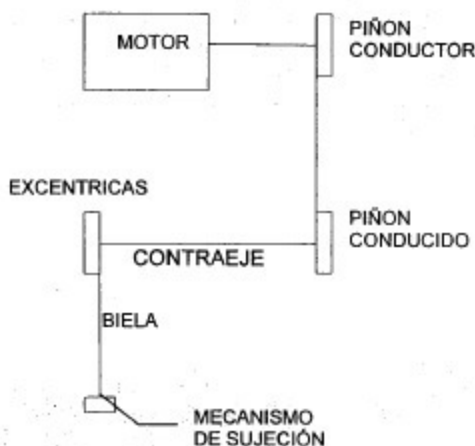


Figura 2. Dispositivo experimental para vibrar ramas de café en forma unidireccional (longitudinal y transversal).

Para los ensayos se utilizaron ramas con frutos de café variedad Colombia(216 en total) obtenidas al

azar de las zonas productivas de diferentes árboles, correspondientes a una cosecha principal y las cuales

se llevaron al laboratorio de cosecha mecánica para ser vibradas. Cada rama se fijó 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. Las ramas fueron vibradas considerando dos puntos de excitación simultánea variando la distancia de separación entre ellos en un 25%, 35% y 45% expresados como un porcentaje de la longitud de la rama, con un tiempo de vibración de 3, 6, 9 y 12 s. y amplitudes de vibración entre 1,0 y 1,5 cm. 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:

$$D_{ij} = \frac{FD_{ij}}{FD_{ij} + FND_{ij}} \cdot 100$$

De la expresión anterior resulta el porcentaje de frutos desprendidos en cada rama, para cada estado de madurez del fruto (maduro, pintón y verde), donde:

- i: Grado de madurez (maduro + pintón y verde)
- j: Número de rama

- Dij: Porcentaje de desprendimiento de frutos de estado de madurez i en la rama j
- FNDij: Frutos del estado de madurez i, no desprendidos en la rama j
- FDij: Frutos del estado de madurez i, desprendidos en la rama j

El porcentaje final de frutos verdes en la masa cosechada (factor de calidad de cosecha) se determinó como:

$$PVM_j = \frac{FVD_j}{FMD_j + FPD_j + FVD_j} \cdot 100$$

Donde:

- PVMj: Porcentaje de verdes en la masa cosechada en la rama j.
- FMDj: Frutos maduros desprendidos en la rama j.
- FPDj: Frutos pintones desprendidos en la rama j.
- FVDj: Frutos verdes desprendidos en la rama j.

El porcentaje de desprendimiento teniendo como base los frutos de los tres estados de maduración de la rama (Maduro, pintón y verde) iniciales en la rama, se estimó de la siguiente manera:

$$PDF_{ij} = \frac{FD_{ij}}{FMI + FPI + FVI}$$

En este caso, el valor de desprendimiento dado por la anterior expresión, tiene que ser relacionado con el porcentaje de maduración presente inicialmente en la rama, donde:

- FDij: Frutos desprendidos del estado de madurez *i* en la rama *j*
 FMI: Frutos maduros iniciales en la rama
 FPI: Frutos pintones iniciales en la rama
 FVI: Frutos verdes iniciales en la rama.

En el cálculo de los porcentajes de desprendimiento se tomó la combinación maduro+pintón, como el grado de madurez fisiológicamente maduro.

El efecto de los tratamientos se evaluó bajo un modelo de análisis para el diseño completamente aleatorizado en arreglo factorial 4 x 2 x 3 (4 tiempos de vibración, 2 amplitudes y 3 distancias de separación entre los puntos de aplicación), en la variable respuesta proporción de frutos maduros + pintones y verdes desprendidos. La

unidad experimental fue la rama con frutos de café y por tratamiento se obtuvieron 9 unidades experimentales.

SEGUNDA ETAPA. Se utilizó el dispositivo mecánico citado anteriormente, pero modificando su estructura de sujeción a la rama (Figura 3). Para ello en el extremo de la manivela se colocó un dispositivo que permitió fijar la rama, logrando vibrar en forma longitudinal. El prototipo fue evaluado en una cosecha principal.

De la Subestación Naranjal se tomaron 256 ramas con frutos de café variedad Colombia, escogidas en forma aleatoria de la zona productiva de diferentes árboles. 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, con un tiempo de vibración de 3, 6, 9 y 12 s, amplitudes de 1,0 y 1,5 cm y frecuencias de vibración de 1.200, 1.400, 1500 y 1.600 c.p.m. Después de efectuar la vibración se contaron los frutos de café maduros, verdes y pintones que quedaron en la rama y los que fueron desprendidos. Los porcentajes de desprendimiento se determinaron, en forma similar a lo realizado para las vibraciones transversales.

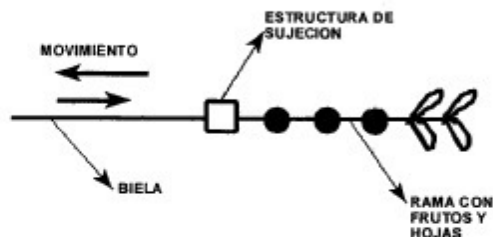


Figura 3. Vibración unidireccional longitudinal en ramas de café.

El efecto de los tratamientos se evaluó bajo un modelo de análisis para el diseño completamente aleatorizado en arreglo factorial $4 \times 2 \times 4$ (4 tiempos de vibración, 2 amplitudes y 4 frecuencias de vibración), en las variables de respuesta proporción de frutos maduros + pintones, y verdes desprendidos. La unidad experimental fue la rama con frutos de café y por tratamiento se vibraron 8 unidades experimentales.

Una vez obtenido el mejor tratamiento de las formas de vibración: Transversal y Longitudinal, correspondientes a la etapa 1 y 2, se procedió a compararlos a través de una prueba F según ANAVA de una sola vía. Empleando el mismo análisis estadístico fue comparada la vibración transversal en dos puntos con la de un solo punto y ésta última con la longitudinal.

RESULTADOS Y DISCUSION

VIBRACIÓN TRANSVERSAL CONSIDERANDO DOS PUNTOS DE APLICACIÓN

En la Tabla 1, se muestra el análisis de varianza de un sola vía a un nivel de significancia del 5%, para las diferentes variables respuesta. Se observa que las muestras son homogéneas (PFMPi) y que hay efecto de los factores amplitud, frecuencia y distancia de

aplicación de la vibración en la proporción de desprendimiento de frutos maduros más pintones (PDFMP) y en la variable proporción de frutos verdes no desprendidos (PNDFV). Ya que estos análisis estadísticos no mostraron efecto de los factores en la variable PDFV (proporción de frutos verdes desprendidos), el efecto de la vibración en el desprendimiento de frutos verdes, se analizó a través de la variable PNDFV.

Tabla 1. Análisis de Varianza para la variable de respuesta desprendimiento de frutos de café.

VARIABLE	PROBABILIDAD(p)
PFMPi	0,5077
PDFMP	0,0001
PNDFMP	0,0001
PFVi	0,3347
PDFV	0,7055
PNDFV	0,0001

En la Tabla 2, se muestra el análisis de varianza en las interacciones significativas para las variables PDFMP y PNDFV. Los análisis indicaron que hay efecto de

los factores por separado. Para las dos variables de análisis consideradas, no hay efecto de la interacción de segundo orden.

Tabla 2. Análisis de varianza para las variables proporción de desprendimiento de frutos maduros + pintones (PDFMP) y proporción de frutos verdes no desprendidos (PNDFV).

VARIABLE	INTERACCION	PROBABILIDAD
PDFMP	Tiempo de vibración(Tvib)	0.0004
	Amplitud(Amp)	0.0001
	Distancia(Dis)*	0.0393
PNDFV	Tiempo de vibración(Tvib)	0.0017
	Distancia(Dis)*	0.0001

*Distancia(Dis): Distancia de separación entre los dos puntos de agarre para la vibración transversal.

En la Tabla 3 se muestra la prueba de Tukey al 5% para las variables PDFMP y PNDV.

Tabla 3. Prueba de Tukey, para las variables PDFMP y PNDV.

VARIABLE	FACTOR DE ANALISIS								
	Tvib (segundos)			Amp (cm)			Dis (%)		
PDFMP	3 ^a	6 ^a	9 ^a	12 ^a	1 ^b	1,5 ^b	1 ^b	2 ^a	3 ^a
Promedio (%)	50,3	60,0	60,80	60,26	48,56	66,83	54	59,9	59,5
PNDFV	3 ^a	6 ^{ab}	9 ^b	12 ^b	1 ^a	1,5 ^b	1 ^a	2 ^a	3 ^a
Promedio (%)	10,0	7,25	5,0	6,15	10,25	5,4	8,5	6,75	6,12

** La distancia(Dis) 1, 2 y 3 corresponden respectivamente a un porcentaje del 25, 35 y 45 % de la longitud de la rama respectivamente.

De la Tabla 3, se observa como los tiempos de vibración superiores a 6 segundos, bajo las mismas condiciones de amplitud y distancia, no generan un incremento significativo en el desprendimiento de frutos, maduros, verdes y pintones. Desde un punto de vista técnico, la distancia correspondiente a 0,45L(3), no es recomendable debido a su excesivo quiebre de la rama en el punto de aplicación, debido a que generalmente coincide con la parte verde de la rama. Este hecho se puede atribuir a que el mecanismo de agarre produce unos esfuerzos de tipo cortante y doblamiento (BUCKLING), mayores a los esfuerzos que la rama resiste

en esa sección. Además se presenta una reducción gradual del diámetro, lo cual contribuye a que sea un zona alta de concentración de esfuerzos.

A partir de los análisis estadísticos y de los criterios técnicos citados anteriormente para la vibración transversal, se tiene que las mejores condiciones se logran en un tiempo neto de vibración (tiempo de residencia) de 6 segundos, una amplitud de 1,5 cm y una distancia de separación entre los punto de agarre(Dis) de 0,35L. En la Tabla 4, se indican los promedios para las diferentes variables respuestas.

Tabla 4. Promedios de desprendimiento(%) del fruto de café en sus diferentes estados de madurez, en la vibración transversal considerando dos puntos de vibración simultáneos.

Variable	PFMPi	PDFMP	DMP	PFVi	PDFV	DV	PVM
Promedio(%)	84	65	77	16	11	69	14,5

Los resultados de la Tabla 4, indican, que vibrando la rama con las condiciones anteriormente anotadas, de 84 frutos entre maduros y pintones, se logra desprender 65 frutos, lo que traducido a la variable DMP, significa que de 100 frutos maduros y pintones iniciales en la

rama antes de vibrar, se desprenden 77. Razonamiento similar se hace para la variable desprendimiento de frutos verdes (DV), indicando que de 100 frutos verdes iniciales, se desprenden 69. La combinación del desprendimiento de frutos maduros, pintones y verdes bajo las

condiciones de maduración del 84 %, indican que de 100 frutos desprendidos (maduros + pintones y verdes), 15 frutos verdes se logran desprender (PVM = 15 %). La variable PVM, es un indicador de la calidad del café cosechado y el cual va al proceso de beneficio.

En la Figura 4, se observa el desprendimiento de frutos maduros + pintones (DMP) y el

indicador de cosecha (PVM) para una condición de maduración (pintones + maduros) del 83 %, amplitud de 1,5 cm y una distancia de separación entre los puntos de agarre del vibrador de 0,35L. Hay un notorio desprendimiento de frutos fisiológicamente maduros en la zona correspondiente a los tiempos de 6 a 9 segundos. No hay cambios notorios en el indicador de cosecha (PVM).

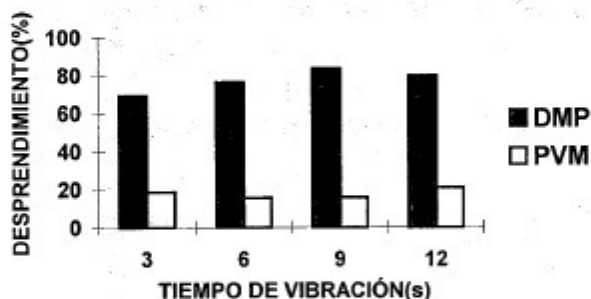


Figura 4. Desprendimiento de café fisiológicamente maduro y el indicador de cosecha, según el tiempo de vibración.

En la Figura 5, se observa el desprendimiento de frutos maduros + pintones (DMP) y verdes (DV). Hay una tendencia

generalizada a desprender más frutos a medida que se incrementa la amplitud. Se observa que la zona de vibración óptima para lograr un valor de desprendimiento superior al

78 % de frutos maduro+pintones(DMP), está en la zona correspondiente a los tiempos de 6 y 9 segundos.

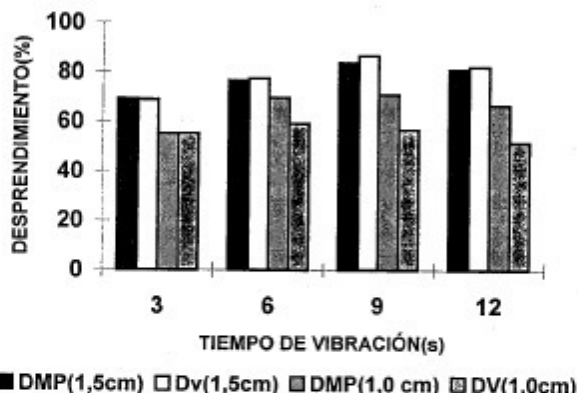


Figura 5. Porcentaje de desprendimiento de frutos maduros y verdes según la amplitud de vibración.

Con el propósito de establecer diferencias entre el número de puntos de vibración simultáneos, se comparó el mejor tratamiento encontrado anteriormente para la vibración transversal considerando dos puntos de agarre, con el mejor tratamiento de vibración transversal con un solo punto de aplicación encontrado por Ciro (1997). Los

resultados estadísticos evaluados bajo un análisis de varianza y una prueba de Tukey al 5% , se muestran en la Tabla 5. El análisis de Varianza mostró diferencias en las variables desprendimiento de frutos (PDFMP, DMP, PDFV, DV y PVM) pero no el porcentaje de maduración(PFMPi).

Tabla 5. Comparación de la vibración transversal en dos y un solo punto de aplicación.

Tipo de Vibración	VARIABLE DE RESPUESTA						
	PFMPi	PDFMP	DMP	PFVi	PDFV	DV	PVM
1 Punto (%)	79,5 ^a	47,45 ^A	59,68 ^A	20,5 ^A	10,90 ^A	53,17 ^A	18,68 ^A
2 puntos (%)	76,4 ^a	54,12 ^B	86,87 ^B	29,6 ^A	23,55 ^B	79,56 ^B	30,32 ^B

De la Tabla 5, se concluye que la vibración transversal en dos puntos comparada con la de un solo punto, es mucho más efectiva en el desprendimiento de frutos maduros + pintones (DMP, PDFMP), en el desprendimiento de verdes (DV) pero no en el factor de calidad de cosecha (PVM). Lo anterior indica que la vibración simultánea en dos puntos bajo los parámetros de vibración establecidos y condiciones de maduración, es un método de desprendimiento masivo de frutos (Maduros, pintones y verdes), pero no selectivo.

Con la aplicación de vibraciones transversales considerando dos puntos de vibración simultáneos, con amplitudes de 1,5 cm y puntos de agarre a 0, 35L y 0,45L, se logra un desprendimiento de frutos maduros + pintones (DMP) superiores al

80%. El caso más favorable se logra conservando las condiciones anteriormente anotadas, pero vibrando a 12 s, lográndose un valor de desprendimiento de un máximo del 95%. Pero este tiempo de vibración de 12s, no es recomendable desde el punto de vista técnico, ya que ocasiona un excesivo desperdicio de energía, lo cual se traduce en pérdida no controlada de potencia, incremento de defoliación y desprendimiento masivo de frutos verdes.

En la Figura 6 y 7, se observa la configuración de desplazamiento de la rama de café vibrada a la frecuencia de resonancia del sistema fruto pedúnculo del café maduro (1.500 c.p.m) tanto en vibración transversal en dos y un solo punto respectivamente. Los desplazamientos indican una desaparición

de un nodo a favor de la transversal en dos puntos. El desprendimiento masivo pero no selectivo para la vibración transversal en dos puntos, se debe a que bajo estas condiciones, la rama de café experimenta una amplitud más constante y uniforme,

existe una mejor transmisibilidad y movilidad de energía, lo cual originan bajas impedancias mecánicas, situación que se refleja en la desaparición de un nodo de vibración y la aparición de una onda tipo estacionaria.

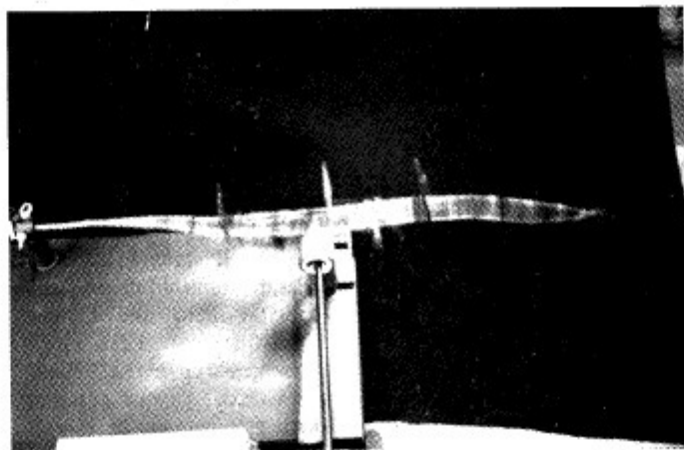


Figura 6. Aparición del segundo modo de vibración en una rama de café vibrada en forma transversal en dos puntos de aplicación a la frecuencia de 1500 c.m.p.

En la Figura 8, se observa el comportamiento de la variable respuesta porcentaje de desprendimiento de frutos maduros + pintones (DMP) según la frecuencia de excitación y tiempo de vibración, dejando constante la amplitud de vibración en 1,5 cm y punto de agarre a 0,35L (2 puntos de vibración simultáneos). La

tendencia es a incrementarse el desprendimiento de frutos a su vez que se incrementa el tiempo de vibración. El mayor desprendimiento de cerezas maduras y pintonas, se logra con una frecuencia de excitación de 1.500 c.p.m., y con tiempo de vibración (tiempo de residencia) de 6 -9 s.

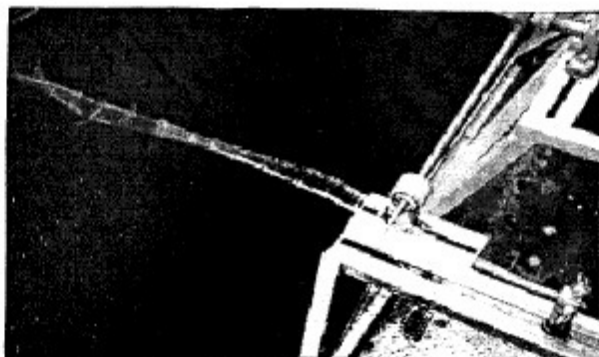


Figura 7. aparición del tercer modo en una rama de café vibrada en forma transversal en un solo punto a la frecuencia de 1500 c.p.m.

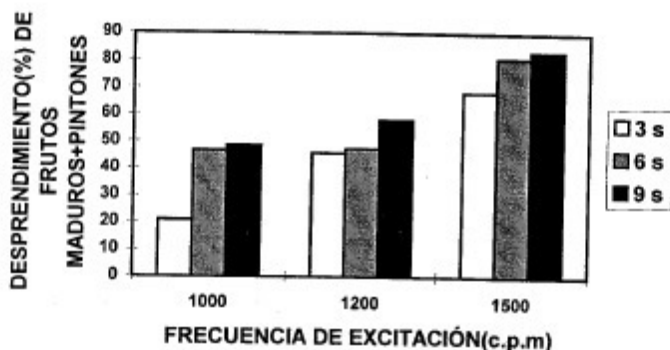


Figura 8. Efecto de la frecuencia y tiempo de vibración para la vibración transversal, en el desprendimiento de frutos maduros.

En la Tabla 6, se presentan los resultados en las variables desprendimiento de frutos de café cereza obtenidos con la aplicación de vibración transversal en dos puntos en forma simultánea con un porcentaje de maduración del 47,72%

(notoriamente inferior al promedio utilizado en los ensayos) y bajo una frecuencia de 1.500 c.p.m., separación entre los dos puntos de agarre de $0,35^*L$., amplitudes de 1,0 y 1,5 cm. y tiempo efectivo de vibración de 6 s.

Tabla 6. Desprendimientos de cereza de café bajo vibración transversal en dos puntos en condiciones de maduración inferiores al 52%.

VARIABLE DE RESPUESTA	DESPRENDIMIENTO (%)	
	1,0 cm.	1,5 cm.
PFMPi	50,22 ^A	46,72 ^A
PDFMP	32 ^A	37 ^A
DMP	65 [*]	80 ^B
PFVi	49,78 ^A	52,28 ^A
PDFV	27 ^A	39 ^B
DV	55 ^A	75 ^B
PVM	45,5 ^A	51,31 ^B

Los resultados de la Tabla 6, indican que el incremento de la amplitud tiende a aumentar notoriamente el desprendimiento de cerezas de café (maduros y verdes) y que el porcentaje de maduración (PFMPi) es un factor que limita la selectividad (PVM). Comparando los resultados obtenidos en las

Tablas 4, 5 y 6 para la vibración transversal en dos puntos, se observa que hay una relación entre la maduración presente (PFMPi) y la selectividad (PVM); a medida que se reduce la maduración del fruto la selectividad tiende a disminuir (PVM aumenta).

VIBRACIÓN LONGITUDINAL

En la Tabla 7, se muestra el análisis de varianza de un sola vía a un nivel de significancia del 5% para las diferentes variables respuesta. Se observa como las muestras son homogéneas (PFMPi) y como hay efecto de los factores

amplitud, frecuencia y tiempo de vibración en la proporción de desprendimiento de frutos maduros más pintones (PDFMP), en la variable proporción de desprendimiento de frutos verdes (PDFV) y en la variable proporción de frutos verdes no desprendidos (PNDFV).

Tabla 7. Análisis de Varianza para la variable de respuesta desprendimiento de frutos de café.

VARIABLE	PROBABILIDAD(p)
PFMPi	0,4987
PDFMP	0,0001
PNDFMP	0,0001
PFVi	0,456
PDFV	0,0001
PNDFV	0,0001

En la Tabla 8, se muestra el análisis de varianza para las variables de interés PDFMP y PDFV. Los análisis indicaron que

hay efecto de los factores por separado para la variable PDFMP y para la variable PDFV hay efecto de la interacción doble .

Tabla 8. Análisis de la interacción para las variables: proporción de desprendimiento de frutos maduros+pintones(PDFMP) y proporción de frutos verdes desprendidos(PDFV).

VARIABLE	INTERACCION	PROBABILIDAD (p)
	Frecuencia(Frec)	0,0001
PDFMP	Tiempo de vibración(Tvib)	0,0001
	Amplitud(Amp)	0,0001
PDFV	Tvib*Amp*Frec	0,011

En la Tabla 9 se muestra la prueba de Tukey al 5% para las variable PDFMP.

Tabla 9. Prueba de Tukey para la variable PDFMP.

VARIABLE	FACTOR DE ANALISIS									
	Tvib (segundos)				Amp (cm)			Frecuencia (c.p.m.)		
PDFMP	3 ^b	6 ^c	9 ^a	12 ^a	1 ^b	1,5 ^a	1 ^c	2 ^{ab}	3 ^a	4 ^a
Promedio (%)	34,7	56,8	69,2	64,4	49,9	62,6	36,9	57,9	63,2	67,1

**El número de frecuencias:1,2,3 y 4 corresponden a los valores de 1.200, 1.400, 1.500 y 1.600 c.p.m. respectivamente.

De la Tabla 9, se observa como amplitud y frecuencia, no generan un incremento significativo en el desprendimiento de frutos maduros tiempos de vibración superiores a 6 s, bajo las mismas condiciones de

y pintones. Desde un punto de vista técnico, tiempos superiores a 9s, no es lo más recomendable, debido al consumo de energía y daño que se le puede ocasionar a la estructura ramal del árbol de café. Similar tendencia se observa para la frecuencia de excitación, definiendo el rango óptimo de frecuencias, considerando el sentido longitudinal, alrededor de los 1.400 a 1.500 c.p.m.

Los análisis estadísticos y los criterios técnicos evaluados para la vibración longitudinal, teniendo en

cuenta el análisis citado anteriormente (Tabla 9) como la selección del mejor tratamiento en la interacción doble para la variable proporción de desprendimiento de frutos verdes (PDFV), se tiene que las mejores condiciones en desprendimiento de cerezas de café se obtienen con un tiempo neto de vibración de 6 s, una amplitud de 1,5 cm y una frecuencia de excitación de 1.400 c.p.m. En la Tabla 10, se indican los promedios para las diferentes variables respuestas.

Tabla 10. Promedios de desprendimiento(%) del fruto de café en su diferentes estados de madurez, considerando la vibración en sentido longitudinal.

Variable	PFMPi	PDFMP	DMP	PFVi	PDFV	DV	PVM
Promedio (%)	81,8	73,58	90,9	18,2	12,11	66,53	14,13

Los resultados de la Tabla 10, indican que vibrando la rama con las condiciones anteriormente anotadas, de 82 frutos entre maduros y pintones, se logra desprender 74 frutos, lo que traducido a la variable DMP, significa que de 100 frutos maduros y pintones iniciales en la rama antes de vibrar, se desprenden 91. Razonamiento similar se hace para la variable

desprendimiento de verdes (DV), indicando que de 100 frutos verdes iniciales, se desprenden 67. La combinación del desprendimiento de fruto maduros, pintones y verdes bajo las condiciones de maduración del 82%, indican que de 100 frutos desprendidos (maduros + pintones y verdes), 14 frutos son verdes (PVM=14%).

En la Figura 9 y 10, se muestra el comportamiento de la variable desprendimiento de frutos maduros + pintones (DMP) y verdes (DV), según la frecuencia y tiempo de vibración para una amplitud cons-

tante de 1,5 cm. Se observa como a medida que se incrementan tanto el tiempo como la frecuencia de vibración hay un mayor desprendimiento de frutos.

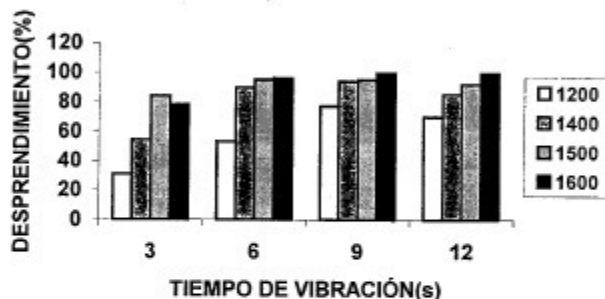


Figura 9. Efecto del tiempo y frecuencia de la vibración longitudinal, en el desprendimiento de frutos maduros.

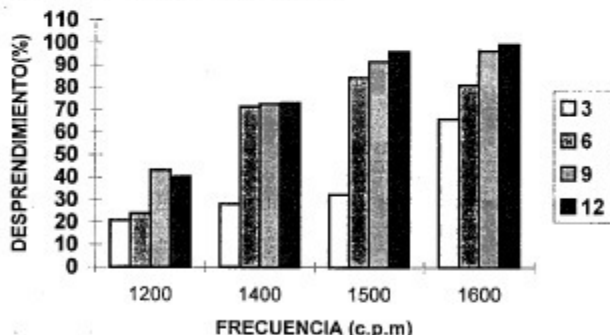


Figura 10. Efecto del tiempo y frecuencia de la vibración longitudinal, en el desprendimiento de frutos verdes.

También se observa como la zona de trabajo para la vibración longitudinal está enmarcada alrededor de los 1.400 a 1.500 c.p.m, donde frecuencias superiores a éstas no representan incrementos notorios en la variable desprendimiento de frutos maduros más pintones (DMP).

En la Figura 11, se observa el efecto de la amplitud en el desprendimiento de frutos maduros + pintones (DMP), en función de la

frecuencia y tiempo de vibración. Para un mismo valor de frecuencia y tiempo, el desprendimiento es mayor a medida que se incrementa la amplitud. Se observa como para los valores de amplitud de 1,5 cm "STROKE de 3 cm" no hay un notorio incremento del desprendimiento para frecuencias superiores a 1.500 c.p.m. Esto indica que efectivamente la zona de trabajo para la vibración longitudinal está situada entre los 1.400-1.500 c.p.m., con amplitudes de 1,5 cm.

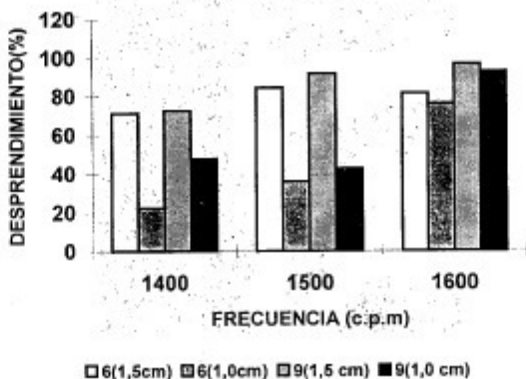


Figura 11. Efecto de la amplitud y frecuencia de la vibración longitudinal, en el desprendimiento de frutos maduros.

En la Figura 12, se observa la configuración de desplazamiento de una rama de café vibrando en sentido longitudinal a la frecuencia

de resonancia del Sistema fruto-pedúnculo maduro (1.500 c.p.m). Se nota el primer modo de vibración de la rama cuyo resultado había sido anticipado por Ciro (1997) y la formación de una onda tipo estacionaria. Situación similar se notó con la vibración transversal en uno y dos puntos. Esto indica que

bajo estos diferentes tipo de vibraciones (longitudinal y transversal), las cerezas de café a lo largo de la longitud de la rama experimentan una amplitud que no es constante para las diferentes cerezas de café, sino que varían de acuerdo a la posición de cada fruto de café.

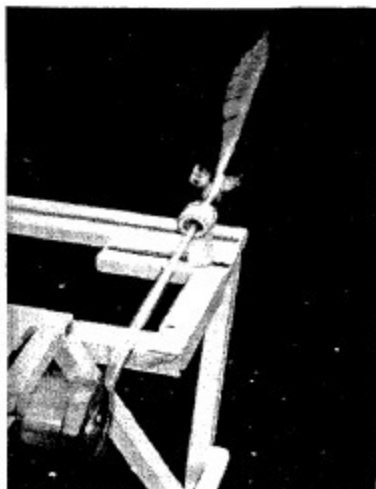


Figura 12. Primer modo de vibración longitudinal de una rama de café

En la Tabla 11, se indica la comparación en desprendimiento de frutos, entre el mejor tratamiento encontrado para la vibración transversal considerando dos puntos

de agarre con el mejor tratamiento de vibración longitudinal. Los resultados estadísticos evaluados bajo un análisis de varianza y una prueba de Tukey al 5 %, se muestran

en la Tabla 11. El análisis de Varianza no mostró diferencias en las variable Proporción de frutos maduros y pintones iniciales (PFMPi) y en el porcentaje de desprendimiento de frutos (PDFMP, DMP, PDFV, DV y PVM). Esto indica, que bajo los parámetros de operación

seleccionados y condiciones de maduración, para los dos tipos de vibración (vibración transversal en dos puntos y longitudinal), se obtienen los mismos desprendimientos de frutos de café, no habiendo ganancia alguna en la selectividad con la aplicación en sentido longitudinal.

Tabla 11. Comparación de la vibración transversal en dos puntos y la longitudinal.

TIPO DE	VARIABLE DE RESPUESTA						
VIBRACION	PFMPi	PDFMP	DMP	PFVi	PDFV	DV	PVM
Longitudinal (%).	81,8 [*]	73,58 ^A	90,9 ^A	18,2 ^A	12,11 ^A	66,53 ^A	14,13 ^A
Transversal 2 puntos (%).	84,2 [*]	65,5 ^A	77,8 ^A	15,8 ^A	11,52 ^B	72,9 ^A	14,5 ^A

En la Tabla 12, se muestra la comparación de la vibración longitudinal con la transversal, pero ésta última con un solo punto de excitación. Los resultados indicaron que en sentido longitudinal se desprende más frutos fisiológicamente maduros (DMP, PDFMP) comparada con la transversal en un solo punto, pero los dos tipos de vibración desprenden estadísticamente la misma cantidad de frutos verdes (PDFV, DV).

Los análisis de frecuencia óptimas de vibración 1500 c.p.m para la vibración transversal y 1400 c.p.m para la vibración longitudinal, indica que para lograr un desprendimiento masivo y selectivo del fruto de café sometiendo directamente el árbol a vibración, es posible que la técnica de las vibraciones multidireccionales sea recomendable, con el fin de que todas las ramas en el follaje del árbol experimenten una acción

combinada de vibración longitudinal y transversal.

Tabla 12. Comparación del efecto de la vibración transversal aplicada en un solo punto con la longitudinal.

TIPO DE VIBRACION	VARIABLE DE RESPUESTA						
	PMPi	PDFMP	DMP	PFVi	PDFV	DV	PVM
Longitudinal (%)	81,8 ^a	73,58 ^a	90,9 ^a	18,2 ^a	12,11 ^a	66,53 ^a	14,13 ^a
Transversal 1 puntos (%)	79,5 ^a	47,55 ^b	59,68B	20,5 ^a	10,9 ^a	53,17 ^a	18,68 ^a

En la Tabla 13, se observa el efecto de la vibración longitudinal bajo una frecuencia de 1.500 c.p.m., amplitud de 1,5 cm y tiempo de

vibración (tiempo de residencia) de 6 s. en el desprendimiento de cerezas de café, para una condición de maduración del 55,78%.

Tabla 13. Efecto de la maduración para la vibración longitudinal en el desprendimiento de cerezas de café.

Variable	PFMPi	PDFMP	DMP	PFVi	PDFV	DV	PVM
Promedio (%)	55,78	50	88,5	44,22	27,6	62,5	35,5

Comparando estos resultados con los de la Tabla 10, se observa como la maduración (PFMPi) está relacionada con la selectividad (PVM). El factor de calidad de cosecha (PVM) o selectividad tiende a disminuir (PVM aumenta) a medida que se disminuye la

maduración. Estos mismos resultados se encontraron para la vibración transversal indicando que la maduración es un factor limitante en los parámetros operación del equipo de vibración (Frecuencia, amplitud y tiempo de vibración).

ANÁLISIS DE LA PRESENCIA DEL MOMENTO FLECTOR EN EL DESPRENDIMIENTO DEL FRUTO DE CAFÉ.

Los resultados estadísticos para los frutos de café desprendidos en los diferentes estados de madurez (Maduro, pintón y verde) tanto para la vibración transversal en dos puntos de vibración simultánea y la longitudinal, indicaron que el desprendimiento del **fruto maduro** es debido a la presencia del momento flector originado en la zona de abscisión fruto-pedúnculo (frutos maduros sin pedúnculo estadísticamente superior a la cantidad de frutos con pedúnculo), para el **fruto pintón** no hay evidencia de éste, ya que la cantidad de frutos desprendidos sin pedúnculo fue estadísticamente igual a la cantidad de frutos con pedúnculo y para el **fruto verde** no hay evidencia de la presencia del momento flector, ya que la cantidad de frutos desprendidos con pedúnculo fue estadísticamente superior a la cantidad de frutos sin pedúnculo.

Las observaciones realizadas a los frutos maduros desprendidos sin pedúnculos mostraron que algunos frutos presentaban en su zona de unión con el pedúnculo un

despliegue de la cáscara de la cereza mientras para algunos otros quedaba ésta zona intacta. Esto indica la presencia del momento flector y posiblemente componentes de fuerzas de tensión paralelas en la misma dirección al eje del pedúnculo en el desprendimiento del fruto de café.

El análisis anterior indica, que es una acción combinada de esfuerzos (esfuerzos normales producidos por flexión y tracción, esfuerzos de tipo cortante y daño acumulativo) el que origina que el fruto de café se desprenda por vibración. En el rango de amplitudes (1,0 y 1,5 cm) y frecuencias utilizadas (1.200 c.p.m.-1.600c.p.m), la aplicación de las vibraciones longitudinales y transversales a las ramas de café, originan en el sistema fruto - pedúnculo (S.F.P.) maduro la aparición del modo "TILTING" o en y para el sistema fruto-pedúnculo (S.F.P.) en su estado verde y pintón, no hay un modo particular de vibración notable.

CONCLUSIONES

1. Los parámetros de vibración más adecuados para vibrar ramas de café en forma transversal considerando dos puntos de vibración simultáneos

- son: amplitud de 1.5 cm, distancia de separación de 35% de la longitud de la rama, con un tiempo de vibración inferior a 6s. en un rango de frecuencias de 1.400 a 1.500 c.p.m., lográndose desprendimientos de frutos de café maduro inferiores al 90%.
2. Bajo el rango de parámetros de vibración estudiados, la aplicación de las vibraciones transversales considerando dos puntos de vibración simultáneos, es una técnica de desprendimiento masivo pero no selectivo de frutos de café, en donde se logran porcentajes de desprendimiento de frutos fisiológicamente maduros (maduros + pintones) y verdes inferiores al 90 y 80% respectivamente.
 3. Cuando la rama de café experimenta una vibración transversal aplicada en dos puntos de forma simultánea con una frecuencia de 1.500 c.p.m. y amplitud de 1.5 cm., la rama vibra en su segundo modo de vibración, mientras que en forma transversal aplicada en un solo punto pero conservando estos mismos parámetros de vibración, la rama vibra en su tercer modo de vibración, efecto que es reflejado en un mayor desprendimiento de cerezas de café a favor de la vibración transversal en dos puntos.
 4. La vibración transversal aplicándola en dos puntos en forma simultánea comparada en la de un solo punto, reduce los nodos de vibración a lo largo de la longitud de la rama, lográndose valores de longitud de onda más altos, lo cual se traduce en un mayor flujo de energía, amplitud de movimiento más uniforme y una velocidad de propagación más alta.
 5. Los parámetros de vibración más adecuados para vibrar ramas de café en forma longitudinal son amplitud de 1.5 cm., con un tiempo de vibración inferior a 6s. en un rango de frecuencias de 1.400c.p.m., lográndose desprendimientos de frutos de café fisiológicamente maduros superiores al 85% y verdes inferiores al 70%.
 6. Frecuencias y amplitudes de vibración inferiores de 1.400 c.p.m y 1,5 cm. respectivamente, aplicadas en forma longitudinal y directa a la rama de café, representan una disminución en el desprendimiento de la cereza de café.

Siendo este desprendimiento más función del incremento de la amplitud que de la frecuencia.

7. La configuración de desplazamiento de una rama de café vibrada en forma longitudinal, con una frecuencia de 1.400 c.p.m. y amplitud de 1,5 cm., corresponde al primer modo de vibración.
8. La técnica de las vibraciones longitudinales y transversales en dos puntos, desprende la misma cantidad de frutos fisiológicamente maduros y verdes.
9. Las vibraciones longitudinales comparadas con las transversales en un solo punto, desprenden mayor cantidad de frutos fisiológicamente maduros (maduros más pintones), pero los dos tipos de vibraciones desprenden, estadísticamente, igual la misma cantidad de frutos verdes.
10. Con porcentajes de maduración en la rama superiores al 85%, frecuencias de vibración inferiores a 1.500 c.p.m. y amplitudes de 1,5 cm, ambos tipos de vibración; longitudinal y transversal, aplicada en forma simultánea en dos puntos, permiten obtener indicadores de cosecha (PVM) menores del 18%.
11. Bajo el rango óptimo de frecuencias (1.400 -1.500 c.p.m.) y amplitud (1,5 cm), tanto en la vibración longitudinal y como en transversal, aplicada en dos puntos, tiempos superiores a 6 s, no producen incrementos significativos en el porcentaje de desprendimiento de frutos de café.
12. Para la vibración longitudinal y transversal, porcentajes de maduración inferiores a 52% afectan la selectividad del desprendimiento de la cereza de café.
13. Tanto para las vibraciones transversales en dos puntos como las longitudinales, hay evidencia de la presencia del momento flector o modo en contrafase "TILTING" en el desprendimiento de frutos de café maduros, pero para los frutos pintones y verdes no hay evidencia de un modo particular que origine su desprendimiento bajo vibración.

LISTA DE ABREVIATURAS EMPLEADAS

PFMPi: Proporción de frutos maduros y pintones iniciales (porcentaje de maduración (%))

PDFMP: Proporción de frutos maduros y pintones desprendidos (%).

PNDFMP: Proporción de frutos maduros y pintones no desprendidos (%).

DMP: Desprendimiento de frutos maduros y pintones sobre una base de 100 frutos maduros más pintones (%).

PFVi: Proporción de frutos de verdes iniciales (100-PFMPi).

PDFV: Proporción de frutos verdes desprendidos (%).

PNDFV: Proporción de frutos verdes no desprendidos (%).

DV: Desprendimiento de frutos verdes sobre una base de 100 frutos verdes (%).

PVM: Proporción de frutos verdes cosechados en la masa final (%). Factor de calidad de cosecha

BIBLIOGRAFÍA

ARISTIZABAL, T. Ivan Darío. Estudio del efecto de la vibración del árbol de café en la selectividad de la cosecha. 1997. 50p.

CIRO, V.H.J. *et al.* Estudio dinámico bajo oscilación forzada del sistema fruto pedúnculo del café variedad Colombia. *En:* Revista Nacional de Agronomía, Medellín. Vol. 51, No.1 (1998); p.63-90.

CIRO, V. H. J. 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.

EISLEY, G. Joe. Mechanics of elastic structures: classical and finite element methods., New Jersey: Prentice Hall, 1989. p. 302-352.

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

MARTÍNEZ *et al.* Reporte de investigaciones sobre cosecha mecanizada de café, parte 1. La Habana: s.n, 1988. p.3-89.

THISMOSHENKO, S and YOUNG, D. H. Vibration problems in Engineering. 3ed. New Jersey: Prentice Hall, 1955. 468 p.

THOMSON, William. Theory of vibration with applications. 3ed. New Jersey: Prentice Hall, 1998. 467p.

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

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

WANG, K.J. Mechanical coffee harvesting, part 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.*