

## Comportamiento mecánico de frutos de papaya bajo compresión axial\*

### Mechanical behavior of papaya fruits under axial compression

Enrique Vázquez García<sup>1§</sup>, Horacio Mata Vázquez<sup>1</sup>, Rafael Ariza Flores<sup>2</sup>, Felipe Santamaría Basulto<sup>3</sup> e Irán Alia Tejacal<sup>4</sup>

<sup>1</sup>Campo Experimental Las Huastecas-INIFAP, km 55 Carretera Tampico-Mante, Altamira Tamaulipas. 89601. Tel. 01836 2760168 (vazquez.enrique@inifap.gob.mx; mata.vazquez@inifap.gob.mx). <sup>2</sup>Campo Experimental Chilpancingo-INIFAP, Rufo Figueroa s/n, Col. Burócratas. 39039. Chilpancingo, Guerrero. (ariza.rafael@inifap.gob.mx). <sup>3</sup>Campo Experimental Mocochoá-INIFAP, Carretera Mérida-Motul, km 25, Yucatán. (santamaria.felipe@inifap.gob.mx). <sup>4</sup>Facultad de Ciencias Agropecuarias, Universidad Autónoma del Estado de Morelos. Av. Universidad 1001, Col. Chamilpa, 62209. Cuernavaca, Morelos. (ijac96@yahoo.com.mx). <sup>§</sup>Autor para correspondencia: vazquez.enrique@inifap.gob.mx.

#### Resumen

Los frutos de papaya (*Carica papaya* L.) son muy susceptibles a los daños mecánicos, lo que repercute en fuertes pérdidas en poscosecha. El objetivo del presente trabajo fue evaluar el comportamiento mecánico de frutos de papaya en poscosecha, para lo cual se realizaron dos experimentos en el Campo Experimental Las Huastecas, INIFAP durante los años 2011 y 2012. Las variables evaluadas fueron la fuerza y la deformación requeridas por los frutos para alcanzar el límite elástico, el punto de biocedencia y el punto de ruptura. La compresión se realizó con un Instron Universal 4460. En el primer experimento se evaluaron frutos en madurez de consumo tratados en pre-cosecha con cinco combinaciones de fertilización; los tratamientos N-P-K-Cu-Zn, N-P-K-Ca-Zn, N-P-K y N-P-K-Fe-Zn registraron mayor resistencia a la fuerza de compresión y resultaron diferentes al tratamiento N-P-K-Mn-Zn (Tukey,  $p \leq 0.05$ ). En el segundo experimento se evaluaron tres cultivares en dos estados de madurez; los frutos en madurez fisiológica fueron más resistentes para alcanzar el límite elástico (414 N), con relación a los frutos en madurez de consumo (67 N), con diferencias estadísticas (Tukey,  $p \leq 0.05$ ). Los frutos del híbrido PK 02 requirieron mayor fuerza para alcanzar el límite elástico (298 N), con relación a los frutos de la variedad Maradol roja (250 N)

#### Abstract

The fruits of papaya (*Carica papaya* L.) are very susceptible to mechanical damage, which results in heavy losses in post-harvest. The aim of this study was to evaluate the mechanical behavior of papaya fruits in post-harvest, for which two experiments were conducted in the Experimental Field The Huasteca, INIFAP during the years 2011 and 2012. The variables evaluated were the strength and deformation required for the fruit to reach the elastic limit, biocedence and the breaking point. The compression was performed with a Instron Universal 4460. In the first experiment for ripening fruit treated with pre-harvest five combinations of fertilization, the treatment N-P-K-Cu-Zn, N-P-K-Ca-Zn, N-P-K-Fe-Zn reported increased resistance to force compression and was different to the treatment N-P-K-Mn-Zn (Tukey,  $p \leq .05$ ). In the second experiment three cultivars were evaluated in two states of maturity, the fruits at physiological maturity were more resistant to attain the elastic limit (414 N) in relation to ripening (67 N), with statistical differences (Tukey,  $p \leq .05$ ). The fruits of the hybrid PK 02 required more force to achieve the yield strength (298 N) with respect to the fruits of the variety Maradol roja (250 N) and the hybrid PK 03 (173 N), with differences (Tukey,  $p \leq .05$ ). It is

\* Recibido: marzo de 2013  
Aceptado: septiembre de 2013

y del híbrido PK 03 (173 N), con diferencias (Tukey,  $p \leq 0.05$ ). Se concluye que los frutos de papaya tuvieron un comportamiento mecánico diferente, en función del manejo nutricional, del tipo de cultivar y del estado de madurez.

**Palabras clave:** *Carica papaya* L., límite elástico, punto de biocedencia, punto de ruptura.

## Introducción

Las propiedades mecánicas de los materiales son aquellas relacionadas con la deformación y el flujo de éstos, cuando son sometidos a la acción de fuerzas (Mohsenin, 1972). Diversos autores han clasificado los materiales por su comportamiento mecánico en tres tipos: a) sólidos, que son capaces de mantener por sí mismos una forma y tamaño definido y de resistir hasta cierto límite, la acción de fuerzas sin sufrir deformación; b) líquidos, que tienden a asumir la forma del recipiente donde están contenidos y sufren deformación y flujo con la acción de la mínima fuerza; y c) visco-elásticos, que combinan características de sólidos y líquidos y su deformación está en función del tiempo en que se aplique un esfuerzo. En ésta última clasificación se ubican los materiales agrícolas, incluyendo todas las frutas y hortalizas (Mohsenin, 1970; Peleg y Calzada, 1976).

En el caso de los frutos, uno de los principales objetivos del estudio de sus propiedades mecánicas, es cuantificar la carga máxima que éstos pueden soportar sin que sufran algún tipo de daño, con la finalidad de mecanizar los procesos de poscosecha. En el caso de los frutos de papaya (*Carica papaya* L.), el estudio de este tipo de propiedades se justifica por la gran susceptibilidad que tienen a los daños por compresión, impacto y fricción, lo que repercute en fuertes pérdidas poscosecha.

Al respecto, Capellini *et al.* (1988) reportaron que de los embarques de papaya que llegaban a Nueva York, 22% registraron frutos con daños mecánicos. Paull *et al.* (1997) señalaron que el Departamento de Agricultura de Estados Unidos (USDA) inspeccionó 60 mil cajas de papaya, encontrando que 72% de las cajas hubo frutos con daños por compresión como consecuencia de un incorrecto estibamiento y exceso de peso. Thompson y Mitchell (1985) destacaron que los mayores daños por compresión en papayas, suceden una vez que son colocados en los contenedores y que la principal causa de ello se debe al desconocimiento de sus propiedades mecánicas.

concluded that papaya fruits had different mechanical behavior depending on the nutritional management, the type of cultivar and maturity.

**Key words:** *Carica papaya* L., yield strength, biocedence point, breaking point.

## Introduction

The mechanical properties of the materials are those related to the deformation and flow of these, when subjected to the action of forces (Mohsenin, 1972). Several authors have classified the materials for their mechanical behavior in three types: a) solid, they are able to keep themselves in defined shape and size and withstand a certain limit, the action of forces without suffering deformation; b) liquid which tend to take the shape of the container in which are contained and undergo deformation and flow with minimal action of force; and c) viscoelastic, combining characteristics of solids and liquids and the deformation is a function of time to apply a effort. In the latter classification are located agricultural materials, including all fruits and vegetables (Mohsenin, 1970; Peleg and Calzada, 1976).

In the case of fruits, one of the main objectives of the study of their mechanical properties is to quantify the maximum load they can withstand without suffering any harm, in order to machine the postharvest processes. For the fruits of papaya (*Carica papaya* L.), the study of this type of property is justified considering the high susceptibility to damage with compression, impact and friction, which results in heavy post-harvest losses.

In this regard, Capellini *et al.* (1988) reported that papaya shipments arriving in New York, 22% recorded mechanically damaged. Paull *et al.* (1997) noted that the Department of Agriculture (USDA) inspected 60 000 boxes of papaya, finding that 72% of the boxes were damaged by compression as a result of an incorrect stacking and overweight. Thompson and Mitchell (1985) noted that higher compression injury in papayas, happen once they are placed in containers and that the main cause of this is due to ignorance of their mechanical properties.

In this sense, several authors note that, the study of the mechanical properties of tropical fruits has had little attention considered complicated, anisotropic, inhomogeneous,

En este sentido, diversos autores(as) señalan que el estudio de las propiedades mecánicas de los frutos tropicales ha tenido muy poca atención, debido a que por ser materiales biológicos son complicados, anisotrópicos, no homogéneos, no lineales y señalan que en el caso de la papaya, existen muchos estudios que han incluido la penetración de los frutos como método de evaluación de su firmeza, sin embargo, la mayoría de esos estudios se han enfocado al análisis de los factores bioquímicos relacionados con su ablandamiento, de tal manera que las variables mecánicas involucradas se han considerado como parte complementaria del trabajo y han sido insuficientes para caracterizar su comportamiento mecánico (Peleg, 1979; Anzaldúa-Morales, 1994).

Los primeros estudios relacionados con las propiedades mecánicas de los frutos de papaya determinaron que estos tenían gran variabilidad en su geometría y firmeza, aún dentro de un mismo fruto, lo que hacía difícil el cálculo de los parámetros mecánicos. Esos estudios se realizaron con medidores de fuerza como el Magnes Taylor, penetrando los frutos en diferentes zonas, con puntales de diámetro entre 3/16 y 11/16 pulgadas. Bajo esas condiciones se determinó que la penetración con puntales era una mezcla de fuerza de compresión y fuerza de corte y que los frutos menos maduros soportaban más deformación y fuerza para alcanzar la ruptura, con relación a los frutos más maduros (Brukner y Kinch, 1968; Kumar y Wang, 1971; Peleg, 1974). Otro método con el cual se han estudiado las propiedades mecánicas de los frutos es el denominado "análisis de perfil de textura", que consiste en comprimir una muestra de alimento con la Máquina de Prueba Universal Instron, la cual grafica una curva que expresa el esfuerzo y la deformación aplicados (Anzaldúa-Morales, 1994).

Mohsenin (1970) consideró que la curva esfuerzo-deformación proporciona índices mecánicos muy específicos de los alimentos, como el límite elástico, el punto de biocedencia, el rango plástico y el punto de ruptura. Este autor ilustra los anteriores conceptos sobre una curva (Figura 1) y los define de la siguiente manera: el límite elástico (LE) representa el más grande esfuerzo que un material es capaz de soportar, sin perder la proporción lineal de la curva esfuerzo-deformación, lo que implica que al retirar el esfuerzo el material puede recuperar su forma original sin sufrir daño. El punto de biocedencia (PB) lo define como el punto de la curva esfuerzo-deformación en el cual ocurre un aumento de la deformación, sin incremento en la fuerza; en ciertos materiales biológicos el PB es un indicador del inicio de la ruptura celular interna, lo que implica baja

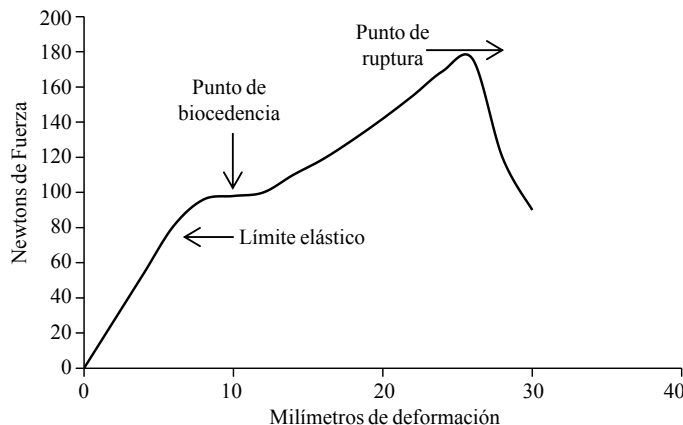
nonlinear, and show that in the case of papaya there are many studies that have included the penetration of the fruits as a method for assessment of his strength, but most of these studies have focused on the analysis of biochemical factors related to its softening, so that the mechanical variables involved have been considered as a complementary part of the job and have been insufficient to characterize their mechanical behavior (Peleg, 1979; Anzaldúa-Morales, 1994).

The first studies related to the mechanical properties of papaya fruits determined that these had a large variability in their geometry and firmness, even within the same fruit, making it difficult to calculate the mechanical parameters. These studies were performed using force gauges such as the Magnes Taylor, penetrating the fruit in different areas, with struts in diameter between 3/16 and 11/16 inches. Under these conditions it was determined that, the struts penetration was a mixture of compressive force and shear force and less mature fruits support more deformation and rupture strength to achieve in relation to the mature fruits (Brukner and Kinch, 1968; Kumar and Wang, 1971; Peleg, 1974). Another method with which we have studied the mechanical properties of the fruit is called "texture profile analysis," which consists of compressing a food sample with the Instron Universal Testing Machine, which plotted a curve which expresses the effort and deformation applied (Anzaldúa-Morales, 1994).

Mohsenin (1970) found that, the stress-strain curve provides very specific mechanical indices of food, such as yield strength, biocedence point, the plastic range and the breaking point. The author illustrates the above concepts on a curve (Figura 1) and defined as follows: the elastic limit (LE) represents the largest stress that a material can withstand, without losing the linear portion of the curve force-deformation, implying that the effort to remove the material can recover its original shape without damage. Biocedence point (PB) is defined as the point on the stress-strain curve in which there is an increase of deformation, not an increase in strength, in the PB certain biological materials is an indicator of the start of the internal cell rupture, implying low compression resistance; however, not all biological materials have this characteristic, because some are highly resistant to compression and these inner cell rupture occurs almost simultaneously with the external break. The plastic range is the period of the stress-strain curve between the LE and the breakpoint at which the material no longer returns to its original shape upon removal of the force. The break point (PR) is the point of the stress-strain curve in which the biological material undergoes external tissue breakdown.

resistencia a la compresión, sin embargo no todos los materiales biológicos presentan esta característica, ya que algunos son muy resistentes a la compresión y en éstos la ruptura celular interna sucede casi al mismo tiempo que la ruptura externa. El rango plástico es el periodo de la curva esfuerzo-deformación entre el LE y el punto de ruptura en el cual el material ya no recupera su forma original al retirar la fuerza. El punto de ruptura (PR) es el punto de la curva esfuerzo-deformación en la cual el material biológico sufre la ruptura externa del tejido.

Como puede verse, la curva esfuerzo-deformación constituye una herramienta muy útil para determinar la máxima carga que un material podría soportar sin sufrir daño. En este sentido, Vázquez (2000) evaluó el comportamiento mecánico de frutos de papaya "Maradol" en tres estados de madurez (madurez fisiológica; madurez intermedia y madurez de consumo) y tres posiciones de compresión (frutos en posiciones vertical, horizontal e inclinada), registrando diferencias en el factor madurez en los puntos de interés de la curva esfuerzo-deformación, sin encontrar diferencias en las posiciones de compresión (Cuadro 1). Con base en lo anterior y considerando la importancia que tiene el estudio de las propiedades mecánicas de los frutos, se procedió a realizar el presente estudio con el objetivo de evaluar el comportamiento mecánico de frutos de papaya "Maradol roja", por efecto de cinco tratamientos de fertilización química en pre-cosecha, así como el comportamiento mecánico de frutos de tres cultivares de papaya en dos estados de madurez.



**Figura 1. Puntos de interés de la curva esfuerzo-deformación en materiales biológicos (Mohsenin, 1970).**

**Figure 1. Points of interest in the stress-strain curve in biological materials (Mohsenin, 1970).**

As can be seen, the stress-strain curve is a very useful tool to determine the maximum load that a material can withstand without damaging it. In this sense, Vázquez (2000) evaluated the mechanical behavior of papaya fruits "Maradol" in three stages of maturity (physiological maturity, intermediate maturity and ripe) and three compression positions (fruits at vertical, horizontal and inclined), recording differences in the maturity factor at the points of interest of the stress-strain curve, with no differences in the positions of compression (Table 1). Based on the above and considering the importance of the study of the mechanical properties of the fruit, we proceeded to carry out the present study to evaluate the mechanical behavior of papaya fruits "Maradol Roja",

**Cuadro 1. Variables mecánicas de frutos de papaya cv. ‘Maradol Roja’ sujetos a compresión axial en tres estados de madurez y tres posiciones de compresión <sup>1/</sup> (Vázquez, 2000).**

**Table 1. Mechanical variables of papaya fruits cv. ‘Maradol Roja’ subject to axial compression at three stages of maturity and three positions of compression <sup>1/</sup> (Vázquez, 2000).**

Tratamiento	Limite elástico Newtons de fuerza	Mitad plástica Newtons de fuerza	Punto de ruptura Newtons de fuerza
Factor madurez			
M. Fisiológica	298 a	2205 a	4508 a
M. Intermedia	266 a	1460 b	2724 b
M. de Consumo	68 b	245 c	333 c
Factor posición			
Horizontal	222 a	1254 a	2646 a
Inclinada	175 a	1284 a	2450 a
Vertical	202 a	1372 a	2509 a

<sup>1/</sup> Valores con la misma letra dentro de cada factor no son diferentes estadísticamente (Tukey  $\alpha=0.05$ ).

## Materiales y métodos

Se realizaron dos experimentos en el Campo Experimental Las Huastecas (CEHUAS), del Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP), localizado a 22° 34' latitud norte y 98° 09' longitud oeste.

En el primer experimento se evaluaron frutos provenientes de cinco tratamientos de fertilización química aplicados en pre-cosecha en el cultivar de papaya "Maradol roja", con fecha de trasplante del 30 de julio de 2011. Se calculó una dosis de fertilización de N-P-K para una meta de rendimiento de 100 t/ha, en función del análisis de fertilidad del suelo y de las demandas nutrimentales del cultivo, considerando que por cada tonelada de papaya producida se extraen 1.77 kg de N; 0.2 de P y 2.12 de K y 0.35 de Ca (Cunha y Haag, 1980). También se estimaron dosis de micro-elementos (Fe, Mn, Zn y Cu), en función del análisis de fertilidad de suelo y con apoyo en Escamilla (2002), quien determinó que las concentraciones de micro-elementos en peciolas y frutos de papaya fueron los siguientes: Fe, 225.5 ppm; Mn, 32.5 ppm; Zn 32.1 ppm y Cu, 16.9 ppm.

Con estas bases se evaluaron los siguientes tratamientos de fertilización: 1. 200-66-220 (N-P-K al suelo), testigo; 2. 200-66-220-53-5 (N-P-K-Ca-Zn al suelo) + 5 unidades de Ca y 5 de Zn vía foliar; 3. 200-66-220-5-5 (N-P-K-Mn-Zn al suelo) + 5 unidades de Mn y 5 de Zn vía foliar; 4. 200-66-220-25-5 (N-P-K-Fe-Zn al suelo) + 2.5 unidades Fe y 5 de Zn vía foliar y 5. 200-66-220-5-5 (N-P-K-Cu-Zn al suelo) + 5 unidades de Cu y 5 de Zn vía foliar. La dosis de fertilización para cada tratamiento se dividió entre las 52 semanas del año, según la etapa fenológica del cultivo, estimando las cantidades de agua y fertilización semanal, con base en el método cociente de evaporación y se aplicaron a través de un sistema de riego presurizado por goteo, cuidando la compatibilidad y solubilidad de los fertilizantes. Las fuentes de fertilización utilizadas de N-P-K-Ca fueron fosfonitrato (31-4-0), MAP técnico soluble (12-61-0), nitrato de potasio (12-0-44) y nitrato de calcio (9-0-0-26), en forma respectiva y como fuentes de micro-elementos se utilizaron quelato edta de manganeso soluble (13 %), quelato edta de hierro soluble (13.2 %), quelato edta de zinc soluble (14 %) y quelato edta de cobre soluble (14 %).

El manejo agronómico del cultivo se basó en el paquete tecnológico del cultivo del papayo (Vázquez *et al.*, 2010). El diseño experimental fue en bloques completos al azar, con cuatro repeticiones y ocho plantas por repetición,

the effect of five chemical fertilizers in pre-harvest and mechanical behavior of fruits of three cultivars of papaya in two states of maturity.

## Materials and methods

Two experiments were conducted in the Experimental Field The Huastecas (CEHUAS), of the National Research Institute for Forestry, Agriculture and Livestock (INIFAP), located at 22° 34' North latitude and 98° 09' West longitude.

In the first experiment five fruits from chemical fertilization treatments applied in pre-harvest of papaya cultivar "Maradol Roja" transplant on July 30<sup>th</sup>, 2011. We calculated a dose of N-P-K fertilization for yield target of 100 t ha<sup>-1</sup>, depending on soil fertility analysis and crop nutrient demands, considering that for every ton of extracted papaya produced 1.77 kg N; and 0.2 K of P; 2.12 of K; and 0.35 of Ca (Cunha and Haag 1980). Also estimated dose of micro-elements (Fe, Mn, Zn and Cu), depending on the soil fertility analysis and with the help of Escamilla (2002), determined that the concentrations of trace elements in petioles and fruits of papaya were the following: Fe, 225.5 ppm; Mn, 32.5 ppm; Zn and 32.1 ppm; and Cu, 16.9 ppm.

With these bases the following fertilization treatments were evaluated: 1. 200-66-220 (N-P-K to the soil); control 2. 200-66-220-53-5 (N-P-K-Ca-Zn to the soil) + 5 units of Ca and 5 of Zn via foliar; 3. 200-66-220-5-5 (N-P-K-Mn-Zn to the soil) + 5 units of Mn and 5 of Zn via foliar; 4. 200-66-220-25-5 (N-P-K-Fe-Zn to the soil) + 2.5 units Fe and 5 Zn via foliar and 5. 200-66-220-5-5 (N-P-K-Zn-Cu to the soil) + 5 units of Cu and 5 Zn via foliar. The fertilization rate for each treatment was divided by the 52 weeks of the year, according to the phenological stage of the crop, estimating the amounts of water and fertilizer very week, based on the ratio of evaporation method and applied through an irrigation system of pressurized drip caring compatibility and solubility of fertilizers. The sources of N-P-K-Ca used were fosfonitrato (31-4-0), soluble technical MAP (12-61-0), potassium nitrate (12-0-44) and calcium nitrate (9-0-0-26), as respectively and as sources of micro-elements we used EDTA chelate of soluble manganese (13%), soluble iron EDTA chelate (13.2%), soluble zinc EDTA of chelate of (14%) and EDTA copper chelate soluble (14%).

The agronomic crop management was based on the technology package of the papaya crop (Vázquez *et al.*, 2010). The experimental design was a randomized complete

utilizando como parcela útil las cuatro plantas centrales. En julio de 2012, se realizó un muestreo de frutos, para lo cual se cosecharon tres frutos en estado de madurez de consumo, con base en el criterio de Santamaría *et al.* (2009), de cada una de las repeticiones, para obtener un total de 12 frutos por tratamiento. Inmediato a la cosecha, los frutos se llevaron al laboratorio poscosecha del C. E. Las Huastecas, se lavaron con jabón y agua corriente; se seleccionaron seis frutos de cada tratamiento, se envolvieron con papel, se colocaron en jvas de plástico evitando al máximo los daños mecánicos y el mismo día se trasladaron al laboratorio de "resistencia de materiales" del Instituto Tecnológico de Estudios Superiores de Monterrey (ITESM), *Campus* Tampico, para proceder a realizar la prueba de comportamiento mecánico.

La compresión fue axial, cuasiestática, es decir, que la prensa tuvo un avance lento, gradual y constante a una velocidad de 10 mm por min; se utilizó una Máquina de Prueba Universal Instron modelo 4460, la cual registró el esfuerzo y la deformación aplicados a cada espécimen. Las variables que midieron el comportamiento mecánico de los frutos fueron la fuerza (N) y deformación (mm) para alcanzar el límite elástico, el punto de biocedencia y el punto de ruptura (Mohsenin, 1970). Se comprimieron seis frutos de cada tratamiento, con un diseño experimental completamente al azar con seis repeticiones, donde cada fruto fue una unidad experimental.

En el segundo experimento se evaluaron frutos de tres cultivares de papaya en dos estados de madurez. El 30 de julio de 2011 se establecieron en campo la variedad Maradol roja y dos híbridos experimentales de papaya de la compañía Keithly Williams denominados PK 02, con características de fruto parecidas a la variedad cubana Maradol roja y PK 03, con características de fruto parecidas al cultivar mexicano conocido como "zapote" o "mamey". El manejo del cultivo se basó en el paquete tecnológico del papayo (Vázquez *et al.*, 2010). El diseño experimental fue en bloques completos al azar, con un arreglo de tratamientos factorial 2x3 y cuatro repeticiones, con plantas por repetición, donde el factor "A" fueron los estados de madurez (madurez fisiológica y madurez de consumo) y el factor "B" los tres cultivares. Los datos fueron analizados usando el procedimiento de análisis de varianza de acuerdo a los diseños señalados y la comparación de medias se realizó de acuerdo a la prueba de Tukey ( $p \leq 0.05$ ).

En julio de 2012 se realizó un muestreo, para lo cual se cosecharon tres frutos en estado de madurez 2, equivalente a "frutos verdes con una franja amarilla bien definida" y tres frutos en estado de madurez de consumo (Santamaría *et*

block with four replications and eight plants per replication, useful plot using the four central plants. In July 2012, we sampled fruit, for which three fruits were harvested at maturity for consumption, based on the criterion of Santamaría *et al.* (2009), each of the replicates for a total of 12 fruits per treatment. Immediate harvesting, the fruits are taken to the CE laboratory of postharvest in The Huasteca, washed with soap and running water were six were selected from each treatment and wrapped with paper, placed in plastic crates as possible with minimal mechanical damage and the same day was transferred to the laboratory of "strength of materials" from the Superior Study Technological Institution of Monterrey (ITESM), *Campus* Tampico, to proceed with the mechanical behavior test.

The compression was axial quasi-static; slow movement of the press, gradual and steady at a rate of 10 mm per min, using the Instron Universal Testing Machine model 4460, which recorded the applied stress and strain to each specimen. Measured variables of the mechanical behavior of fruit were force (N) and deformation (mm) to reach the elastic limit, biocedence point and break point (Mohsenin, 1970). Six fruits were compressed of each treatment with a completely randomized design with six replications each fruit was an experimental unit.

In the second experiment we evaluated fruits of three cultivars of papaya in two states of maturity. On July 30<sup>th</sup>, 2011 were settled in the field the variety Maradol Roja and two papaya experimental hybrids of the company Keithly Williams called PK 02, with characteristics similar to the variety Maradol roja and PK 03, with fruit-alike characteristics of the Mexican cultivar known as "sapote" or "mamey". The crop management was based on the technology package of papaya (Vázquez *et al.*, 2010). The experimental design was a randomized complete block with a 2x3 factorial arrangement of treatments and four replications, with plants per replication, where the "A" factor was the state of maturity (physiological maturity and ripe) and "B" the three cultivars. Data were analyzed using analysis of variance procedure according to the designated designs and comparison of means was performed according to the Tukey test ( $p \leq 0.05$ ).

In July 2012 we sampled, for which three fruits were harvested at maturity in February, equivalent to "green fruit with a yellow stripe well defined" and three fruit in ripening status (Santamaría *et al.*, 2009), each of the repetitions of the genotypes, for a total of 24 fruits per cultivar. Immediate

*al.*, 2009), de cada una de las repeticiones de los genotipos, para obtener un total de 24 frutos por cultivar. Inmediato a la cosecha, los frutos se llevaron al laboratorio postcosecha del C. E. Las Huastecas, se lavaron con jabón y agua corriente, se seleccionaron seis frutos de cada uno de los dos estados de madurez por genotipo y se envolvieron con papel; se colocaron en jivas de plástico evitando al máximo los daños mecánicos y se trasladaron de inmediato al laboratorio del ITESM, *Campus* Tampico, para proceder a realizar la prueba de comportamiento mecánico, con la misma metodología ya descrita en el anterior experimento.

## Resultados y discusión

En el primer experimento se registraron diferencias (Tukey,  $p \leq 0.05$ ) por efecto de los tratamientos de fertilización en las variables límite elástico y punto de ruptura (Cuadro 2). El tratamiento que presentó mayor fuerza de compresión para alcanzar el límite elástico y el punto de ruptura fue N-P-K+Cu-Zn, mientras que el tratamiento que registró menor fuerza en los diferentes puntos de la curva esfuerzo-deformación fue N-P-K+Mn-Zn, que resultó diferente al resto de los tratamientos.

**Cuadro 2. Fuerza de compresión (N) y deformación (mm) requeridos para alcanzar los puntos de interés de la curva esfuerzo-deformación en frutos de papaya “Maradol roja” en madurez de consumo con diferentes tratamientos de fertilización.**

**Table 2. Compression force (N) and deformation (mm) required to reach the points of interest of the stress-strain curve in papaya fruits “Maradol Roja” for ripening with different fertilization treatments.**

Tratamiento	Limite elástico		P. de biocedencia		Punto de ruptura	
	Newtons	mm	Newtons	mm	Newtons	mm
Testigo (N-P-K)	123 ab	8.0 a	150	11.0	206 ab	24.3 ab
N-P-K+Ca-Zn	100 ab	6.0 ab	130	12.0	243 ab	24.3 ab
N-P-K+Fe-Zn	83 ab	6.6 ab	100	10.0	176 ab	24.6 a
N-P-K+Mn-Zn	50 b	5.0 b	60	6.0	113 b	19.3 b
N-P-K+Cu-Zn	160 a	7.6 a	NR	NR	280 a	23.0 ab

NR= no registró punto de biocedencia.

Otro aspecto importante fue que los frutos del tratamiento N-P-K+Cu-Zn no registraron punto de biocedencia, lo que indicó un buen grado de dureza del material biológico sujeto a compresión, ya que de acuerdo con Mohsenin (1972), la ausencia de este indicador en la curva esfuerzo-deformación significa que no hay ruptura celular interna dentro del rango plástico; en el caso de los frutos con aplicaciones de Cu-Zn, la ruptura del tejido biológico sucedió al alcanzar el punto de ruptura. Los frutos de los otros tratamientos si registraron

harvesting, the fruits are taken to the laboratory of CE postharvest in The Huasteca, washed with soap and running water, six were selected fruits from each of the two stages of maturity by genotype and were wrapped with paper, placed in crates of plastic with minimal mechanical damage and immediately transferred to the laboratory of ITESM Campus Tampico, to proceed with the mechanical performance test, using the same methodology as described in the previous experiment.

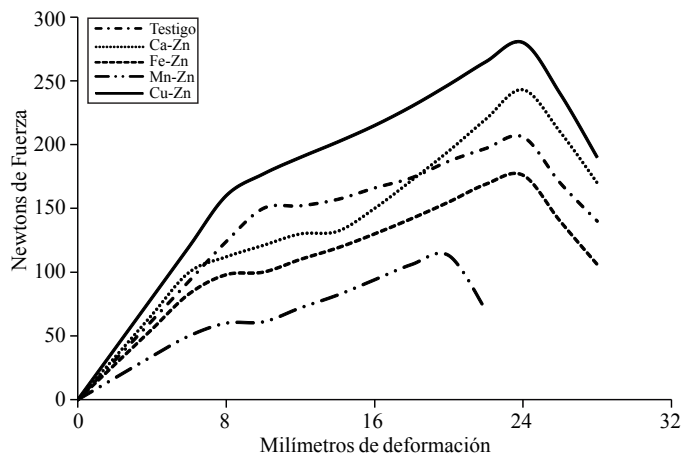
## Results and discussion

In the first experiment there were no differences (Tukey,  $p \leq 0.05$ ) the effect of fertilization treatments on yield variables and breaking point (Table 2). The treatment had higher compressive force to reach the yield strength and the breaking point was N-P-K+Cu-Zn, while the treatment which recorded less force at different points of the stress-strain curve was N-P-K+Mn-Zn, which was different from other treatments.

Another important aspect was that the results of treatment NP-K+Cu-Zn not recorded any biocedence point, indicating a good degree of hardness of the biological material subject

to compression, since according to Mohsenin (1972), the absence of this indicator in the stress-strain curve means that there is no break in the internal cellular plastic range, in the case of fruit with Cu-Zn applications, biological tissue breakdown occurred reaching breaking point. The fruits of the other treatments presented biocedence point, indicating lower hardness of biological material having inner cell rupture in the plastic range, before reaching the breaking point outside (Figure 2).

punto de biocedencia, lo que indicó menor dureza del material biológico al haber ruptura celular interna en el rango plástico, antes de alcanzar el punto de ruptura externa (Figura 2).



**Figura 2. Curvas esfuerzo-deformación de frutos de papaya Maradol con cinco tratamientos de fertilización.**

**Figure 2. Stress-strain curves of Maradol papaya fruits with five fertilization treatments.**

En cuanto a la deformación necesaria para alcanzar los puntos de interés de la curva esfuerzo-deformación, se observó un comportamiento similar en cuatro de los cinco tratamientos, con excepción del tratamiento N-P-K+Mn-Zn que resultó diferente (Tukey,  $p \leq 0.05$ ) a los demás, en virtud de que los frutos registraron los menores valores de deformación para sufrir daño interno del tejido (punto de biocedencia) y daño externo (punto de ruptura), lo que indicó una menor resistencia a la compresión.

En el segundo experimento, y de acuerdo con los análisis de varianza realizados, se detectó que en los factores madurez y cultivar (Cuadros 3, 4, 5 y 6), existieron diferencias estadísticas significativas ( $p \leq 0.05$ ). En la variable fuerza necesaria para alcanzar el límite elástico, se determinó que los frutos en madurez fisiológica fueron diferentes (Tukey,  $p \leq 0.05$ ) a los frutos en madurez de consumo y que los frutos del cultivar PK02 fueron diferentes a los frutos de Maradol roja y de PK 03 (Cuadro 7).

En la variable deformación necesaria para alcanzar el límite elástico, los frutos en madurez fisiológica fueron diferentes (Tukey,  $p \leq 0.05$ ) a los frutos en madurez de consumo, sin embargo, en esta variable no hubo diferencias entre cultivares (Cuadro 7). La importancia de estos resultados estriba en que se cuantificó la resistencia de los frutos de

As for the deformation required to achieve the points of interest in the stress-strain curve, similar behavior was observed in four of the five treatments, except treatment N-P-K+Mn-Zn resulting different (Tukey,  $p \leq .05$ ) to the others, under the fruits recorded the lowest values of deformation to suffer internal damage tissue (biocedence point) and external damage (breakpoint), indicating a lower compressive strength.

In the second experiment, and according to the analysis of variance carried out, it was found that in the factors and cultivate maturity (Tables 3, 4, 5 and 6), there were statistically significant differences ( $p \leq 0.05$ ). In the variable strength to reach the elastic limit determined that the fruits at physiological maturity were different (Tukey,  $p \leq 0.05$ ) to the ripening fruit and cultivate the fruits of PK02 were different to the fruits of Maradol Roja and PK 03 (Table 7).

In the variable deformation required to achieve yield the fruits at physiological maturity were different (Tukey,  $p \leq 0.05$ ) to the ripening fruit; however, this variable did not differ between the cultivars (Table 7). The significance of these results is that the resistance was measured in three cultivars fruits into two stages of maturity, possible compression damage because the yield represents the maximum threshold to which a biological material subjected to compression and return to its original shape upon removal of the force (Mohsenin, 1972).

**Cuadro 3. Cuadros medios y significancia de la variable “fuerza (N) necesaria para alcanzar el límite elástico” en frutos de papaya de tres cultivares en dos estados de madurez.**

**Table 3. Mean squares and significance of the variable “force (N) required to reach the elastic limit” in papaya fruit of three cultivars in two states of maturity.**

FV	GL	CM	F	P>F
Madurez	1	544272.1	1320.3	0.000 *
Cultivar	2	23838.9	57.8	0.000 *
Interacción	2	8672.2	21.0	0.000 *
Error	10	412.2		
Total	17			
CV (%)	8.44			



tres cultivares en dos estados de madurez, a los posibles daños por compresión, ya que el límite elástico representa el máximo umbral al que un material biológico puede estar sujeto a compresión y volver a su forma original al retirar la fuerza (Mohsenin, 1972).

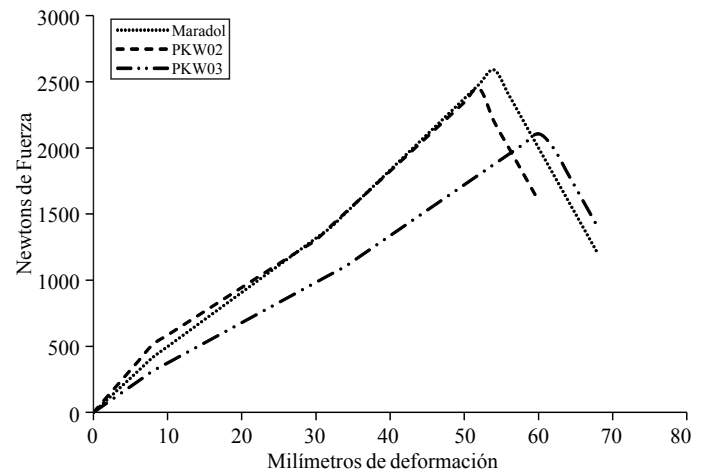
**Cuadro 4. Cuadrados medios y significancia de la variable “deformación (mm) necesaria para alcanzar el límite elástico” en frutos de papaya de tres cultivares en dos estados de madurez.**

**Table 4. Mean squares and significance of the variable “deformation (mm) required to reach the elastic limit” in papaya fruit of three cultivars in two states of maturity.**

FV	GL	CM	F	P>F
Madurez	1	22.2	19.0	0.002 *
Cultivar	2	4.6	4.0	0.052 NS
Interacción	2	6.2	5.3	0.026 *
Error	10	1.1		
Total	17			
CV (%)	17.0			

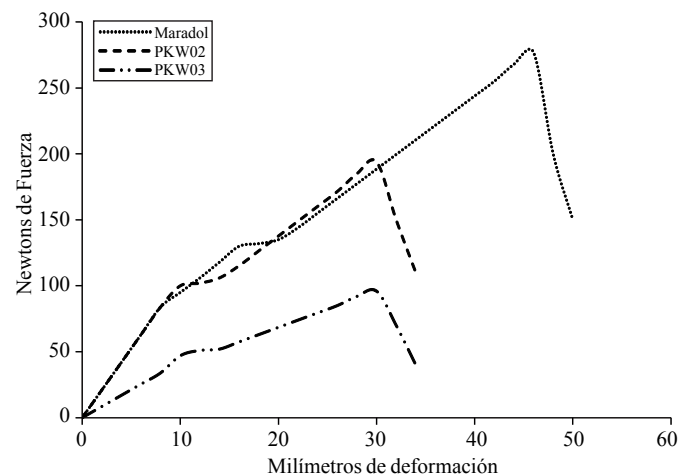
En la fuerza y deformación necesarias para alcanzar el punto de biocedencia, no fue posible realizar análisis estadístico debido a que los frutos en estado de madurez fisiológica no registraron punto de biocedencia (Figura 3), lo que implica que en estos frutos no existió ruptura celular en el rango plástico y por ende, mayor resistencia a la compresión axial. En los frutos en madurez de consumo si se registró punto de biocedencia y se encontró que el cultivar Maradol roja fue más resistente, con relación a los híbridos PK02 y PK03 (Figura 4).

En la fuerza necesaria para alcanzar el punto de ruptura externa, se determinó que los frutos en madurez fisiológica fueron diferentes (Tukey,  $p \leq 0.05$ ) a los frutos en madurez de consumo y que los frutos del cultivar Maradol roja fueron diferentes a los frutos de los híbridos PK02 y PK03. En la deformación necesaria para alcanzar el punto de ruptura externa, los frutos en madurez fisiológica fueron diferentes a los frutos en madurez de consumo y los frutos de los cultivares Maradol roja y PK02 fueron diferentes a los frutos del cultivar PK03 (Cuadro 7). Al comparar los rangos de fuerza entre estados de madurez, se observó que los frutos en madurez fisiológica presentaron promedios de fuerza seis veces mayores, con relación a los frutos en madurez de consumo para alcanzar el límite elástico y once veces superiores para alcanzar el punto de ruptura.



**Figura 3. Curvas esfuerzo-deformación de tres cultivares de papaya en madurez fisiológica.**

**Figure 3. Stress-strain curves of three cultivars of papaya at physiological maturity.**



**Figura 4. Curvas esfuerzo-deformación de tres cultivares de papaya en madurez de consumo.**

**Figure 4. Curvas stress-strain three papaya cultivars ripening.**

In the strength and deformation required to achieve biocedence point, no statistical analysis was possible because the fruit at maturity showed no physiologic biocedence point (Figure 3), implying that there was no fruit in these cell disruption in the plastic range and hence greater resistance to axial compression. In fruit ripening if biocedence point was recorded and found to be Maradol roja cultivar the most resistant in relation to the hybrid PK02 and PK03 (Figure 4).

On the strength necessary to reach the external breakpoint was determined that the fruits at physiological maturity were different (Tukey,  $p \leq 0.05$ ) to the ripening fruit and cultivate the fruits of Maradol Roja differed from the fruits

Estos resultados son similares a los reportados por Vázquez (2000), quien determinó que frutos de papaya Maradol roja en madurez fisiológica registraron promedios de fuerza de 298 N para alcanzar el límite elástico, comparado con 68 N en frutos del mismo cultivar en madurez de consumo, lo que significó un valor 4.4 veces superior. El mismo autor reportó valores de 4508 N para alcanzar el punto de ruptura en frutos de papaya Maradol roja en madurez fisiológica y 333 N en frutos del mismo cultivar en madurez de consumo, lo que implicó un valor 13.5 veces superior para los frutos en madurez fisiológica.

Villaseñor *et al.* (2006) evaluaron el comportamiento mecánico de melón (*Cucumis melo* L.) bajo compresión axial quasi-estática en dos estados de madurez y dos posiciones de compresión, determinando que los frutos menos maduros en posición vertical registraron la mayor carga de compresión para alcanzar el límite elástico y el punto de ruptura, con valores promedio de 411 y 1950 N en forma respectiva. Vázquez *et al.* (2003) evaluaron las propiedades mecánicas de frutos de papaya "Maradol roja" bajo compresión axial estática en tres estados de madurez y tres posiciones de compresión, determinando que en los frutos con menor grado de madurez en posición horizontal registraron los menores índices de relajación del esfuerzo, lo cual significó mayor resistencia a la compresión estática.

**Cuadro 5. Cuadrados medios y significancia de la variable "fuerza (N) necesaria para alcanzar el punto de ruptura" en frutos de papaya de tres cultivares en dos estados de madurez.**

**Table 5. Mean squares and significance of the variable "force (N) required to reach the breaking point" in papaya fruit of three cultivars in two states of maturity.**

FV	GL	CM	F	P>F
Madurez	1	21451250.0	7102.6	0.000 *
Cultivar	2	184316.0	61.0	0.000 *
Interacción	2	32716.0	10.8	0.003 *
Error	10	3020.2		
Total	17			
CV (%)	4.25			

Para explicar las diferencias de resistencia a la compresión axial por efecto de la madurez de los frutos, Ilker y Szczesniak (1990) señalaron que durante la madurez fisiológica de los frutos, la pectina de la pared celular primaria y lámina media es insoluble en agua y está muy ligada a la celulosa y hemicelulosa, dando dureza y cohesión a las células, sin

of PK02 and PK03 hybrids. In the deformation required to reach the external breakpoint, the fruits at physiological maturity were different from ripening fruit and the fruits of Maradol Roja, PK02 cultivars were different than cultivar fruits PK03 (Table 7). When comparing the strength ranges between stages of maturity, it was observed that the fruits at physiological maturity had mean force six times larger, in relation to fruit ripening to reach the elastic limit and eleven times higher to reach the point of rupture.

These results are similar to those reported by Vázquez (2000), who found that Maradol Roja at physiological maturity, on averages recorded force of 298 N to achieve yield, compared to 68 N in the same cultivar in fruit ripening, which represents a value 4.4 times higher. The same author reported values of 4508 N to reach the breaking point in Maradol Roja at physiological maturity and 333 N in the same cultivar in fruit ripening, which implied a value 13.5 times higher for fruit maturity physiological.

Villaseñor *et al.* (2006) evaluated the mechanical behavior of melon (*Cucumis melo* L.) under quasi-static axial compression in two states of maturity and two compression positions, determining that the less mature fruits had the highest vertical compressive load to achieve the yield strength and the breaking point, with mean values of 411 and 1950 respectively. Vázquez *et al.* (2003) evaluated the mechanical properties of papaya fruits "Maradol Roja" under static axial compression of three growth stages and three compression positions, determining that the fruits with a lower degree of maturity had the smallest horizontal relaxation rates strain, which meant an increased for static compression.

**Cuadro 6. Cuadrados medios y significancia de la variable "deformación (mm) necesaria para alcanzar el punto de ruptura" en frutos de papaya de tres cultivares en dos estados de madurez.**

**Table 6. Mean squares and significance of the variable "deformation (mm) required to reach the breaking point" in papaya of fruit three cultivars in two states of maturity.**

FV	GL	CM	F	P>F
Madurez	1	1840.2	107.0	0.000 *
Cultivar	2	143.7	8.3	0.008 *
Interacción	2	203.3	11.8	0.003 *
Error	10	17.1		
Total	17			
CV (%)	9.17			

embargo, en la medida que maduran los frutos, la pectina sufre cambios como aumento de su solubilidad, que ocasionan desprendimiento de moléculas de pectina y hemicelulosa, lo que a su vez provoca ablandamiento de los tejidos.

En mesocarpio de aguacate, Sakurai y Nevins (1997) determinaron que la resistencia de los frutos a la compresión durante su maduración se asoció positivamente con el aumento de rhamnosa, arabinosa y ácidos urónicos de la fracción soluble en agua de la pared celular, alterando las propiedades elásticas y viscoelásticas de los tejidos, hacia un mayor ablandamiento. Al analizar la respuesta a la compresión axial en pulpa de banana durante la maduración, Kojima *et al.* (1994) encontraron una disminución de la resistencia al avanzar la maduración del tejido, atribuyendo ese cambio a la pérdida de elasticidad y viscosidad de la pulpa, como consecuencia de la disminución de pectina y hemicelulosa y la conversión de almidón a azúcares.

In order to explain the differences in axial compression strength by the effect of fruit maturity, Ilker and Szczesniak (1990) noted that, during the ripeness of the fruit, the pectin of the primary cell wall and middle lamella is insoluble in water and is closely linked to the cellulose and hemicellulose, giving hardness and cohesion to the cells; however, insofar as the fruits ripen, the pectin undergoes changes such as increased solubility, causing detachment of hemicellulose and pectin molecules, which turn causes softening of fabrics.

In avocado mesocarp, Sakurai and Nevins (1997) determined that, the fruit resistance to compression during ripening was positively associated with increased rhamnase, arabinose and uronic acids in the soluble fraction of the cell wall, altering the elastic and viscoelastic properties of tissues. Analyzing the response to axial compression in banana pulp during ripening, Kojima *et al.* (1994)

**Cuadro 7. Fuerza y deformación requeridas para alcanzar los puntos de interés de la curva esfuerzo-deformación en frutos de tres cultivares de papaya sujetos a compresión en dos estados de madurez.**

**Table 7. Strength and deformation required to achieve the points of interest of the stress-strain curve in fruits of three cultivars of papaya subject to compression two stages of maturity.**

Tratamiento	Limite elástico		P. de biocedencia		Punto de ruptura	
	Newtons	mm	Newtons	mm	Newtons	mm
Maradol roja MF	416 b	7.3 a	NR	NR	2590 a	54.3 a
PK 02 MF	513 a	7.3 a	NR	NR	2450 a	52.0 a
PK 03 MF	313 c	7.6 a	NR	NR	2110 b	59.6 a
Maradol roja MC	83 a	7.3 a	130	15.0	310 a	46.6 a
PK 02 MC	83 a	4.6 a	100	7.0	193 b	29.6 b
PK 03 MC	33 b	3.6 a	50	8.0	96 b	29.0 b

<sup>1</sup>Valores con la misma letra no son diferentes estadísticamente (Tukey  $\alpha=0.05$ ). MF=madurez fisiológica; MC=madurez de consumo; NR=no registró punto de biocedencia.

Diversos autores atribuyen la degradación de la pectina y hemicelulosa al aumento de la actividad de poligalacturonasa, xilanasa, pectimetilesterasa y B-galactosidasa, que se presenta cuando los frutos tienen entre 30 y 60% de color amarillo (Paull y Chen 1983; Paull *et al.*, 1999). Con base en lo anterior, se podría señalar que los frutos en madurez fisiológica evaluados en el presente trabajo, fueron más resistentes a la compresión, con relación a los frutos en madurez de consumo, porque todavía no presentaban los efectos de la degradación de la pectina y hemicelulosa de la pared celular y lámina media, registrando más dureza y cohesión celular, mientras que los frutos en madurez de consumo, registraron poca resistencia a la compresión evidenciando que la pared celular y la lámina media se habían debilitado, favoreciendo la ruptura y la relajación celular.

found a reduced resistance, attributing the change to loss of elasticity and viscosity of the pulp, as a result of decreasing the hemicellulose and pectin and starch conversion to sugars.

Several authors attributed the degradation of pectin and hemicellulose to increased activity of polygalacturonase, xylanase, pectimetilesterasa and B-galactosidase, which occurs when the fruits are between 30 and 60% yellow (Paull and Chen 1983; Paull *et al.*, 1999). Based on the above, it could be said that the fruits at physiological maturity evaluated in this study were more resistant to compression, in relation to the ripening fruit, because it has not had the effect of pectin degradation and hemicellulose in the cell wall and middle lamella, recording rougher cell cohesion

## Conclusiones

En ambos experimentos se encontró significancia al 5% de probabilidad en las variables evaluadas por efecto de los tratamientos, lo cual implicó diferencias estadísticas significativas. En el primer experimento se determinó que el tratamiento N-P-K+Cu-Zn, presentó mayor fuerza y deformación para alcanzar el límite elástico y el punto de ruptura, mientras que el tratamiento que registró menor fuerza y deformación en los diferentes puntos de la curva esfuerzo-deformación fue N-P-K+Mn-Zn. Los frutos del tratamiento N-P-K+Cu-Zn no registraron punto de biocedencia, lo que indicó un buen grado de dureza del material biológico sujeto a compresión. En el segundo experimento se determinó que en la fuerza y deformación para llegar al límite elástico y al punto de ruptura los frutos en madurez fisiológica fueron más resistentes, con relación a los frutos en madurez de consumo y que los frutos de los cultivares PK02 y Maradol roja fueron superiores a los frutos del híbrido PK 03. La importancia de estos resultados estriba en que se cuantificó la resistencia de los frutos de papaya a los posibles daños por compresión en postcosecha, ya que el límite elástico representa el máximo umbral al que un material biológico puede estar sujeto a compresión y volver a su forma original al retirar la fuerza.

## Literatura citada

- Anzaldúa-Morales, A.. 1994. La evaluación sensorial de los alimentos en la teoría y la práctica. Editorial Acribia. 198 p.
- Brukner, P. F. and D. M. Kinch. 1968. Force-deformation ratio as an index of papaya maturation. *Transaction of the Am. Soc. Agric. Eng.* 11:437-440.
- Capellini, R. A.; Ceponis, M. J. and Lighter, G. W. 1988. Disorders in apricot and papaya shipments to the New York market. 1972-1985. *Plant Dis.* 72:366-368.
- Cunha, R. J. P. and Haag, H. P. 1980. Mineral nutrition of papaya (*Carica papaya* L.) Nutrient uptake under field conditions. *Anais da Escola Superior da Agricultura Luiz Queiroz V.* 37(2). Brazil.
- Escamilla, G. J. L. 2002. Estado nutricional de la planta con relación a la fructificación y calidad de frutos de papaya (*Carica papaya* L.) Maradol. Tesis de Doctorado. Colegio de Posgraduados, México. 131 p.
- Ilker, R. and A. S. Szczesniak. 1990. Structural and chemical bases for texture of plant foodstuffs. *J. of Texture Studies* 21: 1-36.
- Kojima, K.; Sakurai, N. and Kuraishi, S. 1994. Fruit softening in banana: correlation among stress-relaxation parameters, cell wall components and starch during ripening. *Physiologia Plantarum* 90:772-778.

while fruit ripening, showed little resistance to compression showing that, the cell wall and middle lamella had weakened, favoring rupture and cell relaxation.

## Conclusions

In both experiments were found significance at 5% probability in the variables evaluated by the effect of the treatments, which implied significant statistical differences. In the first experiment was determined that treatment N-P-K+Cu-Zn, had greater force and deformation to achieve the yield strength and the breaking point, while the lower force treatment and deformation recorded at different points of the curve stress-strain was N-P-K+Mn-Zn. The fruits of the treatment N-P-K+Cu-Zn showed no biocedence point, indicating a good degree of hardness of the biological material subject to compression. In the second experiment it was determined that the strength and deformation to reach the yield strength and the breaking point at physiological maturity of the fruits were more resistant, with regard to fruit ripening and that the fruits of the cultivars PK02 and Maradol Roja was higher than the hybrid PK 03. The significance of these results is that the resistance was measured in papaya fruits with potential postharvest compression damage because the yield represents the maximum threshold to which a biological material may be subjected to compression and re-form to their original when the force is removed.

*End of the English version*



- Kumar, L. and J. K. Wang. 1971. Response of papaya fruit to dynamic loading. *Transaction of the Am. Soc. Agric. Eng.* 14: 263-272.
- Mohsenin, N. N. 1970. Physical properties of plant and animal Materials. Vol. I. Structure, Physical Characteristics and Mechanical Properties. Gordon and Breach Science Publishers. New York. 721 p.
- Mohsenin, N. N. 1972. Mechanical properties of fruits and vegetables. Review of a decade of research applications and future needs. *Transaction of the Am. Soc. Agric. Eng.* 15: 1064-1070.
- Paull, R. E. and N. J. Chen. 1983. Postharvest variation in cell wall-degrading enzymes of papaya (*Carica papaya* L.) during fruit ripening. *Plant Physiol.* 72: 382-385.
- Paull, R. E., W. Nishijima, M. Reyes and C. Cavaletto. 1997. Postharvest handling and losses during marketing of papaya (*Carica papaya* L.). *Postharvest Biol. and Technol.* 11: 165-179.
- Paull, R. E., K. Gross and Y. Qiu. 1999. Changes in papaya cell walls during ripening. *Postharvest Biol. and Technol.* 16: 79-89.

- Peleg, M. 1974. Determination of fresh papaya's texture by penetration tests. *J. Food Sci.* 39: 156-159.
- Peleg, M.; Calzada, J. F. 1976. Stress relaxation of deformed fruits and vegetables. *J. Food Sci.* 41:1325-1329.
- Peleg, M. 1979. Evaluation by instrumental methods of the textural properties of some tropical fruits. *J. of Texture Studies.* 10: 45-65.
- Sakurai, N. and Nevins, D. J. 1997. Relationships between fruit softening and wall polysaccharides in avocado (*Persea Americana* Mill) mesocarp tissues. *Plant Cell Physiol.* 38:603-610.
- Santamaría, B. F.; Sauri, D. E.; Espadas, G. F.; Díaz, P. R.; Larqué, S. A. y Santamaría F. J. 2009. Postharvest ripening and maturity indices for Maradol papaya. *Interciencia.* 34( 8): 583-588.
- Thompson, J. F. and Mitchell, F. G. 1985. Packages for horticultural crops. Pp. 85-98. In: *Postharvest Technology for Horticultural Crops.* Kader A. A.; Kasmire, R. F.; Mitchell, F. G.; Reid M. S.; Sommer, F. N. and Thompson, J. F. (eds.). University of California, Davis. USA.
- Vázquez, G. E. 2000. Propiedades mecánicas de frutos de papaya (*Carica papaya* L.) cv. Maradol roja bajo compresión estática y questática. Tesis de doctorado. Colegio de Posgraduados, México. 128 p.
- Vázquez, G. E.; Chávez F. S.; Ariza F. R.; Yahia K. E.; Salazar Z. A.; Saucedo V. C. y Colinas, L. M. T. 2003. Propiedades mecánicas de frutos de papaya Maradol roja bajo compresión estática. *Revista Chapingo. Serie Horticultura* 9(2):341-351.
- Vázquez G. E.; Mata V. H.; Ariza F. R. y Santamaría B. F. 2010. Producción y manejo postcosecha de papaya Maradol en la planicie huasteca. Libro Técnico Núm. 4. Serie INIFAP. 155 p.
- Villaseñor, P. C. A.; Chávez, F. S. H.; Saucedo, V. C.; Salazar, Z. A.; Landois, P. L. L. y Hernández, G. L. H. 2006. Comportamiento mecánico y fisiológico de frutos de melón (*Cucumis melo* L.) bajo compresión axial. *Rev. Fitotec. Mex.* 29(2):157-162.