



Simulation of Response to Impact on Guava (*Psidiumguajava L*), using the Finite Element Method

Simulación de la Respuesta al impacto de la guayaba mediante el Método de Elementos Finitos

MSc. Leidy Laura Monzón-Monrabal¹, Dr. C. Annia García-Pereira, Ing. Arianna Plata-Cabrera,

Dr.Cs. Arturo Martínez-Rodríguez, M.Cs. Lazara Rangel-Montes de Oca, Dr.C.Antihus A Hernández-Gómez
Universidad Agraria de La Habana, Facultad de Ciencias Técnicas, San José de las Lajas, Mayabeque, Cuba.

ABSTRACT.The simulation of the behavior of guava fruits (*Psidiumguajava L*) Red Dwarf variety EEA 1-23 subjected to impact loads, using the Finite Element Method (FEM), arises from the need to evaluate the possibility of using this method of simulation as non-destructive technology for the prediction of mechanical damage. Guava fruits of the variety under study were harvested in two stages of maturity (green-made and ripened) and subjected to experimentation with the purpose of studying the effect of the efforts on the tissue when they are subjected to impact damage. At the same time, the impact process was simulated through the FEM, comparing the results with those obtained experimentally. The results showed high potentialities of the FEM for the simulation of damages in impacted guava on concrete and on wood with an accuracy of 85% to 98% for fruits in green-ripened state and from 72% to 81% for ripe fruits. The simulation runs with finite element tools showed that, for mature fruits subjected to a fall height of 0.5 and 1 m, respectively, on the surfaces under study, the effort in the area of impact of the fruit exceeded to the elastic limit of its tissues, which resulted in the order of 40 kPa.

Key words: physical-mechanical properties, damages, impact, fruits.

RESUMEN. La simulación del comportamiento del fruto de la guayaba (*PsidiumGuajava L*) variedad Enana Roja EEA 1-23 ante la acción de cargas de impacto, mediante el Método de los Elementos Finitos (MEF), surge a partir de la necesidad de evaluar la posibilidad de utilizar este método de simulación en calidad de tecnología no destructiva para la predicción de daños mecánicos. Frutos de guayaba de la variedad objeto de estudio fueron cosechados en dos estados de madurez (verde-hecho y maduro) y sometidos a experimentación con la finalidad de estudiar el efecto de los esfuerzos en el tejido cuando son sometidos a daños por impacto. Paralelamente se simuló el proceso de impacto mediante el MEF, comparándose los resultados con los obtenidos experimentalmente. Entre los resultados se evidenciaron elevadas potencialidades del MEF para la simulación de daños en guayaba impactada sobre concreto y sobre madera con una precisión de 85% a 98% para las frutas en estado de maduración verde-hecho y de 72% a 81% para las frutas maduras. Las corridas de simulación con herramientas de elementos finitos mostraron que, para los frutos maduros sometidos a una altura de caída de 0,5 y 1 m, respectivamente, sobre las superficies objeto de estudio, el esfuerzo en el área de impacto de la fruta resultó superior al límite elástico del tejido del fruto, que resultó en el orden de los 40 kPa.

Palabras clave: propiedades físico-mecánicas, daños, impacto, frutos.

INTRODUCTION

The International Trade Center, according Arvelo *et al.* (2017), referred that, in the period from 2005 to 2017, world trade in fruit practically doubled. This factor, combined with the export capacity in the Americas, opened up new opportu-

INTRODUCCIÓN

El Centro de Comercio Internacional, según Arvelo *et al.* (2017), en el periodo del 2005 al 2017 el comercio mundial de frutas prácticamente se ha duplicado. Este factor, combinado con la capacidad exportadora en América, abre nuevas

¹Autor para correspondencia: Leidy Laura Monzón Monrabal, e-mail: leidym@unah.edu.cu

Recibido: 28/02/2019.

Aprobado: 02/09/2019.

nities for the regional merchant sector in developing countries and emerging markets.

Fruits of excellent development in the tropical region such as guava are recognized for being rich in vitamin C and having wide acceptance in national and international markets. However, it is a fruit highly susceptible to damage. In Cuba, despite having large productions of more than 160 733 t, as reported by the Oficina Nacional de Estadísticas e Información (ONEI, 2017), its location in foreign markets and tourism is negligible. This is due to the fact that there is no norm for the fresh consumption of this fruit, subtracting value, regardless of the fact that guava is a climacteric fruit of wide national consumption and very versatile when consuming as a fresh or processed product (Martínez, 2003).

Fresh guava has a shelf life of 5 to 7 days at room temperature and three weeks at 8 °C (Mercado *et al.*, 1998; Yirat, 2009; Yirat *et al.*, 2009). Based on the Mexican norm NMX-FF-040-2002 (2002), the good quality of guava for human consumption implies, in general, good appearance with slight defects, such as scrapes, scratches, crusts, spots or sunburn, which do not affect their conservation and allow complying with the selection parameters. However, the fruit is subjected to a large number of events that cause mechanical damage to the skin, which generate significant economic repercussions and, at times, are difficult to detect at a glance. Some studies show that the loss of product due to mechanical damage is 12% of the total production (Wills *et al.*, 1989; Kader, 2002).

Mechanical damage can detract from the appearance of the product and create the potential for the penetration of infections, they also influence quality and prices (Martínez, 2003). To carry out a study of these damages, the nature of the distribution chain, from production to the consumer must be known, and the elements that are part of it should be defined. The solicitations to which a fruit is subjected and that generate damage due to the magnitude of the forces applied, can be classified, basically, in three types: compression, impact and vibration (Berardinelli *et al.*, 2005; Lewis *et al.*, 2007, 2008).

In recent years, as a result of the improvement of electronics and computing, considerable progress has been made in the development of non-destructive technologies for predicting and monitoring the emergence of mechanical damage in agricultural products (Ciro & Osório, 2008). Other examples of them are the reports of Baettig (2001) and Valente & Ferrandis (2003) by using acoustic methods, Santonico *et al.* (2010) and Jha *et al.* (2012) by means of electronic nose and Gejima *et al.* (2003) and López & Gómez (2004) by utilizing methods of image processing, among others. In the 21st century, mathematical or numerical methods have been deepened to this end, including artificial neural networks and the finite element method (FEM), which have been used in order to know or predict the efforts generated and establish the loading thresholds that the tissue experiences before these events (Lewis *et al.*, 2007, 2008; Sadrnia *et al.*, 2008). The present work of investigation proposes like objective: to simulate the mechanical behavior of guava fruit, variety Red Dwarf EEA 1-23, under the action of loads of impact, using FEM as way for the prediction and possible reduction of mechanical damages.

oportunidades al sector comerciante regional en los países en desarrollo y mercados emergentes.

Frutos de excelente desarrollo en la región tropical como la Guayaba son reconocidos por ser ricos en vitamina C y tener una amplia aceptación en los mercados nacionales e internacionales. No obstante, es un fruto altamente susceptible a daños. En Cuba, a pesar de contarse con grandes producciones de más de 160 733 t, según reporta la Oficina Nacional de Estadísticas e Información (ONEI, 2017), su ubicación en mercados extranjeros y el turismo es ínfima. Eso es debido a que no existe una norma para el consumo fresco de esta fruta, restándole valor, independientemente que la guayaba, es una fruta climatérica de amplio consumo nacional y muy versátil a la hora de consumir como producto fresco o elaborado (Martínez, 2003).

La guayaba en fresco cuenta con un periodo de vida de anaquel de 5 a 7 días a temperatura ambiente y de tres semanas a 8 °C (Mercado *et al.*, 1998; Yirat, 2009; Yirat *et al.*, 2009). Basados en la norma mexicana NMX-FF-040-2002 (2002), la buena calidad de la guayaba para consumo humano implica, en general, buen aspecto con defectos leves, como raspaduras, rozaduras, costras, manchas o quemaduras de sol, que no afecten su conservación y permitan cumplir con los parámetros de selección. Sin embargo, el fruto es sometido a un gran número de eventos que le ocasionan daños mecánicos en la piel, los cuales generan repercusiones económicas importantes y, en ocasiones, son difíciles de detectar a simple vista. Algunos estudios muestran que la pérdida de producto por daño mecánico, es de 12% de la producción total (Wills *et al.*, 1989; Kader, 2002).

Los daños mecánicos pueden restar valor a la apariencia del producto y crean el potencial para la penetración de infecciones, también influyen en la calidad y los precios (Martínez, 2003). Para llevar a cabo un estudio de estos daños, se debe conocer la naturaleza de la cadena de distribución, desde la producción hasta el consumidor, y definir los elementos que forman parte de ésta. Las solicitaciones a las que es sometido un fruto y que generan daño debido a la magnitud de las fuerzas aplicadas, pueden clasificarse, básicamente, en tres tipos: compresión, impacto y vibración (Berardinelli *et al.*, 2005; Lewis *et al.*, 2007, 2008).

En los últimos años, como consecuencia del perfeccionamiento de la electrónica y la informática, se ha avanzado considerablemente en el desarrollo de tecnologías no destructivas para la predicción y monitoreo del surgimiento de daños mecánicos en productos agrícolas de acuerdo a Ciro & Osório (2008), empleándose métodos acústicos Baettig, (2001); Valente y Ferrandis (2003); nariz electrónica Santonico *et al.* (2010); Jha *et al.* (2012); métodos de procesamiento de imágenes Gejima *et al.* (2003); López & Gómez (2004), entre otros. Ya en el siglo XXI, se ha profundizado en métodos matemáticos o numéricos con este fin, entre ellos las redes neuronales artificiales y el método de los elementos finitos (MEF), que han sido empleados con la finalidad de conocer o predecir los esfuerzos generados y establecer los umbrales de carga que el tejido experimenta ante estos eventos (Lewis *et al.*, 2007, 2008; Sadrnia *et al.*, 2008). El presente trabajo de investigación propone como objetivo: simular el comportamiento mecánico del fruto de la guayaba variedad Enana Roja EEA 1-23, bajo la acción de cargas de impacto, empleando el MEF, como vía para la predicción y posible reducción de daños mecánicos.

METHODS

Experimental Conditions and Sampling



The samples of the fruits under study were obtained in “Las Papas” Farm belonging to the National Institute of Agricultural Sciences located in Mayabeque Province, Cuba. The plants were 7 years old and had a planting frame of 2 m x 2 m. For the collection of samples, a panel of experts was used, using the fruit size as a common criterion, classifying according to two maturation stages (MS-I: green-made and MS-III-mature) (Table 1), according to Yirat (2009) and Yirat *et al.*(2009).

MÉTODOS

Condiciones experimentales y muestreo

Las muestras de los frutos objeto de estudio fueron obtenidas en la Finca “Las Papas” perteneciente al Instituto Nacional de Ciencias Agrícolas ubicado en la provincia Mayabeque de la República de Cuba. Las plantas contaban con 7 años de edad y un marco de plantación de 2 m x 2 m. Para la recolección de las muestras se empleó un panel de expertos, utilizando como criterio común la talla del fruto, clasificándose (Tabla 1) de acuerdo a dos estados de maduración (EMI: verde-hecho y EMIII- maduro) según Yirat(2009) y Yirat *et al.*(2009).

TABLE 1. Maturation States
TABLA 1. Estados de maduración

| Maturation States (MS) | |
|------------------------|---|
| I |  Green made |
| III |  Mature |

Only two maturation stages are selected because the fruit is usually harvested for export in the MS-I state (physiological maturity) and is usually more susceptible to damage in the MS-III (mature) state, hence the most interesting ones.

The number of samples is determined through Expression 1, using the statistical program STATGRAPHICS Plus 5.1.

$$n = \frac{\sigma^2 t^2}{\Delta^2} \quad (1)$$

where:

n: sample size,

t: student's criterion for a level of significance s;

σ : quadratic mean deviation;

Δ : expected error for the mean with a level of significance s.

Impact Tests

The sampled fruits were transported at room temperature for processing to the quality laboratory of the Agrarian University of Havana, in a time not exceeding 5 min. At the time of receiving, all fruits were listed and weighed. Once subjected to the impact tests, their behavior was controlled until 64 h after the damage arose. Two levels of impact were caused by freely dropping fruits from two heights: 0.5 m and 1.0 m, on two types of surface: wood and concrete, as they correspond to the characteristics of the post-harvest guava processes in Cuba.

To carry out this test the samples were divided into five groups of 10 fruits each, for 100 samples, of which 20 were not subjected to impact, remaining as control. Table 2 shows the experimental design of the impact tests.

Se seleccionan solo dos estados de maduración debido a que la fruta suele recogerse para su exportación en el estado EM-I (madurez fisiológica) y suele ser más susceptible a daños en el estado EM-III (maduro), de ahí que sean los de mayor interés.

El número de muestras se determina a través de la expresión 1 mediante el programa estadístico STATGRAPHICS Plus 5.1.

$$n = \frac{\sigma^2 t^2}{\Delta^2} \quad (1)$$

donde:

n: tamaño de la muestra,

t: criterio de student para un nivel de significación s;

σ : **desviación media cuadrática**;

Δ : **error** esperado para la media con un nivel de significación s.

Ensayos de impacto

Los frutos muestreados eran transportados a temperatura ambiente para su procesamiento hasta el laboratorio de calidad de la Universidad Agraria de La Habana, en un tiempo no mayor de 5 min. Al momento de la recepción todas las frutas eran enumeradas y pesadas. Una vez sometidas a los ensayos de impacto se controlaba el comportamiento de las mismas hasta las 64 h de surgido el daño. Dos niveles de impacto fueron provocados dejando caer libremente las frutas desde dos alturas: 0,5 m y 1.0 m, sobre dos tipos de superficie: madera y concreto, por corresponder con las características de los procesos postcosecha de guayaba en Cuba.

Para llevar a cabo dicho ensayo las muestras fueron divididas en cinco grupos de 10 frutos cada uno, para un total de 100 muestras, de las cuales 20 no fueron sometidas a impacto, quedando en calidad de testigos. En la Tabla 2 se muestra el diseño experimental de los ensayos de impacto.

TABLE 2. Fruit groups analyzed in the experiment
TABLA 2. Grupos de frutos analizados en el experimento

| Group | Amount of fruits | Maturationstates | Fallheights | Fallingsurface |
|-------|------------------|------------------|----------------|--------------------|
| 1 | 10 | | 1 m | Concrete (C-1 m) |
| 2 | 10 | MS-I | 0,5 m | Concrete (C-0,5 m) |
| 3 | 10 | | 1 m | Wood (W-1 m) |
| 4 | 10 | | 0,5 m | Wood (W -0,5 m) |
| 5 | 10 | | Witness | Witness |
| 1 | 10 | | 1 m | Concrete (C-1 m) |
| 2 | 10 | MS-III | 0,5 m | Concrete (C-0,5 m) |
| 3 | 10 | | 1 m | Wood (W-1 m) |
| 4 | 10 | | 0,5 m | Wood (W-0,5 m) |
| 5 | 10 | | Witness | Witness |

The monitoring was carried out at 0, 24, 48 and 64 hours after the experiments, since, according to Falcón *et al.* (2011), the fruits of this variety subjected to impact begin to show the effect of the damage 24 hours after the impact. During the monitoring, the main properties that define the conservation and quality of the fruit were taken into account, as well as the appearance of the damage. The conservation was carried out at room temperature in wooden packaging, controlling the climatic variables of local and external temperature, as well as the relative humidity.

Determination of Physical-Mechanical Properties

The main physical-mechanical properties required in the research process were determined experimentally. The methods and means used in the different determinations are described below:

Size: The polar diameter (m) and the equatorial diameter (n) were measured with a STAINLESS HARDENED digital vernier, (Annex 5, Figure 4) from 0 to 150 mm ± 0.01 mm precision. Average values were determined and other relevant statistics, as well as for the rest of the properties object of determination.

Mass: It was determined using an electronic balance model LG-1001^a from 0 to 1000 (g) / 0.1 (g) of Chinese manufacture. Three repetitions per fruit were made.

Density: It was determined applying Archimedes Principle from obtaining the mass and the volume displaced during the immersion of the fruit in a container with water, according to Expression 2 (Martínez *et al.*, 2017).

$$\delta = \frac{m}{v}, \left[\frac{g}{cm^3} \right] \quad (2)$$

where:

m: mass of the fruit, (g);

v: volume of the fruit, (cm³).

Elastic Limit: Young's Modulus, the apparent Poisson's coefficient of guava fruit and the maximum breaking stress were determined with the use of a digital compactometer model CEMA-C08, based on the MagnessTaylor Principle, 0 to 1000 (kgf) / 0.01 (kgf), manufactured domestically.

The elasticity limit of guava fruits was determined using the method proposed by Chávez *et al.* (2000) and utilizing Expression 3 to determine the effort.

El monitoreo se realizó a las 0, 24, 48 y 64 h de realizados los experimentos, ya que según Falcón *et al.* (2011), las frutas de esta variedad sometidas a impacto comienzan a mostrar el efecto del daño después de 24 h de impactadas. Durante el monitoreo se tuvo en cuenta las principales propiedades que definen la conservación y la calidad del fruto, así como la aparición del daño. La conservación se realizó a temperatura ambiente en embalajes de madera, controlando las variables climáticas de temperatura local y exterior, así como la humedad relativa.

Determinación de las propiedades físico-mecánicas

Las principales propiedades físico-mecánicas requeridas en el proceso de investigación se determinan experimentalmente. Seguidamente se describen los métodos y medios empleados en las diferentes determinaciones:

Talla: Se miden el diámetro polar (m) y el diámetro ecuatorial (n) con un pie de rey digital marca STAINLESS HARDENED, (Anexo 5, Figura 4) de 0 a 150 mm, 0,01 mm de precisión, determinándose los valores promedios y otros estadígrafos relevantes, al igual que para el resto de las propiedades objeto de determinación;

Masa: Se determina empleando una balanza electrónica modelo LG-1001^a de 0 a 1000 (g) / 0,1 (g) de fabricación China, realizando tres repeticiones por fruto;

Densidad: Se determina aplicando el principio de Arquímedes a partir de la obtención de la masa y el volumen desplazado durante la inmersión del fruto en un recipiente con agua, según la expresión 2 (Martínez *et al.*, 2017).

$$\delta = \frac{m}{v}, \left[\frac{g}{cm^3} \right] \quad (2)$$

donde:

m: masa del fruto, (g);

v: volumen de la fruta, (cm³).

El límite de elasticidad, el módulo de Young y el coeficiente de Poisson aparentes del fruto de guayaba, y el esfuerzo máximo de ruptura se determinan con la utilización de un compactómetro digital modelo CEMA-C08, basado en el principio MagnessTaylor, 0 a 1000 (kgf) / 0,01 (kgf), de fabricación nacional.

El límite de elasticidad de los frutos de guayaba se determina por el método propuesto por Chávez *et al.* (2000) y empleando la expresión 3 para la determinación del esfuerzo.

$$\sigma = \frac{F}{A}, MPa \quad (3)$$

where:

σ : effort applied, (MPa);

F: force applied, (N);

A: contact area, (m²).

The Young's Modulus or apparent elasticity modulus was determined from Expression 4 (Mercado *et al.*, 2005).

$$E = \frac{F_m \cdot L}{A \cdot \Delta L}, MPa \quad (4)$$

where:

E: Modulus of elasticity, (MPa);

F_m: Maximum firmness to compression before breaking the fruit, (N);

L: Longitudinal diameter, (mm);

ΔL : Deformation of the longitudinal diameter, (mm).

Apparent Poisson Coefficient: It was determined from Expression 5 (Ciro & Osório, 2008 and Shirmohammadi *et al.*, 2012), based on the definition of Poisson's Coefficient:

$$\mu = -\frac{\frac{\Delta D}{D_0}}{\frac{\Delta L}{L_0}} \quad (5)$$

where:

μ = Apparent Poisson's Coefficient, (dimensionless);

ΔD = Deformation of the transverse diameter, (mm);

D₀ = Initial transverse diameter, (mm);

Damage Assessment by Impact

Visual damage was measured using the methodology proposed by Menesatti & Paglia (2001), with the help of a caliper from 0 to 150 mm ± 0.01 mm precision STAINLESS HARDENED mark. Measurements were taken on two perpendicular axes (smaller diameter and larger diameter, Figure 1) of the damaged area (usually elliptical), and, with this, the area A of the bruise was calculated by Expression 6.

$$A = D_d * S_d * \pi, [m^2] \quad (6)$$

where:

D_d: maximum dimension of the damaged area, (m);

S_d: minimum dimension of the damaged area, (m).



FIGURE 1. Measurement of damaged areas of guava fruit.
FIGURA 1. Medición de las áreas dañadas del fruto de guayaba.

$$\sigma = \frac{F}{A}, MPa \quad (3)$$

donde:

σ : Esfuerzo aplicado, (MPa);

F: Fuerza aplicada, (N);

A: Área de contacto, (m²);

El **módulo de Young** o módulo de Elasticidad aparente se determina a partir de la expresión 4 (Mercado *et al.*, 2005).

$$E = \frac{F_m \cdot L}{A \cdot \Delta L}, MPa \quad (4)$$

donde:

E: Módulo de elasticidad, (MPa);

F_m: Firmeza máxima a la compresión antes de romper el fruto, (N);

L: Diámetro longitudinal, (mm);

ΔL : Deformación del diámetro longitudinal, (mm).

Coefficiente de Poisson aparente: Se determinó a partir de la expresión (5) (Ciro y Osório (2008); Shirmohammadi *et al.* (2012), basada en la definición del coeficiente de Poisson:

$$\mu = -\frac{\frac{\Delta D}{D_0}}{\frac{\Delta L}{L_0}} \quad (5)$$

donde:

Coefficiente de Poisson aparente, (adimensional);

ΔD = Deformación del diámetro transversal, (mm);

D₀ = Diámetro transversal inicial, (mm);

Evaluación del daño por impacto

El daño visual se midió empleando la metodología propuesta por Menesatti y Paglia (2001) con ayuda de un calibre pie de rey de 0 a 150 mm ± 0,01 mm de precisión marca STAINLESS HARDENED, tomándose medidas en dos ejes perpendiculares (diámetro menor y diámetro mayor, Figura 1) de la zona dañada (por lo general de forma elíptica), y con ello se calculó el área A de la magulladura por la expresión 6.

$$A = D_d * S_d * \pi, [m^2] \quad (6)$$

donde:

D_d: dimensión máxima del área dañada, (m);

S_d: dimensión mínima del área dañada, (m).

To determine the depth of the bruise on the damaged fruit, the methodology proposed by Menesatti & Paglia (2001) was applied. The center of the bruise was determined and so, the point furthest towards the interior of the fruit and the distance from this point to the outside of the fruit, as shown in Figure 2.

Para determinar la profundidad de la magulladura en la fruta dañada, se aplica la metodología propuesta por Menesatti y Paglia (2001) determinándose el centro de la magulladura y seguidamente se delimita el punto más alejado hacia el interior de la fruta y se mide la distancia desde este punto hasta el exterior de la fruta según se muestra en la Figura 2.

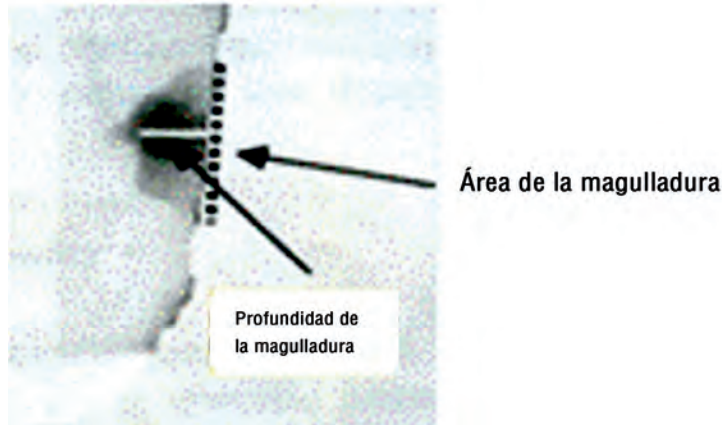


FIGURE 2. Scheme of measurement of the depth of the bruise.
FIGURA 2. Esquema de medición de la profundidad de la magulladura.

Digitized Model of the Fruit

The digitized model of the fruit was made with the help of the SolidWorks 2013 program Shih (2013), with the aim of predicting, by simulation using the finite element method, the behavior of the fruit of the variety Red Dwarf guava EEA 1-23, before impact loads.

For the construction of the geometric model, a volume of revolution was elaborated starting from a transverse half-section of the fruit with maximum diameter and average height. (Figure 3). For the fruit material, a homogeneous-continuous-isotropic-linear-elastic constitutive model was accepted.

Modelo digitalizado del fruto

El modelo digitalizado del fruto se realizó con la ayuda del programa SolidWorks 2013 Shih(2013), con el objetivo de predecir, mediante simulación aplicando el método de los elementos finitos, el comportamiento del fruto de la guayaba variedad Enana Roja EEA 1-23, ante cargas de impacto.

Para la construcción del modelo geométrico se elaboró un volumen de revolución partiendo de una semisección transversal del fruto con diámetro máximo y altura promedios. (Figura 3). Para el material del fruto se asumió un modelo constitutivo homogéneo-continuo-isotrópico-lineal-elástico.

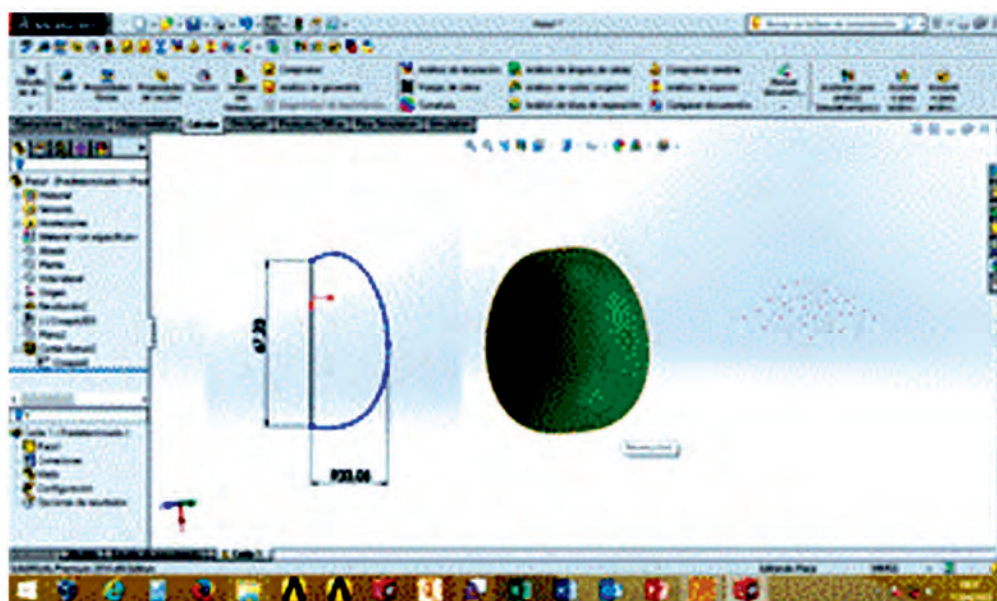


FIGURE 3. Geometrical model of the fruit, made with SolidWorks 2013 solid modeler Shih (2013).
FIGURA 3. Modelo geométrico de la fruta, realizado con el modelador de sólidos SolidWorks 2013 Shih (2013).

Once the solid was created with the characteristics of the fruit, such as size, shape and appearance, the program was fed with the physical-mechanical properties necessary for this study and which characterize both, the fruit and the materials on which it impacted: density, modulus of elasticity, elastic limit and Poisson's Coefficient. The properties corresponding to wood and concrete were taken from the materials library of SolidWorks 2013 Shih (2013), while for guava, the results of the properties obtained experimentally in the framework of this research were introduced.

After defining the characteristics of the material, the equatorial region of the fruit was chosen as the impact zone and two levels of fall distance were simulated: 1 m and 0.5 m. The initial trace in the impact zone was determined from the deformation that occurs in the fruit by its own weight, supported on the corresponding surface, for which Expression 7, according to Pisarenko and Yakovlev (1979), was used, which makes possible to determine the contact trace between a spherical body and a plane.

$$a = 0,908 \cdot 6 \sqrt[3]{P * R \left(\frac{1-\mu_1^2}{E_1} + \frac{1-\mu_2^2}{E_2} \right)}, [m] \quad (7)$$

where:

P- force that intervenes in the fall of the fruit (force of gravity), (N)

R- radius of the fruit, (m)

μ_1 - apparent Poisson's coefficient of the fruit

μ_2 -apparent Poisson's coefficient of the material impacted by the fruit

E1- module of apparent elasticity of the fruit, (MPa)

E2 - modulus of elasticity of the impacted material, (MPa)

Once the geometric model and the properties of the materials were defined, the finite element meshing was carried out using the corresponding SolidWorks 2013 tools Shih (2013).

Prediction of Errors with Respect to the Experimental Model

This procedure was carried out to determine the forecast errors of the model, for which Expression 8 was used (García *et al.*, 2008).

$$E_{mod} = \frac{M_{exp} - M_{mod}}{M_{exp}} * 100, [\%] \quad (8)$$

where:

M_{exp} - real magnitude observed experimentally

M_{mod} - magnitude predicted by the model

The measurements obtained from the expression made possible to determine how far the model was able to predict accurately, the value of a variable at a given point. To know the accuracy of the response through the model in the evaluated interval, a comparison of samples was made, where the experimental and model values were evaluated, determining the dependence of the results.

Una vez creado el sólido con las características propias de la fruta, tales como: tamaño, forma y apariencia, se procede a alimentar el programa con las propiedades físico-mecánicas necesarias para este estudio y que caracterizan, tanto a la fruta, como a los materiales sobre los que impacta: densidad, módulo de elasticidad, límite elástico y coeficiente de Poisson. Las propiedades correspondientes a la madera y el concreto son tomados de la biblioteca de materiales de SolidWorks 2013 Shih (2013), mientras que para la guayaba se introducen los resultados de las propiedades obtenidos experimentalmente en el marco de esta investigación.

Después de definidas las características propias del material, se eligió como zona de impacto la región ecuatorial del fruto y se simuló dos niveles de distancia de caída: 1 m y 0,5 m. La huella inicial en la zona de impacto se determinó a partir de la deformación que se produce en el fruto por su propio peso, apoyado en la superficie correspondiente, para lo cual se empleó la expresión 7 según Pisarenko y Yakovlev (1979), que posibilita determinar la huella de contacto entre un cuerpo esférico y un plano.

$$a = 0,908 \cdot 6 \sqrt[3]{P * R \left(\frac{1-\mu_1^2}{E_1} + \frac{1-\mu_2^2}{E_2} \right)}, [m] \quad (7)$$

donde:

P- fuerza que interviene en la caída del fruto (fuerza de gravedad), (N);

R- radio del fruto, (m);

μ_1 - coeficiente de Poisson aparente del fruto;

μ_2 -coeficiente de Poisson aparente del material impactado por el fruto;

E₁- módulo de elasticidad aparente del fruto, (MPa);

E₂- módulo de elasticidad del material impactado, (MPa).

Una vez definidos el modelo geométrico y las propiedades de los materiales, se procede al mallado de elementos finitos empleando las herramientas correspondientes de SolidWorks 2013 Shih (2013).

Predicción de los errores respecto al modelo experimental

Este procedimiento se realiza para determinar los errores de pronóstico del modelo, para lo cual se emplea la expresión (8) (García *et al.*, 2008).

$$E_{mod} = \frac{M_{exp} - M_{mod}}{M_{exp}} * 100, [\%] \quad (8)$$

donde:

M_{exp} - magnitud real observada experimentalmente,

M_{mod} - magnitud pronosticada por el modelo.

Las medidas obtenidas a partir de la expresión posibilitan determinar hasta donde es capaz el modelo de predecir con exactitud el valor de una variable en un punto determinado. Para conocer la exactitud de la respuesta del modelo en todo el intervalo evaluado, se realiza una comparación de muestras, donde se evalúan los valores experimentales y los del modelo, determinando la dependencia de los resultados.

RESULTS AND DISCUSSION

Mechanical Physical Properties

Table 4 shows the physical properties that characterize the Red Dwarf hybrid EEA1-23, in the two maturation stages studied. The variability in physical properties depends on several factors, among them, the variety, the conditions of the production environment, the agronomic and nutritional management of the crop, etc. The values of size, mass and density obtained coincide with the ranges defined by Yirat (2009) for this variety.

TABLE 4. Physical properties of the fruit for two stages of maturation
TABLA 4. Propiedades físicas de la fruta para dos estados de maduración

| Properties | Middlevalue | | Standard deviation | |
|------------------------|-----------------------|------------------------|-----------------------|-----------------------|
| | MS- I | MS-III | MS-I | MS-III |
| Polar diameter (m) | 66,9x10 ⁻³ | 67,01x10 ⁻³ | 2,07x10 ⁻³ | 1,8x10 |
| Equatorialdiameter (m) | 65,9x10 ⁻³ | 66,39x10 ⁻³ | 2,55x10 ⁻³ | 2,15x10 ⁻³ |
| Mass (g) | 204,79 | 215,20 | 29,35 | 33,51 |
| Density (g / m3) | 983,06 | 1 008,06 | 34,40 | 26,64 |

Table 5 shows the average results obtained for the elastic limit, the apparent modulus of elasticity and the apparent Poisson's coefficient, which characterize the mechanical properties of the material. The results show that as the fruits reach the stage of maturation III, there is a decrease in the modulus of elasticity due to the resistance of the material with maturation decreases, being more easily deformable by minor efforts. That coincides with Mercado *et al.* (2005) and Martínez *et al.* (2017), who state that there is a relationship: lower modulus of elasticity-greater degree of maturity.

TABLE 5. Physical-mechanical properties of guava fruits
TABLA 5. Propiedades físico-mecánicas de las frutas de guayaba

| Maturation states | Elasticitylimit (MPa) | Elasticity module (MPa) | Poisson'scoefficient |
|-------------------|-----------------------|-------------------------|----------------------|
| MS-I | 0,34 (± 0,018) | 3,71 (± 0, 15) | 0,34 (± 0,026) |
| MS-III | 0,04 (± 0,004) | 0,51 (± 0,032) | 0,49 (± 0,023) |

Table 6 shows the average values of the area and depth of the bruises of the fruits as a function of the height and the area impacted for each state of maturation. In the fruits of the MS-I, the greatest and depthestareas of bruises were observed in those that were impacted at a height of 1 m in wood and concrete, reporting values of 8.3x10⁻⁴ m² and 13.6x10⁻³ and 20.7x10⁻³ m, respectively. Something similar occurs in the fruits of the MS-III, in which the highest values of the damaged area were observed for impacts from a height of 1 m on concrete and wood surfaces, reaching the areas of bruising average values of 38.04x10⁻⁴ and 28.04 x10⁻⁴ m², as well as a depth of 30.4x10⁻³ and 28.7x10⁻³ m, respectively. It was appreciated, as expected, that the bruised area induced in the fruit impacted on concrete was superior to the case of wood. This is understandable due to the resistive behavior of both materials, that is, different responses to tensile-compression, modulus of elasticity, deformation, etc. According to O'Brien & Gaffney (1983), the magnitude

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Propiedades físico mecánicas

La Tabla 4 muestra las propiedades físicas que caracterizan el híbrido Enana Roja EEA1-23, en los dos estados de maduración estudiados. La variabilidad en las propiedades físicas depende de varios factores; entre ellos, la variedad, las condiciones del ambiente de producción, el manejo agronómico y nutricional del cultivo, etc. Los valores de talla, masa y densidad coinciden con los rangos obtenidos por Yirat(2009) para esta variedad.

En la Tabla 5 se muestra los resultados promedios obtenidos para el límite elástico, el módulo de elasticidad aparente y el coeficiente de Poisson aparente, los cuales caracterizan las propiedades mecánicas del material. Los resultados obtenidos muestran como a medida en que los frutos van alcanzando el estado de maduración III, se produce un decrecimiento en el módulo de elasticidad debido a que la resistencia del material con la maduración disminuye, siendo más fácilmente deformable para esfuerzos menores,coincidiendo con Mercado *et al.* (2005) y Martínez *et al.*(2017), quienes plantean que existe una relación: menor módulo de elasticidad-mayor grado de madurez.

La Tabla 6 muestra los valores promedios del área y profundidad de las magulladuras de las frutas en función de la altura y la superficie impactada para cada estado de maduración. En los frutos del EM-I las mayores áreas y profundidad de las magulladuras se observan en los que fueron impactados a una altura de 1 m en madera y concreto, reportándose valores de 8,3x10⁻⁴ y 25,2x10⁻⁴ m² y 13,6x10⁻³ y 20,7 x10⁻³ m respectivamente. Algo similar ocurre en los frutos del EM-III, en los que se observan los mayores valores del área dañada para impactos desde una altura de 1 m sobre superficies de concreto y madera, alcanzando las áreas de magulladura valores medios de 38,04x10⁻⁴ y 28,04x10⁻⁴ m², así como una profundidad de 30,4 x10⁻³ y 28,7 x10⁻³ m, respectivamente. Se aprecia, como es de esperar, que el área magullada inducida en el fruto impactado sobre concreto resulta superior al caso de la madera. Ello es comprensible debido al comportamiento resistivo de ambos materiales, es decir diferentes respuestas a tracción-compresión, módulos de elasticidad, deformación, etc. Según O'Brien y Gaffney(1983)

of the impact damage in fruits depends to a great extent on the physical characteristics of the fall surface.

la magnitud del daño por impacto en frutos depende en gran medida de las características físicas de la superficie de caída.

TABLE 6. Results of the average values of the area and depth of the bruises as a function of the height and the surface impacted by maturation state
TABLA 6. Resultados de los valores promedios del área y profundidad de las magulladuras en función de la altura y la superficie impactada por estado de maduración

| MaturationState | I | | | |
|----------------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|
| | Wood | | Concrete | |
| Surfaces | | | | |
| Height (m) | 0,5 | 1 | 0,5 | 1 |
| Area of bruise (m ²) | 4,7x10 ⁻⁴ | 8,3x10 ⁻⁴ | 5,9x10 ⁻⁴ | 25,2x10 ⁻⁴ |
| Depth of the bruise (m) | 9,7x10 ⁻³ | 13,6x10 ⁻³ | 10,6 x10 ⁻³ | 20,7x10 ⁻³ |
| State of maturation | III | | | |
| Surfaces | | | | |
| Height (m) | 0,5 | 1 | 0,5 | 1 |
| Bruisearea (m ²) | 17,03x10 ⁻⁴ | 28,04x10 ⁻⁴ | 23,6x10 ⁻⁴ | 38,04x10 ⁻⁴ |
| Depth of the bruise (m) | 20,7 x10 ⁻³ | 28,7 x10 ⁻³ | 21,7 x10 ⁻³ | 30,4 x10 ⁻³ |

Digital Model to Explain the Behavior of Guava Fruit

Once the solid was drawn with the characteristics of the fruit such as size, shape and appearance, the program was fed with the physical and mechanical properties that characterize it as: Modulus of Elasticity, Limit of elasticity, Poisson and Density and meshing was generated obtaining tetrahedral second order solids (Figure 4). An amount of 13 168 elements was obtained with 8 788 nodes. The choice of this element was justified by its high precision and good representativeness of the shape limit according to Martínez *et al.* (2017), for fruits of elliptical geometry such as guava.

Figure 4 shows a sketch of the fruit highlighting the impact zone (A) and the meshing (B).

Modelo digital para explicar el comportamiento del fruto de la guayaba

Una vez dibujado el sólido con las características propias de la fruta como: tamaño, forma y apariencia, se procede a alimentar el programa con las propiedades físico mecánicas que caracterizan la misma como: Módulo de Elasticidad, Límite de elasticidad, coeficiente de Poisson y Densidad y se genera el mallado obteniéndose **sólidos tetraédricos de segundo orden (Figura 4)**. Se obtuvo un total de 13 168 elementos con un total de 8 788 nodos. La elección de este elemento se justifica por su alta precisión y buena representatividad del límite de la forma según Martínez *et al.*(2017), para frutos de geometría elíptica como la guayaba.

La Figura 4 muestra un boceto del fruto resaltando la zona de impacto (A) y el mallado (B).

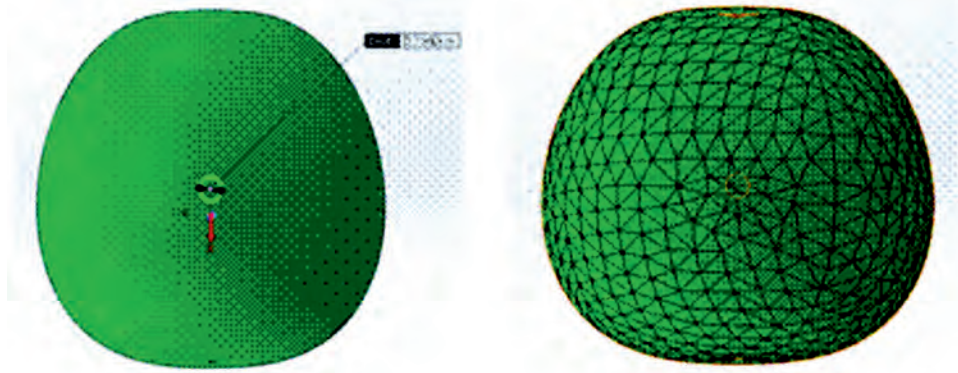


FIGURE 4. Sketch of guava with the area of the impact zone (A) and the mesh (B).
 FIGURA 4. Boceto de la guayaba con el área de la zona de impacto (A) y el mallado (B).

Figures 5 and 6 show the equivalent voltages (Von Mises) that occur in the nodes corresponding to the impact zone for different fruit drop heights by ripening states, obtained during the simulation. In Figure 5, the maximum values of stresses or equivalent stresses (Von Mises) pro-

En las Figuras 5 y 6 se muestran las tensiones equivalentes (Von Mises) que se producen en los nodos correspondientes a la zona de impacto para las diferentes alturas de caída del fruto por estados de maduración, obtenidos durante la simulación. En la primera se puede observar los valores máximos de tensiones o

duced in fruits in MS-I (indicated in red color), with a fall height of 1 and 0.5 m in both surfaces studied are shown. They were, for wood, values of 320.9 and 235.7 kPa and for concrete, of 331.8 and 239.7 kPa, respectively. It was evident that these stress values did not exceed the experimentally determined elastic limit values (340 kPa) for the simulation of the fruit in this state.

In Figure 6, it can be seen that the maximum values of effort for fruits in MS-III, reached 201.5 and 214.2 kPa for those impacted with a fall height of 1 m and 150.5 and 170.2 kPa to 0.5 m, on wood and concrete surface, respectively. It can be stated that for the two stages of maturation studied as the height of fall decreases, the efforts in the nodes of the impact zone also decrease. For the MS-III, at a fall height of 0.5 and 1.0 m, with respect to the impact surface, stresses were caused that were above the value of the stress corresponding to the elastic limit of the fruit tissue. This means that there is a very high probability that the cells of guava fruit tissue have undergone irreversible structural damage and, consequently, changes in their overall metabolism. The tissue of the fruits that receives a mechanical effort, either by static or dynamic load, can have permanent structural damage depending on the intensity of the effort. The immediate effect is the oxidation of phenolic compounds by the enzyme catechol oxidase, which demands an increase in oxygen consumption (Kader, 2002; Knee, 2002; Knee & Miller, 2002; Berardinelli *et al.*, 2005). In guava fruits in MS-I, (Criolla variety) Martínez *et al.* (2017), reported maximum stress values of 351.2 kPa at a falling height of 1 m and 256.1 kPa at 0.5 m.

esfuerzos equivalentes (Von Mises) que se producen en los frutos en EM-I (señalados en color rojo), con una altura de caída de 1 y 0,5 m en las dos superficies estudiadas, para madera con valores de 320,9 y 235,7 kPa y en concreto de 331,8 y 239,7 kPa, respectivamente. Se evidencia que estos valores de esfuerzos no superan los valores del límite elástico determinados experimentalmente (340 kPa) para la simulación del fruto en este estado.

En la segunda (Figura 6), se aprecia que los valores máximos de esfuerzo para los frutos en EM-III, alcanzan 201,5 y 214,2 kPa para los impactados con una altura de caída de 1 m y de 150,5 y 170,2 kPa a 0,5 m, en superficie de madera y concreto, respectivamente. Puede afirmarse que para los dos estados de maduración estudiados a medida que la altura de caída disminuye, los esfuerzos en los nodos de la zona de impacto también disminuyen. Para el EM-III a una altura de caída de 0,5 y 1,0 m, respecto a la superficie de impacto, se provocan esfuerzos que están por encima del valor del esfuerzo correspondiente al límite elástico del tejido de los frutos. Esto significa que existe una probabilidad muy alta de que las células del tejido del fruto de guayaba hayan experimentado daño estructural irreversible y, consecuentemente, cambios en su metabolismo global. El tejido de los frutos que recibe un esfuerzo mecánico, ya sea por carga estática o dinámica, puede tener daño estructural permanente dependiendo de la intensidad del esfuerzo. El efecto inmediato es la oxidación de los compuestos fenólicos por la enzima catecol oxidasa, que demanda un incremento en el consumo de oxígeno (Kader, 2002; Knee, 2002; Knee y Miller, 2002; Berardinelli *et al.*, 2005). En frutos de guayaba en EM-I, (variedad Criolla) Martínez *et al.*(2017), reportaron valores de esfuerzo máximo de 351,2 kPa a una altura de caída de 1 m y de 256,1 kPa a 0,5 m.

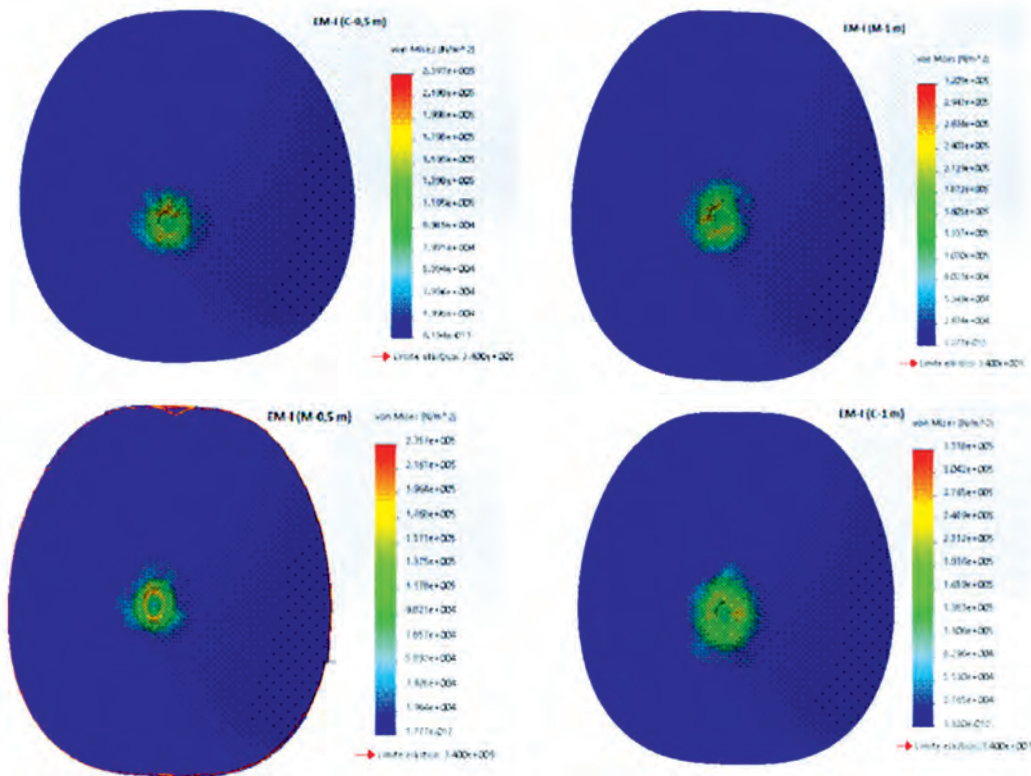


FIGURE 5. Impact effort in the nodes corresponding to the impact zone in the different fruit drop heights at MS-I, during the simulation. FIGURA 5. Esfuerzo de impacto en los nodos correspondientes a la zona de impacto en las diferentes alturas de caída del fruto en el EM-I, durante la simulación.

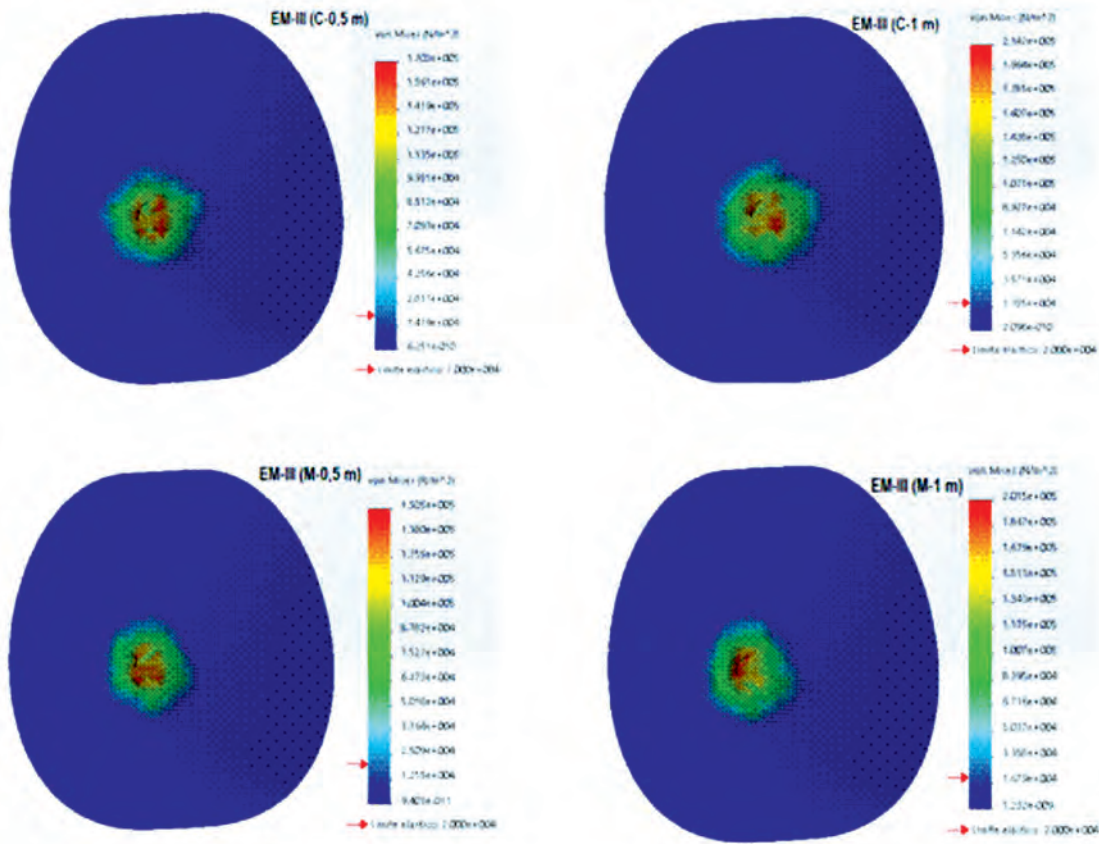


FIGURE 6. Impact effort in the nodes corresponding to the impact zone in the different fruit drop heights atMS-III, during the simulation.
 FIGURA 6. Esfuerzo de impacto en los nodos correspondientes a la zona de impacto en las diferentes alturas de caída del fruto en el EM-III, durante la simulación.

Once simulated the fall of guava fruits in the different heights, surfaces and ripening states analyzed, using the FEM, the dimensions of the area of the bruises obtained in the simulation of these were determined by Expression 2. Table 8 shows the major (D_d) and minor (S_d) diameters of the bruises, as well as the result of those areas.

Una vez simulada la caída de los frutos de guayaba en las diferentes alturas, superficies y estados de maduración analizados, empleando el MEF, se procede a determinar a través del mismo las dimensiones del área de las magulladuras obtenidas en la simulación de estos por la expresión 2. La Tabla 8 muestra los diámetros mayor (D_d) y menor (S_d) de las magulladuras, al igual que el resultado de dichas áreas.

TABLE 8. Diameters greater (r), minor (s) and area of the bruises obtained from the simulation of the fruits by FEM
 TABLA 8. Diámetros mayor (r), menor (s) y área de las magulladuras obtenidas de la simulación de los frutos por el MEF

| MaturationState | | I | | | |
|------------------------------|-----------------------|------|------------------------|------------------------|------------------------|
| Surfaces | | Wood | | Concrete | |
| Height (m) | 0.5 | | 1 | 0.5 | 1 |
| r (m) | 13.5×10^{-3} | | 18.6×10^{-3} | 14.7×10^{-3} | 27.6×10^{-3} |
| s (m) | 11×10^{-3} | | 13.7×10^{-3} | 12.4×10^{-3} | 24.9×10^{-3} |
| Bruisearea (m ²) | 4.7×10^{-4} | | 8.04×10^{-4} | 5.7×10^{-4} | 21.6×10^{-4} |
| MaturationState | | III | | | |
| Surfaces | | Wood | | Concrete | |
| Height (m) | 0.5 | | 1 | 0.5 | 1 |
| r (m) | 17.7×10^{-3} | | 26.14×10^{-3} | 25.61×10^{-3} | 31.82×10^{-3} |
| s (m) | 15.8×10^{-3} | | 25.77×10^{-3} | 23.86×10^{-3} | 27.51×10^{-3} |
| Bruisearea (m ²) | 12.9×10^{-4} | | 20.8×10^{-4} | 19.2×10^{-4} | 27.5×10^{-4} |

Accuracy in the Application of the Digital Model

In order to validate the model, it was necessary to determine the prediction errors in each variable analyzed. Table 9 shows the comparison of the values obtained experimentally with those derived from the evaluation of the digital model through FEM. It is observed that for the state of maturation I, a precision of the model between 85% and 98% was obtained, whereas for the state of maturity III the precision diminished, it oscillated between 72% and 81%. This behavior indicates that the stress-strain relationship of the mature fruit was further away from the elastic behavior, which is what is accepted in the constitutive model of the material. Despite this result, it can be concluded that, although the process of deformation of the fruit during the impact involves plastic changes and therefore permanent, an elastic model can be considered valid to analyze the behavior of the guava in order to prevent mechanical damage of this type.

Precisión en la aplicación del modelo digital

Para realizar la validación del modelo es preciso determinar los errores de predicción del mismo, en cada una de las variables analizadas. En la Tabla 9 se comparan los valores obtenidos experimentalmente con los derivados de la evaluación del modelo digital mediante el MEF. En la misma se puede observar que para el estado de maduración I, se obtiene una precisión del modelo entre el 85 % y el 98 %, mientras que para el estado de madurez III la precisión disminuye, oscilando entre el 72% y 81 %. Este comportamiento indica que la relación esfuerzo-deformación del fruto en estado maduro es más alejada del comportamiento elástico, que es lo que se asume en el modelo constitutivo del material. No obstante este resultado, se puede concluir que, a pesar de que el proceso de deformación del fruto durante el impacto implique cambios plásticos y por lo tanto permanentes, un modelo elástico puede considerarse válido para analizar el comportamiento de la guayaba con el objetivo de prevenir daños mecánicos de este tipo.

TABLE 9. Estimation of the percentage of model errors for deformation
TABLA 9. Estimación del porcentaje de errores del modelo para la deformación

| MS-I | Prediction error (%) | Accuracy of the model (%) |
|---------|----------------------|---------------------------|
| W-0,5 m | 1,73 | 98,27 |
| W-1 m | 3,00 | 97,00 |
| C-0,5 m | 1,98 | 98,02 |
| C-1 m | 14,27 | 85,73 |
| MS -III | Prediction error (%) | Accuracy of the model (%) |
| W-0,5 m | 24,39 | 75,61 |
| W-1 m | 25,51 | 74,49 |
| C-0,5 m | 18,68 | 81,32 |
| C-1 m | 27,70 | 72,30 |

CONCLUSIONS

- The greatest and deepest areas of the bruises were observed in the fruits of the MS-III that were impacted at a height of 1 m in wood and concrete with values of $28.04 \times 10^{-4} \text{ m}^2$ and $38.04 \times 10^{-4} \text{ m}^2$ and $28,7 \times 10^{-3} \text{ m}$ and $30,4 \times 10^{-3} \text{ m}$, respectively.
- The simulation tests with the FEM showed that, for fruits in MS-III at a fall height of 0.5 and 1 m on the two surfaces studied, the effort reached by the tissue in the impact area was above the value of the elastic limit of the fruit tissue (40 kPa). This suggests that in the post-harvest handling operations the tissue of the impact area begins to experience irreversible damage from these impact heights.
- The potential of the FEM was validated for the simulation of damages in impacted guava on concrete and on wood with a precision of 85 to 98% for fruits in green-ripened state and 72 to 81% for ripe fruits.
- For mature fruits, the prediction error was higher than for the green-ripe ripening state, because the behavior of the mature fruit deformation was further away from the elastic behavior, which is what is accepted as a constitutive model of the fruit.

CONCLUSIONES

- Las mayores áreas y profundidad de las magulladuras se observaron en los frutos del EM-III que fueron impactados a una altura de 1 m en madera y concreto con valores de $28,04 \times 10^{-4} \text{ m}^2$ y $38,04 \times 10^{-4} \text{ m}^2$ y $28,7 \times 10^{-3} \text{ m}$ y $30,4 \times 10^{-3} \text{ m}$ respectivamente.
- Las pruebas de simulación con el MEF mostraron que, para los frutos en EM-III a una altura de caída de 0,5 y 1 m en las dos superficies estudiadas, el esfuerzo que alcanza el tejido en el área de impacto resultó por encima del valor del límite elástico del tejido del fruto (40 kPa). Esto sugiere que en las operaciones de manejo poscosecha el tejido del área de impacto comienza a experimentar daño irreversible a partir de estas alturas de impacto.
- Se validó la potencialidad del MEF para la simulación de daños en guayaba impactada sobre concreto y sobre madera con una precisión de 85 a 98 % para las frutas en estado de maduración verde-hecho y de 72 a 81 % para las frutas maduras.
- Para los frutos maduros, el error de predicción resultó superior al del estado de maduración verde-hecho, debido a que el comportamiento de la deformación del fruto maduro es más alejado del comportamiento elástico, que es lo que se asume como modelo constitutivo del fruto.

REFERENCES / REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ARVELO, M.A.; GONZÁLEZ, L.D.; MAROTO, S.; AMIZUKA, T.; MONTOYA, R.P.: *Estado actual sobre la producción, el comercio y cultivo del cacao en América*, no. 9292487191, Inst. IICA, Fundación Colegio de Postgraduados en Ciencias, San José, Costa Rica, 2017.

- BAETTIG, M.R.: “Determinación del módulo de elasticidad de la madera mediante vibraciones transversales”, *Maderas. Ciencia y tecnología*, 3(1-2): 44-51, 2001, ISSN: 0718-221X.
- BERARDINELLI, A.; DONATI, V.; GIUNCHI, A.; GUARNIERI, A.; RAGNI, L.: “Damage to pears caused by simulated transport”, *Journal of Food Engineering*, 66(2): 219-226, 2005, ISSN: 0260-8774.
- CHÁVEZ, S.; BEILHARZ, T.; RONDÓN, G.A.; ERDJUMENT, B.H.; TEMPST, P.; SVEJSTRUP, Q.J.; LITHGOW, T.; AGUILERA, A.: “A protein complex containing Tho2, Hpr1, Mft1 and a novel protein, Thp2, connects transcription elongation with mitotic recombination in *Saccharomyces cerevisiae*”, *The EMBO journal*, 19(21): 5824-5834, 2000, ISSN: 0261-4189.
- CIRO, V.H.J.; OSÓRIO, S.J.: “Avance experimental de la ingeniería de postcosecha de frutas colombianas: resistencia mecánica para frutos de uchuva (*Physalis peruviana* l)”, *Dyna*, 75(154), 2008, ISSN: 0012-7353.
- GARCÍA, P.A.; HERNÁNDEZ, G.A.; GARCÍA, T.Y.; YIRAT, B.M.: “Establecimiento del período óptimo de almacenamiento para guayaba, mandarina y tomate guardados a temperatura ambiente”, *Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias*, 17(3), 2008, ISSN: 1010-2760.
- GEJIMA, Y.; ZHANG, H.; NAGATA, M.: “Judgment on level of maturity for tomato quality using L* a* b* color image processing”, En: *Proceedings 2003 IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics (AIM 2003)*, Ed. IEEE, vol. 2, pp. 1355-1359, 2003, ISBN: 0-7803-7759-1.
- JHA, S.N.; BARREIRO, E.P.; NARSAIAH, K.; GUPTA, M.; BHARDWAJ, R.; ASHISH K S: “Non-destructive prediction of sweetness of intact mango using near infrared spectroscopy”, *Scientia Horticulturae*, 138: 171-175, 2012, ISSN: 0304-4238.
- KADER, A.A.: *Postharvest Technology of Horticultural Crops*, Inst. University of California, Oakland, USA, 535 p., 2002.
- KNEE, M.: *Fruit quality and its biological basis*, Ed. Crc Press, vol. 9, 2002, ISBN: 0-8493-9781-2.
- KNEE, M.; MILLER, A.R.: “Mechanical injury”, *Fruit quality and its biological basis*,: 157-179, 2002.
- LEWIS, R.; YOXALL, A.; CANTY, L.; ROMO, E.R.: “Development of engineering design tools to help reduce apple bruising”, *Journal of Food Engineering*, 83(3): 356-365, 2007, ISSN: 0260-8774.
- LEWIS, R.; YOXALL, A.; MARSHALL, M.B.; CANTY, L.A.: “Characterising pressure and bruising in apple fruit”, *Wear*, 264(1-2): 37-46, 2008, ISSN: 0043-1648.
- MARTÍNEZ, C.M.: “Fundamentos del manejo y tratamiento postcosecha de productos agrícolas, 257pp”, *Universidad Central de las Villas, Santa Clara, Cuba*, 2003.
- MARTÍNEZ, H.; PÉREZ, A.; VENEGAS, M.; VALLE, S.: *Propiedades físico-mecánicas y simulación por computadora del daño por impacto en guayaba (*Psidium guajava* L.)*, Inst. Universidad Autónoma de Chapingo, Chapingo, Texcoco, México, 2017.
- MENESATTI, P.; PAGLIA, G.: “PH—Postharvest Technology: Development of a Drop Damage Index of Fruit Resistance to Damage”, *Journal of agricultural engineering research*, 80(1): 53-64, 2001, ISSN: 0021-8634.
- MERCADO, F.J.; LÓPEZ, O.M.; MARTÍNEZ, S.; ALCÁNTARA, G.L.; GARNICA, R.B.: “Aplicación del modelo de contacto de Hertz para la determinación del módulo de elasticidad y del módulo de Poisson en frutos cítricos: lima, limón, naranja y tangerina”, En: *VII Congreso Nacional de Ciencia de los Alimentos. Guanajuato, Mexico*, pp. 367-373, 2005.
- MERCADO, S.F.J.; BENITO, B.P.; DE LOS ANGELES GARCÍA-VELASCO, M.: “Fruit development, harvest index and ripening changes of guavas produced in central Mexico”, *Postharvest Biology and Technology*, 13(2): 143-150, 1998, ISSN: 0925-5214.
- O’BRIEN, M.; GAFFNEY, J.J.: “Principles and Practices for Harvesting and Handling Fruits and Nuts”, In: *Postharvest Handling and Transport Operations*, Ed. AVI/Van Nostrand, O’Brien, M., B. F. Cargill, R. B. Fridley (Ed.s), New York, USA, pp. 413-470, 1983.
- OFICINA NACIONAL DE ESTADÍSTICAS E INFORMACIÓN (ONEI): *Anuario Estadístico de Cuba 2016. Agricultura, ganadería, silvicultura y pesca*, Inst. Oficina Nacional de Estadísticas e Información (ONEI), La Habana, Cuba, 32-32 p., 2017.
- SADRNIA, H.; RAJABIPOUR, A.; JAFARI, A.; JAVADI, A.; MOSTOFI, Y.; KAFASHAN, J.; DINTWA, E.; DE BAERDEMAEKER, J.: “Internal bruising prediction in watermelon compression using nonlinear models”, *Journal of food engineering*, 86(2): 272-280, 2008, ISSN: 0260-8774.
- SANTONICO, M.; BELLINCONTRO, A.; DE SANTIS, D.; NATALE, D.C.; MENCARELLI, F.: “Electronic nose to study postharvest dehydration of wine grapes”, *Food chemistry*, 121(3): 789-796, 2010, ISSN: 0308-8146.
- SHIRMOHAMMADI, M.; YARLAGADDA, P.K.; KOSSE, V.; YUAN, T.G.: “Study of mechanical deformations on tough skinned vegetables during mechanical peeling process”, *GSTF Journal of Engineering Technology (JET)*, 1(1): 31-37, 2012, ISSN: 2251-3701.
- VALENTE, M.; FERRANDIS, Y.J.: “Evaluation of textural properties of mango tissue by a near-field acoustic method”, *Postharvest Biology and Technology*, 29(2): 219-228, 2003, ISSN: 0925-5214.
- WILLS, R.; GOLDING, J.: *An introduction to the physiology and handling of fruits and vegetables*, Ed. CABI, Sydney, Australia, 304 p., 2016.
- YIRAT, B.M.; GARCÍA, P.A.; HERNÁNDEZ, G.A.; CALDERÍN, G.A.; CAMACHO, N.A.: “Evaluación de la calidad de la guayaba, variedad enana roja EEA-1-23, durante el almacenamiento a temperatura ambiente”, *Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias*, 18(2): 70-73, 2009, ISSN: 1010-2760, E-ISSN: 2071-0054.
- YIRAT, M.: *Estudio de las propiedades de calidad de la guayaba (*Psidiumguajava* L.), (variedad Enana roja EEA 1-23)*, Inst. Univerdidad Agraria de La Habana, San José de las Lajas, Habana, Cuba, 2009.

Leidy Laura Monzón Monrabal, Profesora Asistente, Applicant to doctorate, Universidad Agraria de La Habana, Facultad de Ciencias Técnicas, San José de las Lajas, Mayabeque, Cuba, e-mail: leidym@unah.edu.cu

Annia García Pereira, Profesora Titular, Universidad Agraria de La Habana, Facultad de Ciencias Técnicas, San José de las Lajas, Mayabeque, Cuba, e-mail: annia@unah.edu.cu

Arianna Plata Cabrera, profesora, Universidad Agraria de La Habana, Facultad de Ciencias Técnicas, San José de las Lajas, Mayabeque, Cuba, e-mail: leidym@unah.edu.cu

Arturo Martínez Rodríguez, Profesor e Investigador Titular, Universidad Agraria de La Habana, Facultad de Ciencias Técnicas, San José de las Lajas, Mayabeque, Cuba, e-mail: arturo@unah.edu.cu

Lazara Rangel Montes de Oca, Profesora Asistente, Universidad Agraria de La Habana, Facultad de Ciencias Técnicas, San José de las Lajas, Mayabeque, Cuba, e-mail: lazarar@unah.edu.cu

Antihus A Hernández Gómez, Profesor Titular, Universidad Agraria de La Habana, Facultad de Ciencias Técnicas, San José de las Lajas, Mayabeque, Cuba, e-mail: antihus@unah.edu.cu

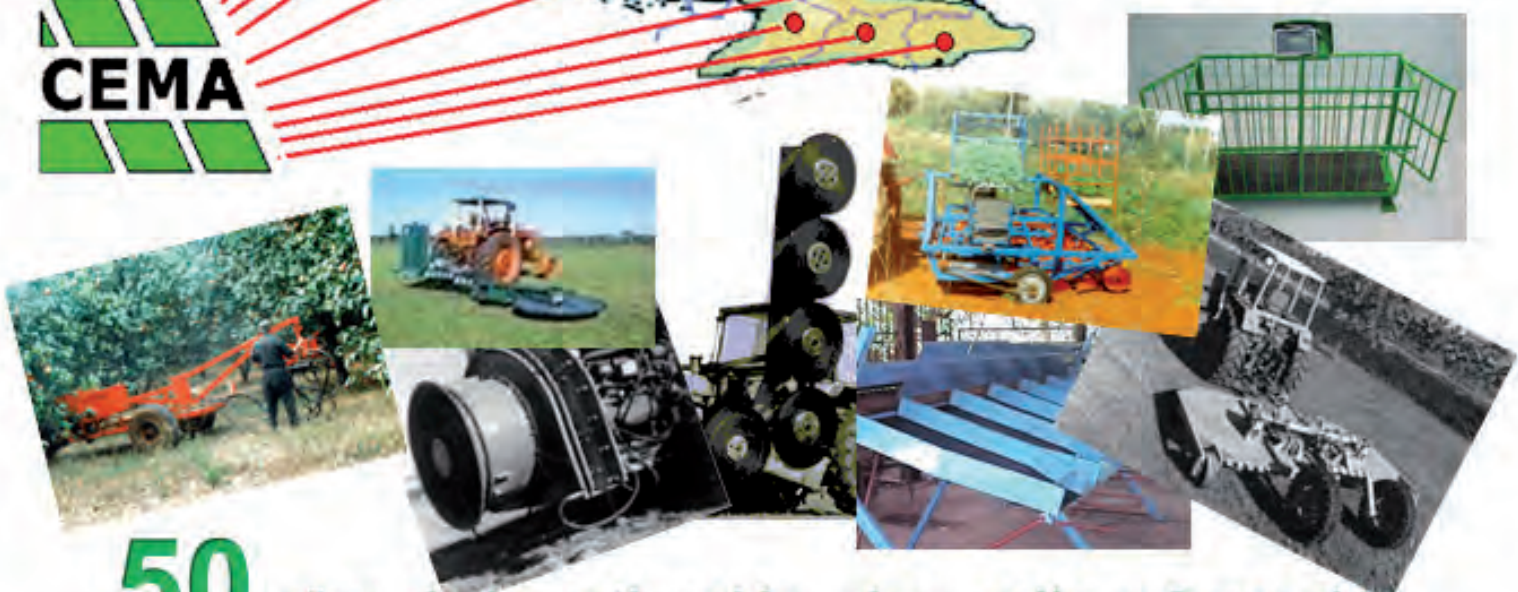
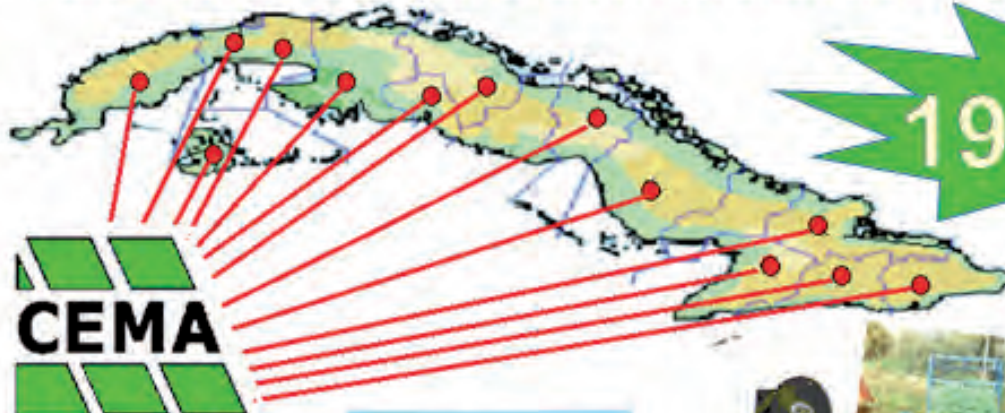
The authors of this work declare no conflict of interests.

This item is under license Reconocimiento-NoComercial de Creative Commons 4.0 Internacional (CC BY-NC 4.0).

The mention of trademarks of specific equipment, instruments or materials is for identification purposes, there being no promotional commitment in relation to them, neither by the authors nor by the publisher.

Centro de Mecanización Agropecuaria

1969-2019



50 años de investigación, desarrollo y formación de especialistas de alto nivel en el campo de la Mecanización Agropecuaria.