

Propiedades elásticas del sistema fruto-pedicelo del mango relacionadas con la cosecha por vibración*

Elastic properties of mango fruit-stalk system related to harvest by vibration

Pedro Ramón Mayans Céspedes^{1§}, Gilberto de Jesús López Cansteñs¹, Eugenio Romanchik Kriuchkova¹ y Luciano Pérez Sobrevilla¹

¹Departamento de Ingeniería Mecánica Agrícola-Universidad Autónoma Chapingo. Carretera México-Texcoco, km 38.5, Texcoco, México. C. P. 56230. Tel: 5959521680. (alelopez10@hotmail.com; eugenior@correo.chapingo.mx; sobrevill2002@hotmail.com). [§]Autor para correspondencia: mayans@correo.chapingo.mx.

Resumen

En México, el mango ocupa el segundo lugar en cuanto a superficie sembrada con 176 781 490 hectáreas; cuando el destino del mango es para el consumo como fruta fresca, la cosecha se realiza manualmente, sin embargo; con el aumento de la demanda de productos procesados, la cosecha mecanizada es una alternativa viable para la recolección de frutos mediante la utilización de vibradores inerciales. El presente trabajo tiene como objetivo determinar las propiedades elásticas del pedicelo y el sistema fruto-pedicelo del mango, que forman parte de las propiedades físicas-mecánicas requeridas para el análisis de la dinámica del sistema, con el fin de obtener los valores óptimos de frecuencia y amplitud de las vibraciones para la cosecha selectiva de los frutos. Para ello, se elaboró una metodología y se seleccionaron los instrumentos de medición con las precisiones requeridas por las normas mexicanas. Las determinaciones se realizaron en una parcela experimental de mango de la variedad Manila en Ídolos, Veracruz; durante junio de 2013, obteniéndose los valores medios de la rigidez, el módulo de elasticidad a la flexión, el coeficiente de Poisson y el módulo cortante del pedicelo, así como el momento flector necesario para desprender el fruto, en tres estadios de maduración. La prueba de Tukey indica que existe 95% del nivel de significancia, diferencias significativas entre las medias en las propiedades físico-mecánicas para

Abstract

In Mexico, mango ranks second in terms of surface planted with 176 781 490 hectares; when mango is destined for consumption as fresh fruit, harvest is done manually, however, with increasing demand for processed products, mechanical harvesting is a viable alternative for fruit collection using inertial vibrators. This study aims to determine the elastic properties of stalk and mango fruit-stalk systems that form the physical and mechanical properties required for the analysis of the system dynamics, in order to obtain the optimal values of vibration frequency and amplitude for selective harvest of fruits. To do so, a methodology was developed and selected instruments for measurement according to details required by Mexican standards. The determinations were performed in an experimental plot of Manila mango in Idolos, Veracruz; during June 2013, obtaining average values of rigidity, flexural modulus of elasticity, Poisson's coefficient and the shear modulus of the stalk and the bending moment required for fruit detachment, in three stages of ripening. Tukey test indicates that there is 95% level of significance, significant differences between the means of the physic-mechanical properties for ripe fruits, physiological ripening and green, being an aspect that favors selective harvest of fruits when vibration is applied to branches.

* Recibido: abril de 2015

Aceptado: septiembre de 2015

frutos maduros, con maduración fisiológica y verdes, siendo un aspecto que favorece la cosecha selectiva de frutos cuando se aplica vibraciones a las ramas.

Palabras clave: *Mangifera indica* L., desprendimiento selectivo, parámetros de diseño.

Introducción

El sistema máquina-árbol-fruto es un sistema complejo compuesto de varios subsistemas, uno de los modelos más completos para el estudio de este sistema fue elaborado por Llanes *et al.* (2000) y su aplicación ha sido validada experimentalmente con éxito durante el desprendimiento de frutos por vibración en cítricos, guayaba y café.

Al ser acoplado el vibrador a un punto de excitación del árbol, se aplica a éste una fuerza excitadora y como resultado de esta excitación en el punto de aplicación, se generará un movimiento vibratorio originando un desplazamiento del punto de aplicación de la excitación, que estará determinado por los parámetros de diseño y operación del equipo vibrador, tales como la masa desbalanceada, masa total del vibrador, frecuencia de las oscilaciones y excentricidad de la masa desbalanceada así como la magnitud y fase de la impedancia mecánica.

Las vibraciones aplicadas al punto de excitación se transmiten a través de la estructura del árbol hasta el subsistema fruto-pedicelo, el estudio de la transmisión de las vibraciones a través de la estructura del árbol es necesario con vista a determinar la amplitud de las vibraciones que excitan al subsistema fruto-pedicelo en diferentes zonas del árbol.

El árbol es sometido a vibraciones forzadas; diferentes puntos de su estructura oscilarán en el estado estacionario con la frecuencia correspondiente a la frecuencia de excitación, dependiendo de la amplitud y fase de las oscilaciones de estos puntos, así será el comportamiento modal que asuma el fruto en el árbol ante esta frecuencia. La transmisión de las vibraciones a la estructura del árbol estará determinado por la amplitud y frecuencia en el punto de excitación así como las características dimensionales y propiedades físico-mecánicas del árbol, tales como el módulo de elasticidad a la flexión y a la torsión, coeficiente de Poisson, la densidad volumétrica, razón de amortiguamiento, así como los momentos de inercia de las ramas entre otras.

Keywords: *Mangifera indica* L., design parameters, selective detachment.

Introduction

The machine-tree-fruit system is a complex system composed of several subsystems, one of the most comprehensive models for the study of this system was developed by Llanes *et al.* (2000) and its application has been experimentally validated successfully for fruit detachment by vibration in citrus, guava and coffee.

When coupled the vibrator to an excitation point of the tree, applies to it an excitation force and as a result of this excitation at the point of application, a vibratory movement is generated causing a displacement of the point of application of excitation, that will be determined by design parameters and functioning of the vibrator, such as unbalanced mass, total mass of the vibrator, frequency of the oscillations and unbalanced mass eccentricity, thus magnitude and phase of mechanical impedance.

The vibrations applied to the excitation point are conveyed through tree structure to the fruit-stalk subsystem, the study of vibration transmission through tree structure is necessary to determine vibration amplitude that excite the fruit-stalk subsystem in different areas of the tree.

The tree is subjected to forced vibrations; different points of its structure oscillate at steady state with the corresponding frequency to the excitation frequency, depending on the amplitude and phase of the oscillations of these points, so will, the modal behavior that fruit assumes on the tree at this frequency. The transmission of vibrations to tree structure will be determined by amplitude and frequency in the excitation point, as the dimensional characteristics and physic-mechanical properties of the tree, such as flexural modulus of elasticity and torsion, Poisson's coefficient, bulk density, damping ratio, and moment of inertia of branches among others.

The sinusoidal excitation of frequency and amplitude will cause the oscillation of the fruit-stalk subsystem and the appearance of the bending moment in the abscission zone that must overcome the bending moment required to achieve fruit detachment. The vibration mode that fruit-stalk subsystem assumes is given by amplitude and frequency of the oscillations and the physic-mechanical properties such as the polar diameter, minimum equatorial diameter, maximum equatorial

La excitación sinusoidal de la frecuencia y la amplitud provocará la oscilación del subsistema fruto-pedicelo y la aparición del momento flector en la zona de abscisión que debe superar el momento flector necesario para lograr el desprendimiento del fruto. El modo de vibración que asuma el subsistema fruto-pedicelo estará dado por la amplitud y frecuencia de las oscilaciones y por las propiedades físico-mecánicas tales como el diámetro polar, el diámetro ecuatorial mínimo, el diámetro ecuatorial máximo, el diámetro del pedicelo, longitud del pedicelo, masa del fruto, densidad volumétrica del fruto y los momentos de inercia en el eje menor y en el eje mayor, la rigidez del pedicelo, módulo de elasticidad a la flexión y a la torsión, el coeficiente de Poisson y el momento flector de desprendimiento del pedicelo.

Determinar el comportamiento modal y regímenes de vibración para el desprendimiento de los frutos del mango constituyen un problema de alta dificultad por tantas variables involucradas. Abordar este estudio experimental requeriría de gran inversión de recursos y tiempo, por lo que se recomienda abordarlo mediante la modelación matemática.

Los modelos matemáticos clásicos pueden dividirse en dos grandes grupos: los que consideran como causa predominante en el desprendimiento de los frutos la acción de las fuerzas de inercia centrífugas (de tracción), en las posibles zonas de abscisión (unión del fruto-pedicelo; unión pedicelo-ramas u otras) y los que consideran como causa predominante en el desprendimiento de los frutos la acción de momento de fuerzas de inercia que provocan flexión en la zonas de abscisión.

El primer grupo se asocian en algunos de los modelos desarrollados en Europa y Estados Unidos de América por Adrián y Fridley (1965); Varlamov (1972); Bobeva (1972), durante estudios en la cosecha por vibraciones de frutas como la manzana, ciruelas y otros, mientras el segundo grupo se asocian fundamentalmente los modelos surgidos durante estudios de la cosecha por vibración de cítricos en Estados Unidos de América por Cooke y Rand (1969) y en Cuba por Martínez (1977) y Castillo (1995) también fue aplicado este modelo en guayaba por Herrera (1980) y en café por Martínez *et al.* (1989) y Gaskins (2006).

Tanto el modelo de Cooke y Rand (1969), así como de Martínez (1977) y Castillo (1995), presentan dos grados de libertad y tienen en cuenta de forma acertada la aparición de deflexiones en las zonas de abscisión de los frutos, que no habían sido consideradas en modelos anteriores y que

diameter, stalk diameter, stalk length, fruit mass, bulk density of the fruit and moment of inertia in the minor and major axis, stalk rigidity, elasticity modulus to bending and torsion, Poisson's coefficient and bending moment of stalk detachment.

Determine the modal behavior and vibration regimes for detachment of mango, represents a problem of high difficulty for all the variables involved. Addressing this experimental study would require a large investment of resources and time, so it is recommended to address it by mathematical modeling.

Classical mathematical models can be divided into two groups: those that consider as predominant cause fruit detachment, the action of centrifugal forces of inertia (traction), on possible abscission zones (union of the fruit-stalk; union stalk-branches or other) and those that consider it as the predominant cause fruit detachment, the action of inertial forces that cause bending in abscission zones.

The first group are associated in some of the models developed in Europe and the United States of America by Adrian and Fridley (1965); Varlamov (1972); Bobeva (1972) for studies on harvesting by vibration of fruits such as apples, plums and others, while the second group are mainly associated to models encountered in studies of harvesting by vibration of citrus in the United States of America by Cooke and Rand (1969) and in Cuba by Martínez (1977) and Castillo (1995) this model was also applied in guava by Herrera (1980) and in coffee by Martínez *et al.* (1989) and Gaskins (2006).

Both Cooke and Rand (1969) model, and Martínez (1977) and Castle (1995) have two degrees of freedom and take into consideration the occurrence of deflection in abscission zones of fruits, that had not been considered in previous models and that most accurately describe the phenomenon of joint failure of fruit by stalk during harvest by vibration.

Different physical-mechanical properties of mango have been determined by several authors, Ramirez *et al.* (2006); Infoagro (2012), in both cases determined mass, maximum polar and equatorial diameter for some varieties, however; these properties are insufficient to apply mathematical modeling in order to know the optimal vibration modes and schemes that ensure selective harvesting of fruits.

Santos (2012) determined some physical- mechanical properties from fruit-stalk system of Ataulfo mango; however, did not take into account the stages of fruit ripening, being a prerequisite for the analysis of selectivity during mechanized harvesting by vibration.

describen con mayor exactitud el fenómeno del fallo de la unión del fruto por el pedicelo durante la cosecha por vibraciones.

Diferentes propiedades físico-mecánicas de los frutos del mango han sido determinadas por varios autores, Ramírez *et al.* (2006); Infoagro (2012), en los dos casos determinaron la masa, diámetro polar y ecuatorial máximo del fruto para algunas variedades, sin embargo; estas propiedades son insuficientes para aplicar la modelación matemática con vistas a conocer los modos y los regímenes de vibración óptimos que garanticen la cosecha selectiva de los frutos.

Santos (2012), determinó algunas propiedades físico-mecánicas del sistema fruto-pedicelo del mango de la variedad Ataulfo; sin embargo, no tuvo en cuenta los estadios de maduración de los frutos, siendo un aspecto indispensable para el análisis de la selectividad durante la cosecha mecanizada por vibración.

Materiales y métodos

Determinación de las propiedades elásticas de los pedicelos

La rigidez del pedicelo se determinó construyendo un dispositivo formado por dos soportes (Figura 1a) que fueron colocados en las mordazas de la máquina de ensayos mecánicos Instron modelo 3382. El soporte b se colocó en la mordaza inferior y estaba formado por dos láminas de acero de 1 mm de espesor y separadas a 9 mm en la cual se colocaron los pedicelos. El soporte a fue fijado a la mordaza superior, el mismo estaba compuesto por una lámina de acero que durante su recorrido pasa por en medio de la distancia de las láminas de soporte b (Figura 1b).

Para el esquema de la Figura 2; la rigidez se calcula como:

$$EI = \frac{Pl^3}{48y_{\max}} \quad 1)$$

Donde: EI = rigidez del pedicelo ($N \cdot m^2$); P = carga (N); l = separación entre las láminas del soporte b (m); y_{\max} = deflexión máxima del pedicelo (m).

La separación de las láminas de acero fue de 9 mm, mientras que la carga P y la deflexión y_{\max} de cada muestra se registraban y almacenaba en un ordenador con una precisión

Materials and methods

Determination of elastic properties of the stalks

Rigidity of stalk was determined building a device formed by two supports (Figure 1a) which were placed in the jaws of the mechanical testing machine Instron 3382. The support b was placed in the lower jaw and it was formed by two sheets of steel 1 mm thick and 9 mm apart in which the stalks were placed. The support was attached to the upper jaw; it was composed of a steel sheet that during its haul passes through the middle of the supporting sheets b (Figure 1b).

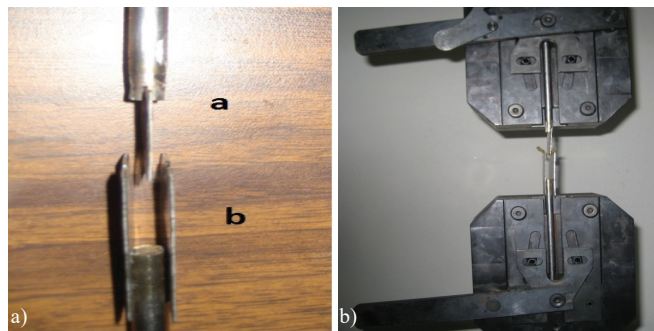


Figura 1. Dispositivos utilizados para determinar la rigidez del pedicelo.

Figure 1. Devices used to determine the rigidity of the stalk.

For the scheme of Figure 2; rigidity is calculated as:

$$EI = \frac{Pl^3}{48y_{\max}} \quad 1)$$

Where: EI = rigidity of the stalk ($N \cdot m^2$); P = load (N); l = spacing between sheets of support b (m); y_{\max} = maximum deflection of the stalk (m).

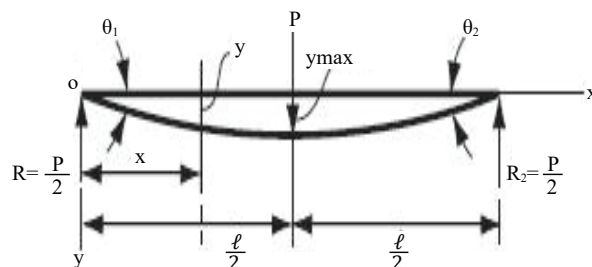


Figura 2. Esquema para el cálculo de la rigidez del pedicelo.

Figure 2. Scheme to calculate rigidity of stalk.

Separation of steel sheets was 9 mm, while the load P and deflection y_{\max} of each sample was recorded and stored in a computer with an accuracy of $\pm 10^{-5} N$ and $10^{-5} mm$

de $\pm 10^{-5}$ N y $\pm 10^{-5}$ mm respectivamente (Figura 3). Para el cálculo de la rigidez del pedicelo de cada muestra se tomó la carga máxima y su deflexión correspondiente registrada en la computadora de la máquina Instron.

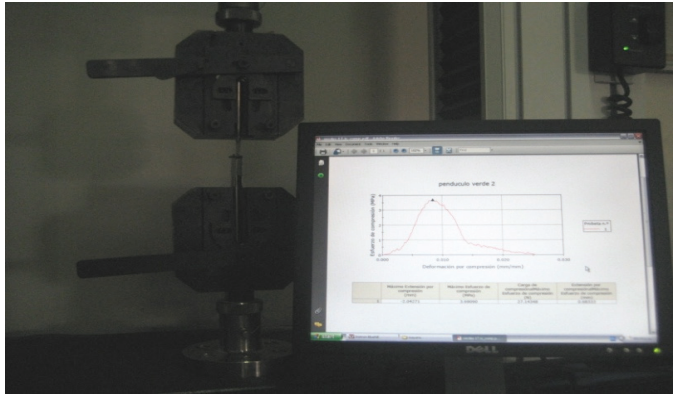


Figura 3. Registro de los resultados en la computadora de los ensayos de rigidez del pedicelo.

Figure 3. Records of the results in the computer from rigidity trials of stalk.

Con los resultados de la rigidez del pedicelo obtenidos durante los experimentos se determina el módulo de elasticidad (E) ($N\ m^{-2}$) mediante la expresión:

$$EI = k \tag{2}$$

Donde: k= es el valor de la rigidez obtenida durante los experimentos ($N\ m^2$); I= momento de 2º orden de la sección del pedicelo (m^4) y se calcula como:

$$I = \frac{\pi d_p^4}{64} \tag{3}$$

Donde: d_p = diámetro medio del pedicelo (m).

El coeficiente de Poisson se determina directamente, mediante la medición de las deformaciones provocadas en el pedicelo por una fuerza traccional de 7.35 N. Para la medición de las deformaciones se utiliza una cámara digital marca Sony de 10 megapíxeles montada sobre un trípode, y un soporte en el cual se fijó el pedicelo por uno de sus extremos y por el otro se colocó un peso de 7.35 N.

Las imágenes fueron procesadas con el programa Visión Builder AI 3.0 con una precisión en las mediciones de ± 0.01 píxeles, mientras que la zona del pedicelo objeto de medición fue definido por dos agujas.

respectively (Figure 3). To calculate rigidity of the stalk of each sample maximum load and deflection recorded in the computer from Instron were considered.

With results obtained from stalk rigidity during the experiments elasticity modulus (E) ($N\ m^{-2}$) is determined by the expression:

$$EI = k \tag{2}$$

Where: K= rigidity value obtained during the experiments ($N\ m^2$); I= moment of 2nd order of stalk section (m^4) and is calculated as:

$$I = \frac{\pi d_p^4}{64} \tag{3}$$

Where: d_p = mean diameter of stalk (m).

Poisson’s coefficient is determined directly, by measuring the deformations caused in the stalk by a tensile force of 7.35 N. To measure deformations a digital camera Sony 10 megapixel mounted on a tripod is used and a support where the stalk is set by one end and on the other a weight of 7.35 N was placed.

Images were processed with Vision Builder AI 3.0 with a measurement accuracy of ± 0.01 pixels, while the area of stalk was defined by two needles.

The procedure consisted to take two pictures to each sample; an initial without weight (Figure 4a) where X and Y, distances were defined based on pixels in the area of the two needles and a final picture with weight, measuring the distance. X + ΔX ; Y - Y (Figure 4b).

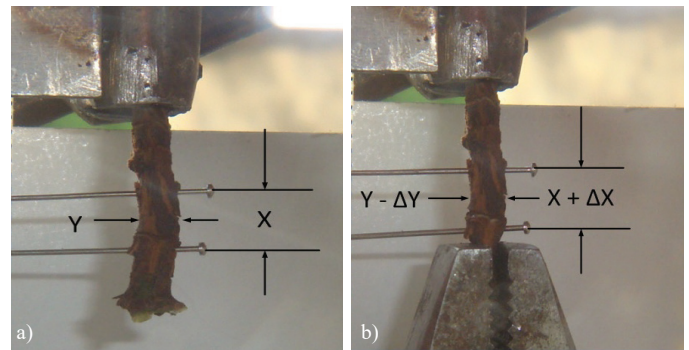


Figura 4. Valores iniciales (X y Y) y finales (X + ΔX y Y - ΔY) en el sector del pedicelo.

Figure 4. Initial (X and Y) and final (X + ΔX and Y - ΔY) values in the stalk area.

El procedimiento consistió en tomar dos fotos a cada muestra; una inicial sin peso (Figura 4a) donde se definían las distancias X y Y, en base a los pixeles en el sector de las dos agujas y una foto final con peso, midiendo las distancias $X + \Delta X$; $Y - \Delta Y$ (Figura 4b).

Conociendo que;

$$X + \Delta X = X_f \quad (4)$$

$$Y - \Delta Y = Y_f \quad (5)$$

Despejando ΔX y ΔY de (4) y (5) respectivamente se tiene que:

$$\Delta X = X_f - X \quad (6)$$

$$\Delta Y = Y - Y_f \quad (7)$$

Donde: ΔX , ΔY = deformación en dirección axial y perpendicular al pedicelo (mm); X, Y = valores iniciales (mm); X_f , Y_f = valores finales (mm).

Una vez conocidas las deformaciones, el coeficiente de Poisson se calcula como:

$$\mu = \frac{\varepsilon_Y}{\varepsilon_X} = - \frac{\frac{\Delta Y}{Y}}{\frac{\Delta X}{X}} \quad (8)$$

Apartir del módulo de elasticidad y el coeficiente de Poisson, se determina el módulo de cortante G (N m^{-2}) por medio de la expresión:

$$G = \frac{E}{2(1 + \mu)} \quad (9)$$

Determinación del momento flector de desprendimiento del fruto

La determinación del momento flector que provoca el fallo de la zona de abscisión del sistema fruto-pedicelo, es indispensable con vistas a la aplicación de modelos matemáticos, para el cálculo de los regímenes de vibración que provocan el desprendimiento de los frutos. Para su determinación se construyó un dispositivo en forma de canal con un orificio a una distancia de cinco centímetros desde la base del pedicelo y se instaló un transductor de fuerza con una precisión de $\pm 10^{-6}$ N, conectado a la computadora a través de una interface. El gancho del traductor se apoyó en la base del pedicelo (Figura 5).

Knowing that;

$$X + \Delta X = X_f \quad (4)$$

$$Y - \Delta Y = Y_f \quad (5)$$

It clearing ΔX and ΔY from (4) and (5) respectively have:

$$\Delta X = X_f - X \quad (6)$$

$$\Delta Y = Y - Y_f \quad (7)$$

Where: ΔX , ΔY = deformation in axial and perpendicular direction to the stalk (mm) direction; X, Y = initial values (mm); X_f , Y_f = final values (mm).

Once known deformation, Poisson's coefficient is calculated as:

$$\mu = \frac{\varepsilon_Y}{\varepsilon_X} = - \frac{\frac{\Delta Y}{Y}}{\frac{\Delta X}{X}} \quad (8)$$

From the elasticity modulus and Poisson's coefficient, the shear modulus G (N m^{-2}) is determined by the expression:

$$G = \frac{E}{2(1 + \mu)} \quad (9)$$

Determining the bending moment of fruit detachment

The determination of the bending moment that causes the failure of the abscission zone from the fruit-stalk system is essential in order to the application of mathematical models to calculate vibration regimes that cause fruit detachment. To determine it a device was built channel shaped with a hole at a distance of five cm from the base of the stalk and a force transducer was installed with an accuracy of $\pm 10^{-6}$ N, connected to the computer through an interface. The hook of the translator leaned against the base of the stalk (Figure 5).

The measurements were taken going through the fruit with a rod through the hole perpendicular to its major axis, rotating the fruit by applying a force at its free end until the stalk detaches as shown in Figure 6, recording in the computer the maximum value of force that when multiplied by the arm indicates the bending moment.

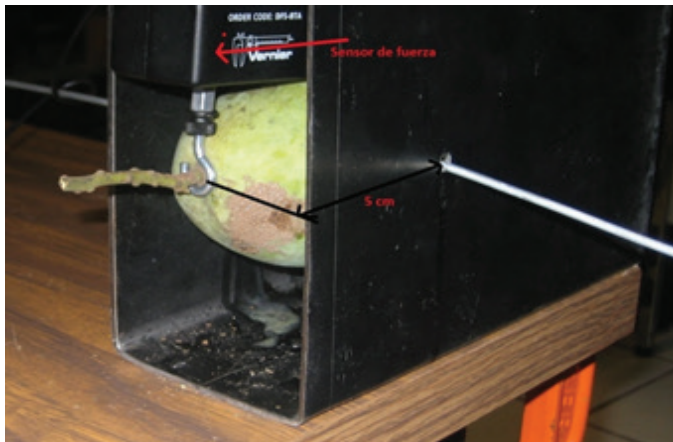


Figura 5. Dispositivo para la medición del momento flector de desprendimiento del pedicelo.

Figure 5. Device to measure the bending moment of stalk detachment.

Las mediciones se efectuaron atravesando el fruto con una varilla a través del orificio en dirección perpendicular a su eje mayor, se hace rotar la fruta al aplicar una fuerza por su extremo libre hasta lograr el desprendimiento del pedicelo como se muestra en la Figura 6, quedando registrada en la computadora el valor máximo de la fuerza, que al multiplicarse por el brazo indica el momento flector producido.

Resultados y discusión

Los resultados de las mediciones de las propiedades físico-mecánicas (PFM) objeto de estudio, fueron procesados estadísticamente por el paquete Statal Analys System (SAS) versión 8.0, Statgraphics Plus versión 5.1 y Microsoft Excel versión 2010, obteniéndose para cada PFM determinadas experimentalmente en los tres estadios de maduración los valores medios (\bar{x}), error estándar de la media (e), desviación típica (σ) y el coeficiente de variación (cv); además se construyeron las curvas variacionales de distribución. Adicionalmente se efectuó la prueba de Tukey para detectar diferencias significativas entre los valores medios de cada propiedad en los tres estadios de maduración. En el Cuadro 1 se muestran los resultados del análisis de varianza para las diferentes propiedades objeto de estudio de acuerdo al estadio de maduración.

En el Cuadro 1 se aprecia que la rigidez, el módulo de elasticidad y el módulo cortante de los pedicelos disminuyen desde el verde al maduro, lo cual influye en la disminución de las frecuencias naturales de los sistemas con frutos maduros. Esta diferenciación puede originar sólo la caída de frutos maduros si se seleccionan los regímenes de vibración adecuados.

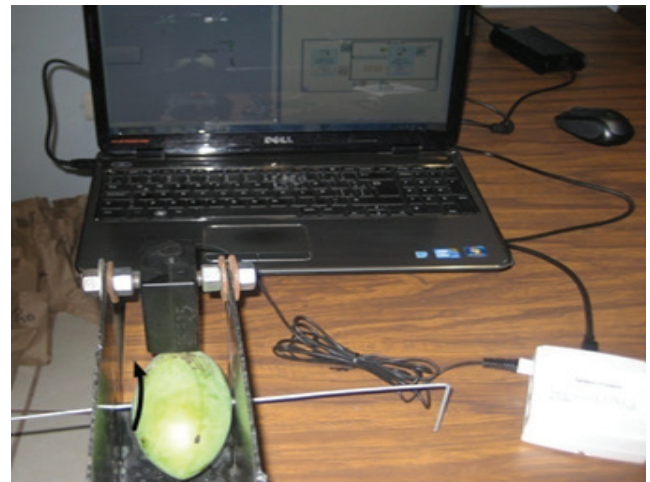


Figura 6. Registro del momento flector de desprendimiento en el ordenador.

Figure 6. Recording of the detached bending moment on the PC.

Results and discussion

The results from the measurements of the physico-mechanical properties (PFM) under study were statistically processed by the Statal Analys System (SAS) version 8.0, Statgraphics Plus version 5.1 and Microsoft Excel version 2010, obtaining for each PFM determined experimentally in the three stages of maturation mean values (\bar{x}), standard error of the mean (e), standard deviation (σ) and coefficient of variation (cv); also variational distribution curves were constructed. Additionally a Tukey test was performed to detect significant differences between mean values of each property in the three stages of ripening. Table 1, shows the results of analysis of variance for different properties under study according to stage of ripening.

Table 1 show that rigidity, elasticity modulus and shear modulus of stalk decrease from green to ripe, which influences in the reduction of natural frequencies of the systems with ripe fruits. This differentiation can cause only the fall of ripe fruit if appropriate vibration regimes are selected.

Poisson's coefficients of stalk behave different to rigidity, elasticity and shear modulus on fruits; i.e. increases from green to ripe fruit. Despite showing significant differences according to Tukey's test between stalks of ripe fruits compared to fruits with physiological ripening (half ripe) and green, its variation does not influence

Cuadro 1. Resultados de la prueba de Tukey para las propiedades físico-mecánicas del sistema fruto-pedículo del mango de la variedad Manila en los tres estadios de maduración.

Table 1. Results of the Tukey test for physical-mechanical properties from fruit-stalk system of Manila mango in the three stages of ripening.

Propiedad físico-mecánica	UM	Estadios de maduración		
		Maduros	MF	Verdes
Rigidez del pedículo (EI)	N mm ²	163.2 b	504.5 a	608.33 a
Módulo de elasticidad (E)	N mm ⁻²	30.2 b	191.8 ba	496.7 a
Coefficiente de Poisson (μ)	adim	0.94 a	0.66 b	0.54 b
Módulo de cortante (G)	N mm ⁻²	8.25 b	60.23 ba	163.48 a
Momento flector de desprendimiento del fruto (M _r)	N m	0.44 b	0.66 a	0.79 a

UM= unidad de medida; MF= maduración fisiológica; a, b= medias con la misma letra no son significativamente diferentes.

El coeficiente de Poisson de los pedículos se comporta diferente a la rigidez, módulo de elasticidad y cortante en los frutos; es decir, aumenta desde los frutos verdes a los maduros. Apesar de presentar diferencias significativas de acuerdo a la prueba de Tukey entre los pedículos de los frutos maduros con relación a los frutos con maduración fisiológica (pintones) y verdes, su variación no influye en forma notable sobre las frecuencias naturales del sistema, por lo que ésta variación no debe afectar las condiciones para la cosecha selectiva.

Con relación al momento flector requerido para el desprendimiento de los frutos, se obtuvieron diferencias significativas entre el valor medio correspondiente a los frutos verdes, con relación a los maduros. En el caso de los frutos verdes fue muy superior a los maduros, lo que puede originar una disminución en las frecuencias naturales de vibración de los frutos maduros. Este comportamiento es altamente propicio desde el punto de vista de la cosecha selectiva del mango mediante vibraciones al árbol.

En el Cuadro 2 están reflejados los valores de los estadígrafos de aquellas propiedades físico-mecánicas determinadas experimentalmente, observándose que los valores medios de la rigidez, coeficiente de Poisson y momento flector para el desprendimiento del fruto va disminuyendo de frutos verdes a los maduros, dado que los pedículos de los frutos maduros son más blandos que los pedículos de los frutos verdes. Estas variaciones provocan diferenciación en las frecuencias naturales de vibración en los tres estadios de maduración, lo que favorece la cosecha selectiva, sin embargo; se observa una gran dispersión en los valores de las mediciones realizadas a estas propiedades físico-mecánicas, siendo un aspecto a considerar en la elección de los regímenes óptimos de vibración de las máquinas cosechadoras.

significantly on natural frequencies of the system, so that this variation does not affect the conditions for selective harvesting.

Regarding to the bending moment required for fruit detachment, significant differences between mean values corresponding to green fruits compared to ripe were obtained. Green fruits were far superior to ripe, which can cause a decrease in natural frequencies of vibration of the ripe fruits. This behavior is highly suitable from the standpoint of selective harvesting of mango by tree vibrations.

Table 2 shows the values of kurtosis from those physical and mechanical properties determined experimentally, observe that the mean values of rigidity, Poisson's coefficient and bending moment for fruit detachment decreases from green to ripe, since fruit stalk of ripe fruits are softer than the stalks of green fruits. These variations cause differentiation in natural frequencies of vibration in the three stages of ripening, favoring selective harvesting, however; dispersion is observed in the values of the measurements at these physical-mechanical properties, being an aspect to consider when choosing the optimum regimes for the vibration harvester machines.

Figures 7, 8 and 9 show variational distribution curves of rigidity, Poisson's coefficient and bending moment of stalk detachment for green fruits, with physiological ripening (half ripe) and ripe, observe that the mean value locates in the vicinity of the point with higher frequency, giving greater strength to results in the comparison of means.

Cuadro 2. Valores de los estadígrafos de las propiedades elásticas del pedicelo y del sistema fruto-pedículo determinadas experimentalmente para tres estadios de maduración.

Table 2. Kurtosis values of elastic properties from stalk and fruit-stalk system experimentally determined for three stages of ripening.

PFM	Maduros				Maduración fisiológica				Verdes			
	x	e	σ	cv	x	e	σ	cv	x	e	σ	cv
EI	163.2	15.52	85.01	52.09	504.5	47.91	262.43	52.02	608.3	66.56	364.58	59.93
μ	0.94	0.12	0.65	69.17	0.66	0.03	0.188	28.76	0.54	0.03	0.156	28.98
M_f	0.44	0.04	0.21	52.73	0.66	0.05	0.26	39.01	0.79	0.05	0.28	36.19

PFM= propiedades físico-mecánicas; EI= rigidez del pedicelo; μ = coeficiente de Poisson; M_f = momento flector de desprendimiento del fruto; x= valores medios; e= error estándar de la media; σ = desviación típica; cv= coeficiente de variación (%).

En las Figuras 7, 8 y 9 se muestran las curvas variacionales de distribución de la rigidez, coeficiente de Poisson y el momento flector para el desprendimiento del pedicelo para frutos verdes, con maduración fisiológica (pintones) y maduros, observándose que el valor medio se ubica en la cercanía del punto de mayor frecuencia, dándole mayor fortaleza en los resultados en la comparación de medias.

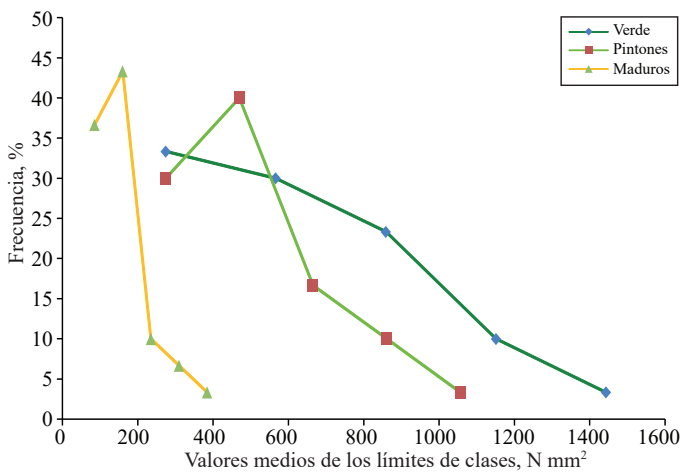


Figura 7. Curvas variacionales de la rigidez de los pedicelos.
Figure 7. Variational curves of stalk rigidity.

Conclusiones

Los valores medios de la rigidez de los pedicelos fueron de; 608.3, 504.5 y 163.2 N mm² para frutos verdes, pintones y maduros respectivamente, mientras que el coeficiente de Poisson, tomo valores medios de 0.54, 0.66 y 0.94 de acuerdo al orden de maduración antes señalado.

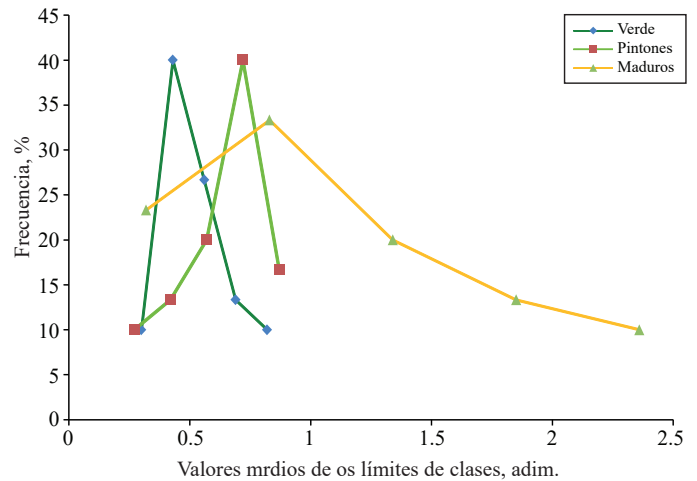


Figura 8. Curvas variacionales del coeficiente de Poisson.
Figure 8. Variational curves of Poisson's coefficient.

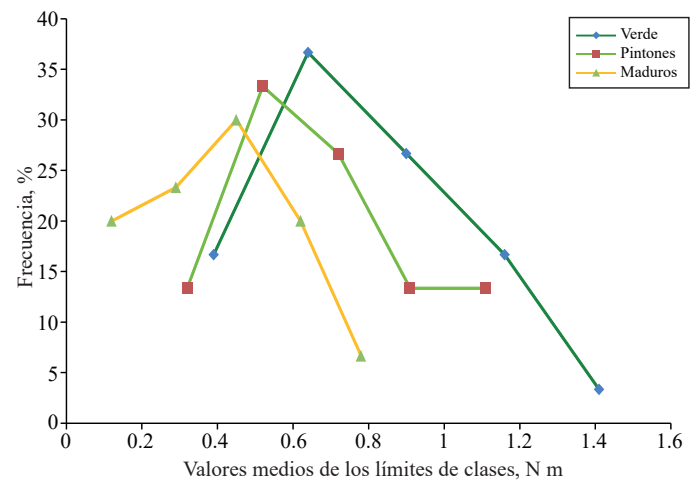


Figura 9. Curvas variacionales del momento flector de desprendimiento de los frutos.
Figure 9. Variational curves of the bending moment of fruit detachment.

En sentido general se apreció diferencias significativas en las propiedades objeto de estudio con relación a frutos verdes y maduros. La variación con la maduración de los frutos de sus valores medios de la mayor parte de las propiedades estudiadas, influye en la disminución de las frecuencias naturales de los sistemas con frutos maduros, lo cual incide positivamente en la existencia de condiciones favorables para la cosecha selectiva por vibración.

Los valores medios del momento flector para los frutos maduros, con maduración fisiológica (pintones) y verdes fueron de 0.44, 0.66 y 0.79 N m respectivamente.

Literatura citada

- Adrian, P. A and Fridley, R. B. 1965. Dynamics and design criteria of inertia type tree shakers. Transactions of the ASAE. 8(4):12-14.
- Bobeva, M. 1972. Isledovanie otiskivaneto na malinovite plodove pri vibrirane. Sielskoskstopanstva Tejnika, I, Sofia.
- Castillo, M. A. 1995. Investigación del régimen óptimo de trabajo de los vibradores de follaje de acción vertical para el desprendimiento de naranja de Valencia en Cuba. Tesis de doctorado en ciencias técnicas, Universidad Agraria de la Habana, Cuba.
- Cooke, J. R. and Rand R. H. 1969. Vibratory fruit harvesting: a linear theory of fruit-stem dynamic. J. Agric. Eng. 14(3):195-200.
- Gaskins, E. B. G. 2006. Fundamentación de los modos y los regímenes de vibración del sistema fruto-pedículo-pedúnculo del café, para la cosecha selectiva de los frutos. Tesis doctoral en ciencias técnicas. Universidad Agraria de la Habana, Cuba. 109 p.
- Herrera, M. 1980. Estudio teórico de los regímenes de trabajo para el desprendimiento de guayaba por vibración. Tesis Profesional. Instituto Superior Politécnico José Antonio Echeverría, Habana, Cuba.
- InfoAgro. 2012. El cultivo del mango I y II parte. URL: <http://www.infoagro.com/>.
- Llanes, O. 2000. Determinación de los parámetros de diseño de vibradores inerciales de ramas para la cosecha mecanizada de cítricos. Tesis doctoral en ciencias técnicas. Universidad Agraria de la Habana, Cuba. 101 p.

Conclusions

Mean values of stalk rigidity were; 608.3, 504.5 and 163.2 N mm² for green, half ripe and ripe fruits respectively, while Poisson's coefficient, took average values of 0.54, 0.66 and 0.94 according to ripening order set out above.

Overall significant difference was observed in the properties under study regarding to green and ripe fruits. The variation with the ripening of fruits of their mean values of most of the studied properties influence the reduction of natural frequencies of the systems with ripe fruits, which positively affects the existence of favorable conditions for selective harvesting by vibration.

The mean values of bending moment for ripe fruits, with physiological ripening (half ripe) and green were 0.44, 0.66 and 0.79 N m respectively.

End of the English version



- Martínez, R. A. 1977. Estudio teórico de la dinámica del sistema fruto pedúnculo. Revista Ciencias Técnicas. Serie construcción de maquinaria. Instituto Superior Politécnico José Antonio Echeverría, Habana, Cuba.
- Martínez, R. A.; Morales, F. J.; Gómez, A. D. y Aloysius, H. N. 1989. Determinación de parámetros de un órgano de trabajo para cosecha mecanizada de café por vibración. Rev. Cienc. Téc. Agropec. 2(3):27-49.
- Ramírez, V. J.; Pérez, F. J. A.; Sáinz, R. R. A.; Quiñonez, F. J. A. y Ramos, B. Y. M. 2006. Cultivo, enfermedades y plagas del mango: sistemas convencional y orgánico. Gobierno de Sinaloa. México. 256 p.
- Santos, H. A. M. 2012. Diseño y construcción de un dispositivo cosechador de mango. Tesis de maestría. Posgrado en ingeniería y uso integral del agua. Chapingo, Estado de México. 98 p.
- Varlamov, G. P. 1972. Determinación de los regímenes de trabajo de una máquina vibradora para la recogida de frutos. Trabajos del Visjom. Moscú. Vol. 71.