

Técnicas matemáticas para inferir cambios poscosecha en las propiedades de productos agrícolas

Mathematical Techniques to Infer Post-Harvest Changes in the Properties of Agricultural Products



<http://opn.to/a/qjuzF>

Lazara Rangel-Montes de Oca^{1*}, Leidy L Monzón-Monraba¹, Jorge Garcia-Coronado¹, Annia García-Pereira¹

¹Universidad Agraria de la Habana, Facultad de Ciencias Técnicas, San José de las Lajas, Mayabeque, Cuba.

RESUMEN: A partir de emplear métodos estadísticos-matemáticos se infieren cambios en las propiedades de productos agrícolas, en este caso piña (*Annanas Comosus*) y Guayaba almacenada a temperatura ambiente, según las normas CODEX y FAO. El empleo de la modelación estadístico-matemático empleada para la piña permitió establecer el periodo de almacenamiento máximo de este fruto, definir fechas de comercialización como fruto fresco y determinar la velocidad con que se suceden cambios en sus propiedades. Además mediante el método de elementos finitos (MEF) fue simulada la respuesta mecánica de la guayaba (variedad Enana Roja EEA 1-23) ante cargas estáticas, obteniéndose un modelo capaz de predecir el comportamiento del fruto con una aproximación del 90%, posibilitando efectuar ensayos virtuales de guayabas bajo condiciones de carga en las cuales los ensayos físicos son de difícil aplicación.

Palabras Clave: método de elementos finitos, modelación estadístico-matemática, temperatura ambiente, período de almacenamiento.

ABSTRACT: Using statistical-mathematical methods, changes in the properties of agricultural products are inferred, in this case pineapple (*Annanas Comosus*) and Guava stored at room temperature, according to the CODEX and FAO standards. The use of statistical-mathematical modeling utilized for pineapple allowed establishing the maximum storage period of this fruit, defining dates of commercialization as fresh fruit and determining the speed with which changes in their properties occur. The mechanical response of guava (Red Dwarf variety EEA 1-23) to static charges using the Finite Element Method (MEF) was also simulated, obtaining a model capable of predicting the behavior of the fruit with an approximation of 90%. That made possible to perform virtual tests of guavas under load conditions in which physical tests are difficult to apply.

Keywords: properties of agricultural products, finite element method, post-harvest, statistical-mathematical modeling.

*Autor para correspondencia: Lazara Rangel-Montes de Oca. e-mail: lazarar@unah.edu.cu

Recibido: 23/09/2017

Aceptado: 11/09/2018

INTRODUCCIÓN

Llevar a cabo la conservación adecuada en la etapa poscosecha de los productos se encuentra entre los principales pasos encaminados a lograr soberanía alimentaria y a mejorar la eficiencia en el uso de las producciones agropecuarias, lo cual solo es posible si se tiene un producto de calidad con un elevado grado de aceptación ([Hernández et al., 2005](#); [García y Hernández, 2007](#); [Mogollón et al., 2011](#); [Fernández et al., 2012](#); [Ramos Hernández et al., 2013](#); [Jiménez, 2015](#); [López, 2017](#)). La calidad de los productos agrícolas no es más que una serie de atributos relacionados fundamentalmente con su sanidad general y con su vida comercial. El conocimiento de las principales propiedades físico- mecánicas y organolépticas empleando métodos tradicionales y más recientemente los no destructivos, juega un papel indispensable para una buena presentación y conservación de los mismos, permitiendo definir el manejo más adecuado durante los periodos de pre-cosecha, cosecha y poscosecha ([Schofield y Wroth, 1968](#); [Yirat Becerra et al., 2009](#); [Mogollón et al., 2011](#); [Jiménez, 2015](#); [López, 2017](#)). Los no destructivos tienen la posibilidad de ser utilizados para la automatización de los procesos de selección en línea y en el desarrollo de la investigación científica a partir de que es posible homogeneizar el criterio de selección de muestras para estudios donde intervienen varias cualidades del fruto y que históricamente se realizaban auxiliándose del criterio de expertos. ([FAO, 2018](#)).

En los últimos años, como consecuencia del desarrollo de la electrónica y la informática, se ha avanzado considerablemente en el uso de técnicas matemáticas (Regresión Lineal Múltiple, Regresión de los Componentes Principales, Mínimos Cuadrados Parciales entre otros) estas aplicaciones con fines docentes e investigativos, lo que queda demostrado en la propuesta en la que se retoma los estudios de calidad aplicados a frutos a partir de nuevas formas y métodos devenidos del desarrollo tecnológico, como son los relacionados con la modelación y simulación de frutos o procesos que se suceden esencialmente durante la etapa de la poscosecha, lo que propicia realizar mediciones menos engorrosas y más precisas,

posibilitando además el monitoreo no destructivo de este importante atributo para frutas en estado fresco, durante su almacenamiento a temperatura ambiente ([Park et al., 2001](#); [García y Hernández, 2007](#)).

Por otro lado el MEF ha sido ampliamente utilizado ([Silvestre, 1998](#); [Nourain et al., 2005](#); [Lu et al., 2006](#); [Kabas et al., 2008](#)) para caracterizar la respuesta de productos agrícolas sometidos a cargas estáticas, durante el almacenamiento y transportación de los mismos por periodos de tiempo relativamente largos, demostrando su eficacia en verificaciones no destructivas a los frutos.

En las últimas tres décadas el método ha sido aplicado en Cuba con éxito en el campo de la ingeniería agrícola, fundamentalmente en la modelación de la interacción suelo - implemento agrícola ([Herrera et al., 2008](#); [Martínez et al., 2011](#); [López, 2017](#)). Por todo lo antes expuesto es que la investigación tiene como objetivo *Emplear técnicas matemáticas y de simulación para describir el comportamiento de las propiedades en piña y predecir el esfuerzo máximo que resiste el fruto de la guayaba en dos estados de maduración bajo cargas estáticas.*

MATERIALES Y MÉTODOS

Mediante la Norma Mexicana ([Norma Técnica Mexicana NMX-FF-041-SCFI-2007, 2007](#)), se llevó a cabo la selección de los frutos de la guayaba (enana roja) y la piña (cayena lisa). Se muestreo un total de 110 frutas (40 guayabas y 70 piñas). En el caso de la piña, se retiraron 10 frutos diariamente, durante los días experimentales y para el caso de la guayaba se dividen en dos grupos por estados de maduración (escogiéndose solo dos estados debido a que la fruta suele recogerse para su exportación en el estado uno (verde) y suele ser más susceptible a daños en el estado III (maduro), de ahí que sean los de mayor interés, conformados por 20 frutos cada uno. De los 20 frutos por cada uno de los estados se dividen en 10 para determinar masa, densidad, firmeza a la compresión al 3% del diámetro polar (Φ), y 10 para la determinación del límite de elasticidad, módulo de Young y coeficiente de Poisson.

La **talla** se obtiene mediante el diámetro polar y ecuatorial con la utilización de un calibrador

pie de rey de 0 a 150 mm ± 0.05 mm. La *masa* se determina con una balanza electrónica modelo LG-1001a/ 0,1 (g), realizando tres repeticiones por fruto y determinándose las pérdidas de peso mediante la [ecuación. 1](#). El *IC* se determinó por el método de captación de imágenes, fotografiando las frutas con una cámara digital modelo CANON PowerShot A630 8.5 megapíxeles, luego exportadas al software portable ADOBE PHOTOSHOP v.10, obteniendo la representación numérica de las variables L* a* y b*, el cual establece coordenadas en un plano de colores que establece por sus coordenadas la escala de maduración ([García, et al., 2010](#)).

$$W_p = W_0 - W_{dm} \quad (1)$$

donde:

W₀ - peso de la fruta en el día cero, g;

W_{dm} - peso de la fruta en el día de interés, g.

Se evalúa los contenidos de sólidos solubles (SSC, por sus siglas en inglés) y la densidad se determina a través del principio de Arquímedes.

Resistencia a la penetración (firmeza): se obtuvo a partir de la prueba del pinchazo para el caso de la piña y a la compresión al 3% del diámetro polar en el caso de la guayaba, con el durómetro digital, Modelo CEMA-C08, 0 a 1000 (kgf/cm²)/0,01 (kgf/cm²), de fabricación nacional, según principio Magness-Taylor en tres puntos equidistantes, separados a 120° aproximadamente unos de otros (para los frutos enteros), según ([Hernández et al., 2005a](#)). Esta prueba se realizó sin quitarle la piel a las frutas.

Para el caso de la guayaba se evaluó dos estados de maduración al primer y tercer día de cosechada, determinándose la firmeza a la compresión (N), al 3% del diámetro polar (10 frutos por estado de maduración), el área de contacto, (mm) y deformaciones del diámetro polar y ecuatorial, (mm) para obtener el módulo de elasticidad, coeficiente de Poisson y el límite elástico, teniendo en cuenta investigaciones precedentes ([González et al., 2016](#)).

Límite de elasticidad: Se determina utilizando la metodología propuesta por [Silling \(2000\)](#), utilizando un medidor de fuerza (durómetro modelo CEMA - C08 con un puntal plano), pie de rey y una videocámara. Los esfuerzos medios de los frutos se determinan, a través del programa MATH CAD PRO 2000 ([Essential Mathcad for](#)

[Engineering, Science, and Math \(2000\)](#), que se apoya en la [ecuación. 2](#)

$$\sigma = F/A, \text{ Mpa} \quad (2)$$

donde:

σ - Esfuerzo aplicado

F - Fuerza aplicada

A - Área

Módulo de Young o Coeficiente de Elasticidad aparente: Se determina de acuerdo a [ecuación. 3](#). El área de contacto se determina marcando el plato del durómetro con polvo de tiza para que el área que toca a la fruta quedara marcada en esta y posteriormente se obtiene utilizando un pie de rey.

$$E = \frac{F \times L_1}{A \times L_2}, \text{ MPa} \quad (3)$$

donde:

E - Módulo de elasticidad

F - Firmeza máxima a la compresión antes de romper el fruto

L₁ - Diámetro longitudinal

A - Área de contacto

L₂ - Deformación del diámetro longitudinal

Coeficiente de Poisson aparente (μ): se cuantifican a partir de la [ecuación. 4](#), auxiliándonos de un pie de rey ([Turner et al., 1956](#); [Schofield y Wroth, 1968](#)) ([Ciro y Osorio, 2005](#)).

$$\mu = (\Delta D / D_0) / (\Delta L / L_0) \quad (4)$$

donde:

ΔD - deformación transversal

D₀ - Longitud transversal inicial, mm

ΔL - deformación longitudinal

L₀ - dimensión longitudinal inicial, mm

La simulación de cargas estáticas en un cuerpo homogéneo: se realizó con la ayuda del programa [SolidWorks \(2013\)](#). Para la construcción del boceto inicial (fruta de guayaba), estableciendo unas medidas promedio (longitud y diámetro ecuatorial), ([Figura 1](#)) con el fin de establecer la geometría apropiada del material. Una vez creado el sólido, se procede a alimentar el programa con las propiedades físicas y mecánicas que caracterizan la fruta; densidad, módulo de Young, límite de elasticidad y Coeficiente de Poisson. Posteriormente se realiza el análisis mediante el Método de Elemento Finito empleando dos modelos, uno para cada estado de maduración en cuanto a las deformaciones determinadas con el

área del fruto placa-metálica y otro con el del área integrada, con el objetivo de comparar las deformaciones longitudinales simuladas y experimentales.

Para evaluar el error del modelo (E_M) se emplea la [ecuación. \(5\)](#)

$$E_M = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_i^{pred} - \bar{x}_i^{med}) \quad (5)$$

donde:

x_i^{pred} y x_i^{med} - valores de las variables predichos y medidos, respectivamente.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Propiedades de la Piña: La [Tabla 1](#) muestra los valores promedios obtenidos en cada una de las principales propiedad de la calidad evaluadas en el caso de la piña, señalar que en esta variedad (Cayena Lisa) la masa alcanzo como valor máximo de 927 g y un pH de 4.56.

Resultados del procesamiento de la información referida a la calidad de la piña

Al final del periodo evaluado ([Figura 2](#)) las pérdidas de peso (PP) son muy significativas, siendo las correspondientes al inicio y al segundo día de mediciones diferentes al del octavo y

décimo día (nivel de confianza del 99%). Como se puede apreciar las pérdidas de peso de días intermedios a estos no difieren significativamente de uno u otro grupo de medias. En el caso de la firmeza se manifiesta una tendencia decreciente con los días de almacenamiento. Ello obedece a varios cambios que acompañan de modo natural a la madurez en la mayoría de las frutas, entre ellos se destaca los cambios en textura y reducción de la firmeza. Con la senescencia los fenómenos como la degradación de las paredes, activación enzimática, el aumento de la permeabilidad de membranas, entre otros provocan una disminuyen de la firmeza de las paredes del fruto. El procedimiento de análisis de componentes principales seguido extrae o propone cinco componentes, de las cuales se eligieron las dos primeras de ellas. La elección tiene en cuenta aquellos auto-valores mayores o iguales a 1,0 o lo que es igual las componentes que logran explicar más del 10% de la varianza. Estas primera y segunda CP explican el 88% de la variabilidad en los datos originales, las cuales en su conjunto caracterizan indirectamente los estándares de calidad de la piña durante su almacenamiento postcosecha a temperatura ambiente. Este

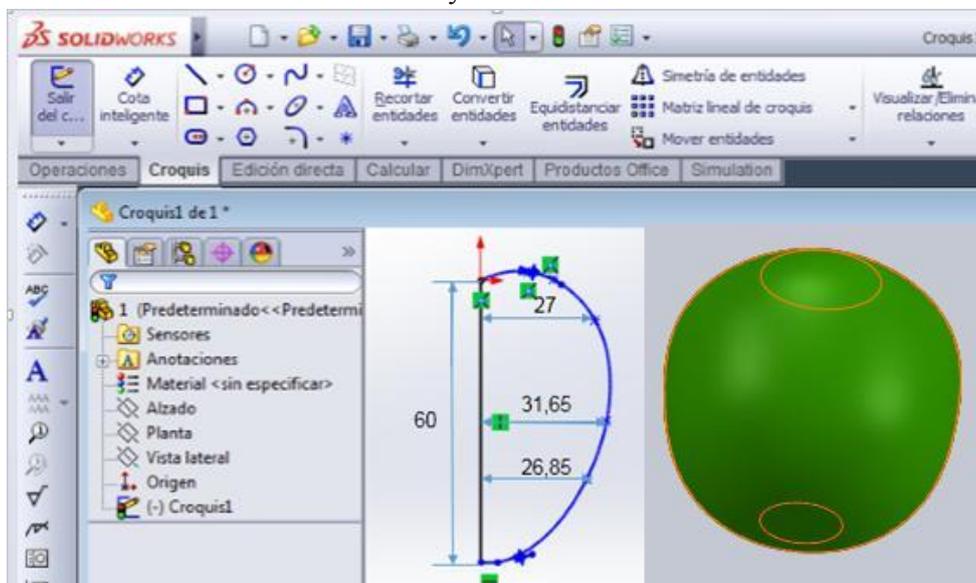


FIGURA 1. Modelo realizado con herramientas de Diseño Asistido por Computadoras ([SolidWorks, 2013](#)).

TABLA 1. Valores promedios obtenidos en las principales propiedades de calidad de la piña

Propiedades de la Piña						
Masa, g	Talla, mm	Firmeza, kgf/cm ²	IC*	SSC, 0Brix	pH	PP, g
927	160	4.36	-0,28	14.01	4.56	14,94

resultado viene a reafirmar que no solo la muy conocida firmeza, sino que las pérdidas de peso, el pH, el IC y los SSC son indicadores adecuados para calificar la calidad de la fruta y también confirma su uso con estos fines como tendencia en la literatura.

La [Figura 3](#) muestra la conglomeración o agrupamiento de variables practicado a las pérdidas de peso, la firmeza, el IC, pH y SSC con tres agrupamientos resultantes bien definidos, los cuales se enmarcan en días específicos de almacenamiento de la fruta después de su cosecha.

La calidad de la piña representada por estos agrupamientos de principales propiedades constituye una valiosa herramienta estadística que nos exonera de llevar a cabo un control exhaustivo de las mismas sobre todo para la comercialización, transporte o almacenaje.

La [Figura 4](#) muestra los modelos ajustados a las distintas variaciones temporales de cada

propiedad estudiada en el fruto de la piña, graficando tanto sus valores medidos durante los diez días de almacenados como lo predichos por intervalos de tiempo de medio día. Todas las tendencias descritas por los modelos con posterioridad a los diez días de almacenado se consideran adecuadas y están en consecuencias a los cambios fisiológicos irreversibles que se suceden en la fruta, como se puede apreciar con el ascenso del pH que está sujeto a la continuidad de la maduración del fruto.

La [Tabla 2](#) muestra las dependencias funcionales ajustadas y los estadísticos que evalúan el ajuste del modelo, alcanzándose valores de estadígrafos como el estadístico R² que indica que el modelo ajustado es capaz de explicar hasta un 99% de la variabilidad temporal de las pérdidas de peso. Este modelo presenta un error estándar de la estimación es de 0,23, por lo que se considera favorable para describir

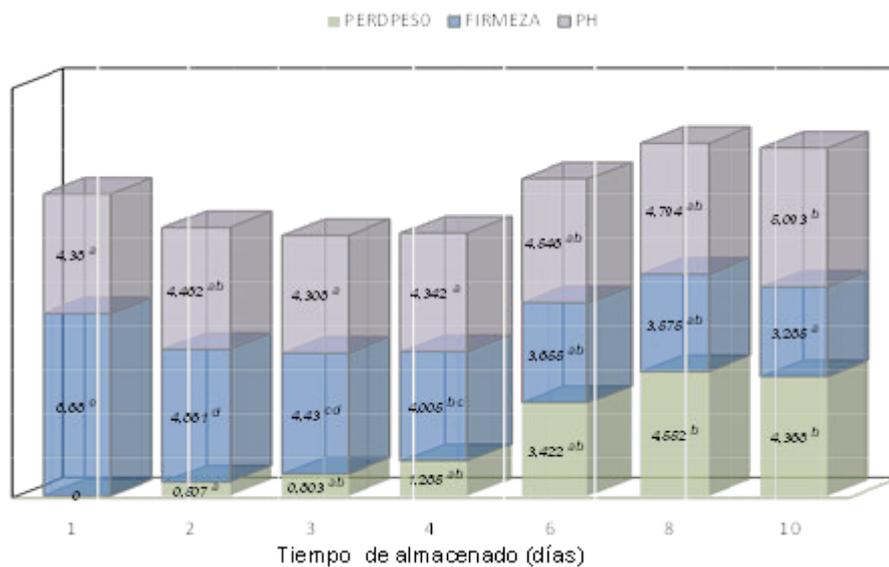


FIGURA 2. Prueba de comparaciones múltiples aplicadas a las propiedades para discernir los grupos de medias que difieren significativamente durante el tiempo de almacenamiento. Letras diferentes indican diferencias significativas intergrupos para un $p < 0,01$.

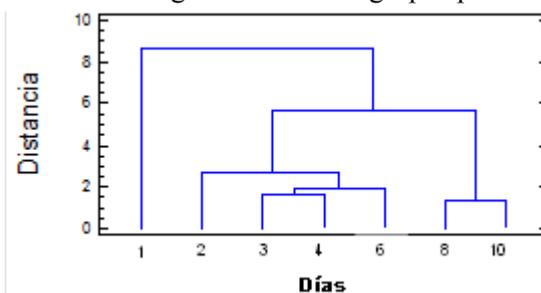


FIGURA 3. Dendrograma de clústers de las pérdidas de peso, la firmeza, el IC, pH y SSC generados considerando el método del vecino más cercano y la distancia Euclídeana al cuadrado.

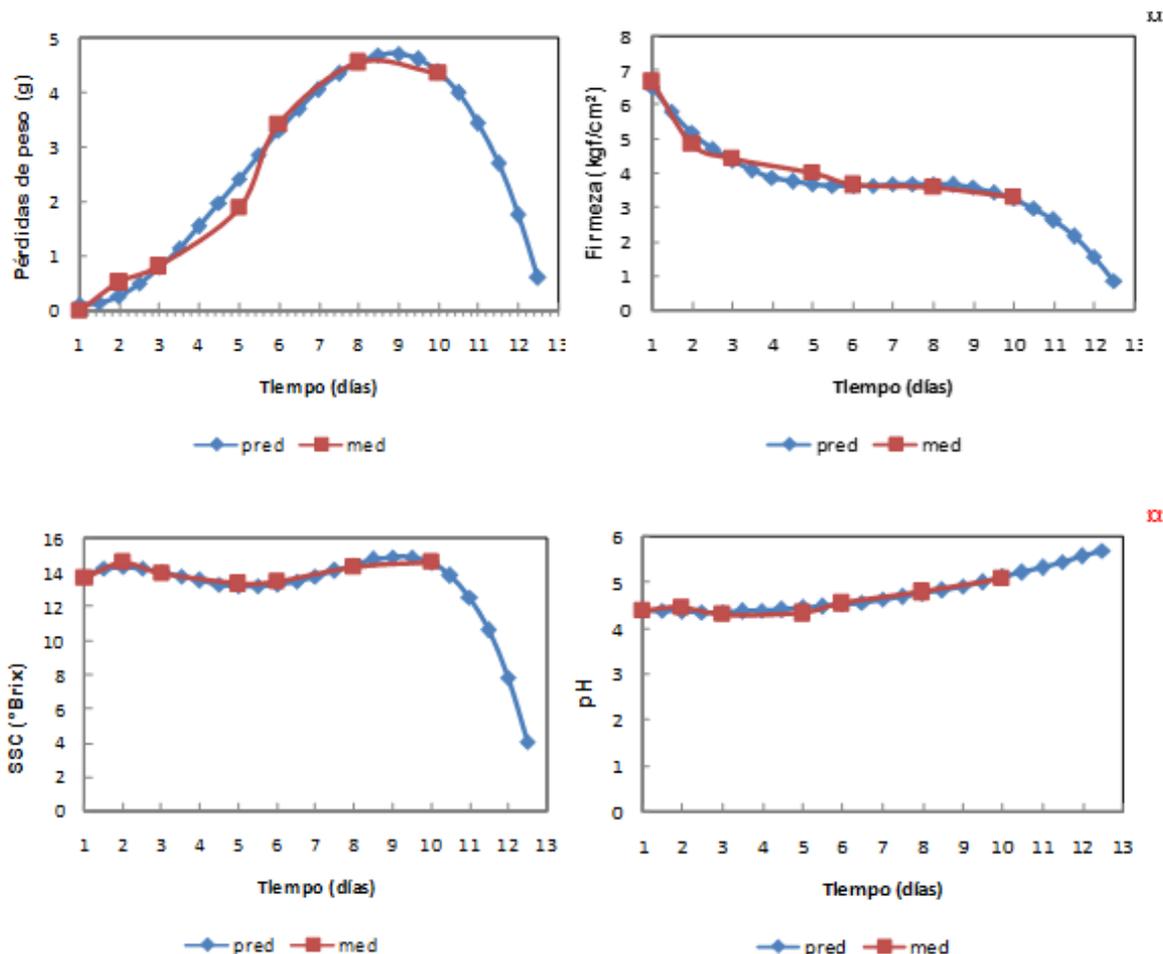


FIGURA 4. Tendencia temporal de valores medidos y predichos con modelo ajustado por propiedades.

TABLA 2. Modelos ajustados a los valores de cada propiedad y los estadísticos de su evaluación

Propiedad	Model	R ²	MAE	ES de estimación
PP	$Y = 0,12 - 0,07 * t + 0,24 * t^2 - 0,02 * t^3$	0,99	0,11	0,23
Firmeza	$Y = 6,52 - 1,58 * t + 0,28 * t^2 - 0,02 * t^3$	0,98	0,13	0,24
SSC	$Y = 13,79 + 1,25 * t - 0,83 * t^2 + 0,16 * t^3 - 0,01 * t^4$	0,89	0,14	0,30
pH	$Y = 4,40 - 0,04 * t + 0,02 * t^2$	0,97	0,04	0,06

certestamente el proceso de almacenamiento de la piña a temperatura ambiente.

Por otra parte, no se observan tendencia al representar los residuos, lo cual se traduce en que las variables tomadas en cuenta están bien representadas en el modelo, tal y como lo enfocan Donatelli *et al.* (2004; Børgesen y Schaap (2005), en el desarrollo de funciones de pedotransferencia para estimar la curva de retención de humedad de suelo.

La velocidad con que suceden los cambios en cada propiedad medidas durante el almacenamiento de la piña se puede apreciar en la Figura 5, donde la gráfica evidencia la dinámica general de los procesos que se suceden

durante el almacenamiento del fruto a temperatura ambiente, particularizadas a través del conjunto de propiedades evaluadas, las cuales se relacionan estrechamente con la maduración y calidad de la piña (Var. Cayena Lisa). Como se aprecia la máxima velocidad de las pérdidas de peso se alcanza entre el cuarto y quinto día de cosechado y almacenado a temperatura ambiente (0,7 g/día) y a partir sexto y hasta el día siete se suceden las máximas para la firmeza (0,04 kgf/cm² día). Mientras que la velocidad o razón de cambio promedio durante todo el periodo de almacenamiento de estas son de 0,17 g/día y -0,04 kgf/cm²día, respectivamente. Además de ello, las mayores degradaciones de la piña en

términos de calidad tienen lugar entre el cuarto y séptimo día. El comportamiento de estas propiedades (SSC y pH) son muy contrastantes a las anteriores (0,08° Brix y 0,08, respectivamente). No obstante, estos extremos del proceso, se trata de un fenómeno paulatino y acumulativo, por lo cual no ha de obviarse ni restar importancia al resultado global.

Similares análisis a los de la piña se realizan para las propiedades físico-mecánicas de la **Guayaba** por estados de maduración (Tabla 3). Los diámetros promedios que conforman la talla de las frutas durante el análisis y su clasificación de acuerdo al tamaño, según la norma consultada (Norma Técnica Colombiana NTC 1263, 2007), así como los valores medios de la masa y la densidad.

Los cambios de la firmeza de la guayaba, expresada como fuerza de compresión (Tabla 4), es ilustrativo de los que se suceden en los EM que transita la fruta, coincidiendo con

(Hernández *et al.*, 2005a). De conjunto se muestran valores alcanzados de su límite elástico (punto A), punto de biocedencia (punto B), 1 punto de fractura (punto C) y la compresión de los frutos hasta el 3% de su diámetro polar, existiendo diferencia significativa entre los EM.

Las curvas de esfuerzo-deformación unitaria para cada EM (Figura 6) para el área fruto- placa metálica y el área integrada y así definir su límite elástico. De dichas curvas se llega a los valores del límite elástico (A) y del Módulo de Young por áreas y EM. La Tabla 5 muestra sus promedios de los mismos junto con los del coeficiente de Poisson obtenidos para cada EM, las cuales se utilizan para caracterizar el material, y simular la firmeza de las frutas durante la etapa poscosecha en el programa de cómputo SolidWorks (2013).

De acuerdo a los resultados obtenidos se puede observar que a medida que los frutos alcanzan el EMIII decrece en el μ debido a que la resistencia

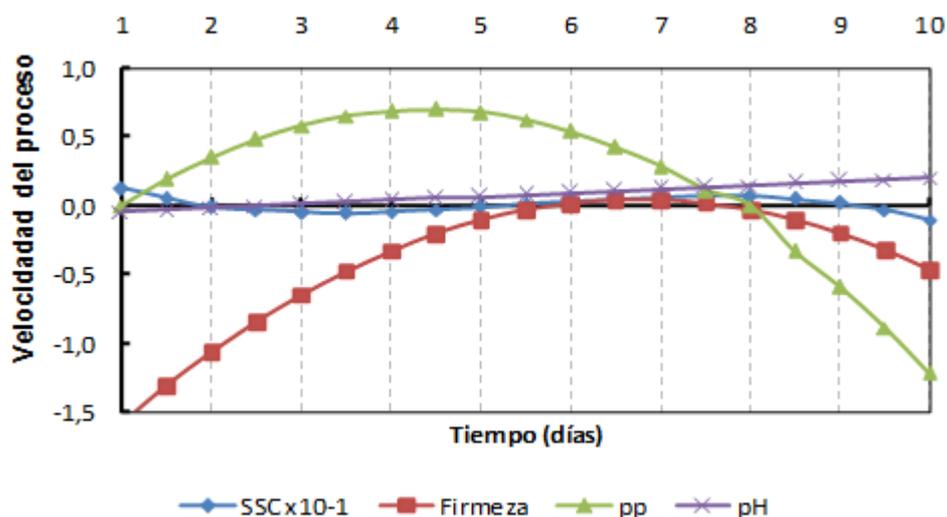


FIGURA 5. Velocidad de cambio de las propiedades durante los días de almacenamiento.
 TABLA 3. Valores promedios de las principales propiedades físico-mecánicas de la guayaba por estados de maduración (EM)

	D polar, mm	D ecuatorial, mm	Masa, g	Clasificación	Den, g/cm ³
EM-I	60.24	60.34	119.53	Grande	1.01
EM-III	63.24	61.3	152.48	Grande	0.96

TABLA 4. Firmeza promedio de las frutas por cada estado de maduración

Firmeza promedio (N)	EM-I**	EM-III**
Fuerza al 3% (N)	58,0	10,4
Fuerza con que alcanza el punto (A), (N)	531,5	49,0
Fuerza con que alcanza el punto (B), (N)	600,5	67,1
Fuerza con que alcanza el punto (C), (N)	804,8	81,9

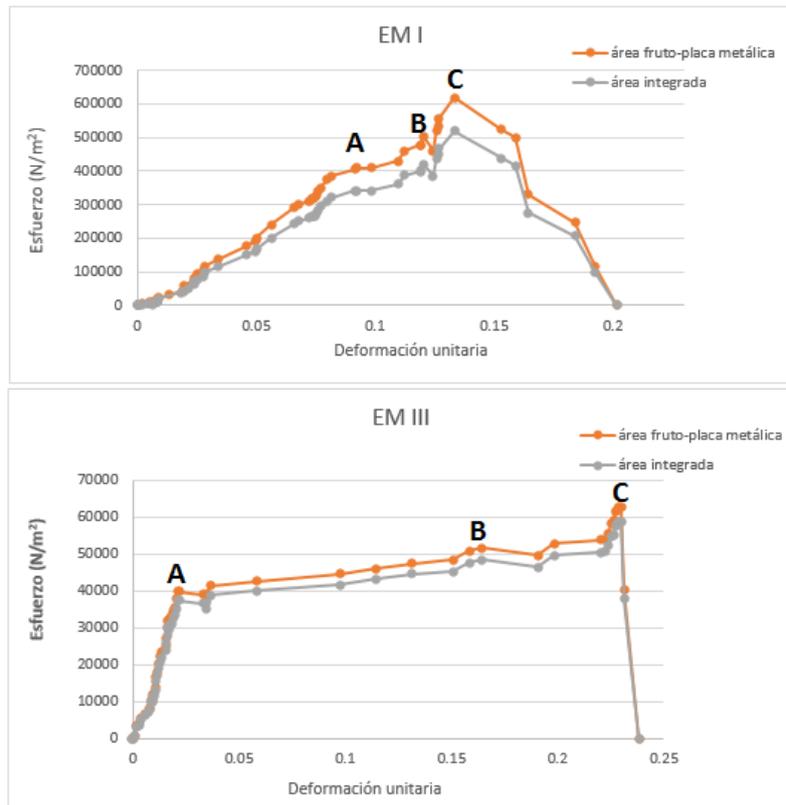


FIGURA 6. Curva de esfuerzo - deformación unitaria de la guayaba en los estados de maduración (EMI Y EMIII).

Tabla 5. Propiedades físico-mecánicas de las frutas de guayaba.

Estado de maduración	Límite de elast., MPa	Módulo de Elast., MPa	μ
EM-I (fruto-placa metálica)	0,41	4,44	0,34
EM-I (área integrada)	0,34	3,71	0,34
EM-III(fruto-placa metálica)	0,13	1,84	0,49
EM-III (área integrada)	0,10	1,78	0,49

del material disminuye con la maduración, siendo más fácilmente deformable para esfuerzos menores. Los valores del módulo de elasticidad en el EM-I para el área fruto-placa metálica y área integrada se muestran cambios notables de 4,44 a 3,71 MPa, no ocurriendo así en el EM-III donde los valores para el área fruto-placa metálica son de 1,84 MPa y el área integrada son de 1,78 MPa.

Simulación de cargas estáticas en un cuerpo homogéneo

La generación de una malla lo suficientemente pequeña para obtener resultados confiables es uno de los pasos más importantes en la simulación, ya que la misma debe ser capaz de resolver el problema en estudio con una alta precisión y depende de un análisis de convergencia por ello el número total de nodos

en este caso fue de 10 433 y el número total de elementos 7045 (Figura 7).

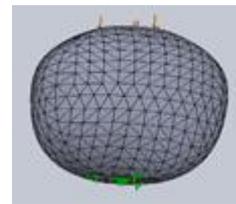


FIGURA 7. Modelación de la guayaba con la fuerza, restricciones y malla sólida.

En la Figura 8 ocurren cambios en las deformaciones longitudinales (mm), en la dirección z, a medida que el fruto pasa del EMI al EM III. El fruto, en estado de madurez uno (EM-I), que se simulo con el módulo de elasticidad que tiene en cuenta el área fruto-placa metálica muestra valores de deformación longitudinal de 0,94 mm y el que se simulo con módulo de elasticidad asumiendo el área integrada de la

fruta alcanza valores de 1,12 mm, obteniendo una simulación con este último más aproximada al obtenido experimentalmente donde se registraron valores de 1,13 mm para una fuerza de 58 N.

En el caso del estado de maduración tres (EM-III) se tienen para una carga de 10,4 N valores de deformación longitudinal de 0,44 y 0,48 mm, en los frutos con área fruto-placa metálica y área integrada respectivamente, siendo estos valores más aproximados a los obtenidos experimentalmente. En la dirección contraria (diámetro ecuatorial) las deformaciones son pequeñas del orden de 1 a 2 mm lo cual no representa un valor a tener en cuenta con respecto a los obtenidos en la zona de contacto entre las frutas y las placas metálicas.

Comparación de los resultados del

experimento y el análisis numérico: en la [Tabla 6](#), se muestra la comparación de ambos resultados (análisis numérico mediante el MEF y experimento de laboratorio), en cuanto a las deformaciones longitudinales (ΔL) que se produce con la aplicación de las cargas de compresión para el 3% del diámetro polar.

Para realizar la validación del modelo es preciso determinar los errores de predicción del mismo, en cada una de las variables analizadas, donde se comparan los valores obtenidos experimentalmente con los derivados de la evaluación del modelo digital. En la misma se puede observar que en todos los estados de maduración se obtiene una precisión del modelo mayor al 80%, y en los correspondientes al modelo (área integrada) mayor al 90%, [tabla 7](#).

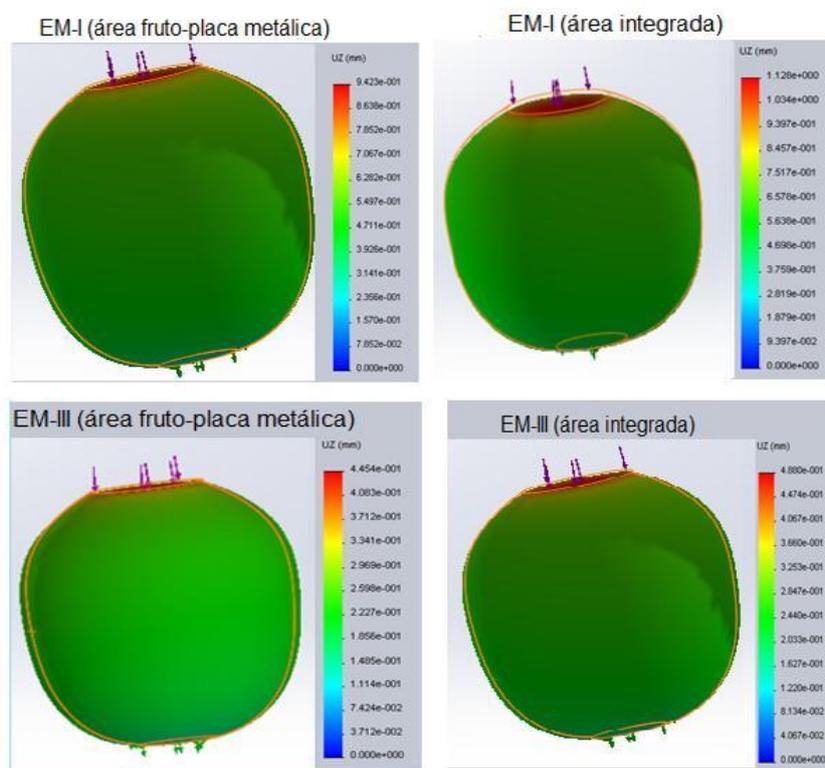


FIGURA 8. Resultado de la simulación de las deformaciones longitudinales al comprimirse el fruto al 3% del diámetro polar en los dos estados de maduración.

TABLA 6. Comparación de las deformaciones medias obtenidas

Estados de Madurez(EM)	Fmáx, N	Deformaciones longitudinales, mm	
		Exp.	MEF
EM-I(área fruto-placa metálica)	58,0	1,15	0,94
EM-I (área integrada)	58,0		1,12
EM-III(área fruto-placa metálica)	10,4	0,49	0,44
EM-III (área integrada)	10,4		0,48

TABLA 7. Estimación de errores del modelo para la deformación CIRO,

EM	Carga, N	Error de deformación,%	Error de modelo,%
EM-I (área fruto-placa metálica)	58	18,26	81,74
EM-I (área integrada)	58	2,60	97,4
EM-III (área fruto-placa metálica)	10,4	10,20	89,8
EM-III (área integrada)	10,4	2,04	97,96

CONCLUSIONES

- Con el empleo de técnicas matemáticas y de simulación para describir el comportamiento de las propiedades en piña y predecir el esfuerzo máximo que resiste el fruto de la guayaba en dos estados de maduración bajo cargas estáticas.
- En el patrón de calidad de la piña Cayena Lisa almacenada a temperatura ambiente, cuantificado a partir de las pérdidas de peso, la firmeza, el pH, los contenidos de sólidos solubles y su índice de color, se distingue por tres períodos correspondientes al día inicial, entre dos y seis días y entre los siete y diez días de almacenamiento de la fruta.
- La velocidad o razón de cambio promedio durante todo el periodo de almacenamiento de diez días a temperatura ambiente de las pérdidas de peso y la firmeza de la piña son de 0,17 g/día y -0,04 kgf/cm²día, mientras que las del pH y los contenidos de sólidos solubles es en ambos casos de apenas 0,08 unidades por día.
- La guayaba como fruta fresca posee valores medios de talla, densidad y coeficiente de Poisson de 60 ±5 mm, 0,98 g/cm³, 0,41, respectivamente.
- En el módulo de elasticidad de los frutos en EM-I (área fruto-placa metálica y área integrada) se muestran cambios notables de 4,44 a 3,71 MPa, no ocurriendo así en el EM-III donde los valores para el área fruto-placa metálica son de 1,84 MPa y el área integrada son de 1,78 MPa.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BØRGESSEN, C.D.; SCHAAP, M.G.: “Point and parameter pedotransfer functions for water retention predictions for Danish soils”, *Geoderma*, 127: 154- 167, 2005, ISSN: 0016-7061.

OSORIO, J.A.: “Avance experimental de la ingeniería de postcosecha de frutas colombinas: resistencia mecánica para frutas de uchuva (*Physalis peruviana* L)”, *Dyna*, 75(154): 39-46, 2005, ISSN: 0012-7353.

DONATELLI, M.; WOSTEN, J.H.M.; BELOCCHI, G.: “Methods to evaluate Pedotransfer Functions”, *Development in Soil Science*, 30, 2004, ISSN: 0166-2481, DOI: [http://dx.doi.org/10.1016/S0166-2481\(04\)30020-6](http://dx.doi.org/10.1016/S0166-2481(04)30020-6).

ESSENTIAL MATHCAD FOR ENGINEERING, SCIENCE, AND MATH: *Essential Mathcad for Engineering, Science, and Math*, Second Edition 2nd ed., USA, 2000, ISBN: ISBN-13: 978-0123747839, ISBN-10: 012374783X.

FAO: “nomas de la Fao para piña, estado fresco, variedades... - Google Académico”, [en línea], En: 8 de mayo de 2018, Disponible en: https://scholar.google.com/scholar?hl=es&as_sdt=0%2C5&q=nomas+de+la+Fao+para+pi%3%B1a%2C+estado+fresco%2C+variedades+comerciales+&btnG=#d=gs_cit&p=&u=%2Fscholar%3Fq%3Dinfo%3A7sgfqJe1CqMJ%3Ascholar.google.com%2F%26output%3Dcite%26scirp%3D0%26hl%3Des, [Consulta: 8 de mayo de 2018].

FERNÁNDEZ, D.; GARCÍA, A.; HERNÁNDEZ, A.; MONZÓN, L.L.: “Evaluación del daño mecánico producido por cargas estáticas de compresión en guayaba (*Psidium guajaba* L.) variedad enana roja EEA-123”, *Científica*, 16(2), 2012.

GARCÍA, A. (2007). *Comparación de tres técnicas de análisis multivariable durante la predicción del contenido de nitrógeno del suelo usando la espectroscopía. RCTA . VOL. 16. No.4.*

- GARCÍA, Y.; COLELLI, G.; RINALDI, R.; CORNACHI, R.: *Evaluación de la calidad de la piña, variedad Golden Sweet como fruta entera y cortada en estado fresco y en condiciones de almacenamiento*, Universidad Agraria de Foggia, Italia, 2010.
- GONZÁLEZ, O.; CORONEL, C.E.I.; BRAVO, E.L.; MORFA, C.A.R.; SUÁREZ, M.H.: “Modelling in FEM the soil pressures distribution caused by a tyre on a Rhodic Ferralsol soil”, *Journal of Terramechanics*, 63: 61-67, 2016, ISSN: 0022-4898.
- HERNÁNDEZ, A.G.; WANG, J.; GARCÍA, P.A.: “Impulse response of pear fruit and its relation to Magness-Taylor firmness during storage”, *Postharvest Biology and Technology*, 35(2): 209-215, 2005, ISSN: 0925-5214.
- HERRERA, M.; IGLESIAS, C.E.; GONZÁLEZ, O.; LÓPEZ, E.; SÁNCHEZ, Á.: “Propiedades mecánicas de un Rhodic Ferralsol requeridas para la simulación de la interacción suelo implemento de labranza mediante el Método de Elementos Finitos: Parte I”, *Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias*, 17(3), 2008, ISSN: 2071-0054.
- JAMAL NOURAIN, YI-BIN YING, JIAN-PING WANG, XIU-QIN RAO, AND CHAO-GANG YU, (2005). *Firmness evaluation of melon using its vibration characteristic and finite element analysis **, *Journal of Zhejiang University Science*, v 6(6): 483-490.
- JIMÉNEZ, Y.: *Determinación de la firmeza de la guayaba enana roja EEA 1-23 mediante la respuesta al impulso acústico*, Universidad Agraria de La Habana, Máster en Sistema de Ingeniería Agrícola, Mayabeque, Cuba, 2015.
- KABAS, ONDER; CELIK, H KURSAT; OZMERZI, AZIZ; AKINCI, İBRAHİN, (2008). *Drop test simulation of a sample tomato with finite element method*, *Journal of the Science of Food and Agriculture*, Volume 88, pp. 1537-1541(5).
- LÓPEZ, A.P.: “Propiedades físico-mecánicas y simulación por computadora del daño por impacto en guayaba (*Psidium guajava* L.)”, *Acta Agrícola y Pecuaria*, 3(1): 14-23, 2017.
- LU, R., SRIVASTAVA, A.J., ABABNEH, H.A, (2006). *Finite element analysis and experimental evaluation of bioyield probes for measuring apple fruit firmness*, *Transactions of the ASABE*, 49(1): 123-131.
- MARTÍNEZ, A.; RODRÍGUEZ, R.; PÉREZ, A.: “Sensoramiento del estado de compactación del suelo mediante un campo magnético variable”, *Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias*, 20(1): 25-30, 2011, ISSN: 2071-0054.
- MOGOLLÓN, C.G.; REGINO, K.I.C.; SARRIA, S.D.: “Comportamiento poscosecha y evaluación de calidad de fruta fresca de guayaba en diferentes condiciones de almacenamiento”, *Revista Facultad Nacional de Agronomía Medellín*, 64(2), 2011.
- NORMA TÉCNICA MEXICANA NMX-FF-041-SCFI-2007: *Productos Alimenticios no Industrializados para Consumo Humano - Fruta Fresca - Papaya (*Carica papaya* L.)*, Inst. NMX-FF-041-SCFI, México, 2007.
- NORMA TÉCNICA COLOMBIANA NTC 1263, 2007: *F. Villamizar*, « Manejo tecnológico poscosecha de frutas y hortalizas», Inst. Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, Colombia, 130 p., 2007.
- PARK, B., CHEN, W. R., HRUSCHKA, S. D., SHACKELFORD, Y. M. KOOHMARAIE, (2001). *Principal component regression of near-infrared reflectance spectra for beef tenderness prediction. Transaction of the ASAE*. 44(3): 609-615.
- RAMOS, L.; AROZARENA, N.J.; LESCAILLE, J.; GARCÍA, F.; TAMAYO, Y.; CASTAÑEDA, E.; LOZANO, S.; RODRÍGUEZ, G.: “Dosis de pectimorf® para enraizamiento de esquejes de guayaba var. Enana Roja Cubana”, *Revista mexicana de ciencias agrícolas*, 4(SPE6): 1093-1105, 2013.
- SCHOFIELD, A.; WROTH, P.: *Critical state soil mechanics*, Ed. McGraw-Hill London, vol. 310, 1968.
- SILLING, S.A.: “Reformulation of elasticity theory for discontinuities and long-range forces”, *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 48(1): 175-209, 2000.
- SILVESTRE, P.P (1998). *Elemento finito para ingeniería eléctrica*. Edit. Noriega, Ed. primera, 236 pp.

SOLIDWORKS: *SolidWorks 2013 for Designers*.

Sham, Ed. CADCIM Technologies, Tickoo.
Published by CADCIM Technologies, 525 ed.,
USA, 2013, ISBN: 978-1-936646-46-3.

TURNER, M.J.; CLUGH, R.W.; MARTIN, H.C.;
TOPP, L.J.: “Stiffness and deflection analysis
of complex structures”, *Journal of the
Aeronautical Sciences*, 23(9): 805-823, 1956,
ISSN: 2470-4415.

YIRAT, M.; GARCÍA, A.; HERNÁNDESZ, A.;
CALDERÍN, A.; CAMACHO, N.:
“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), 2009, ISSN: 2071-0054.

Lazara Rangel-Montes de Oca, Prof., Universidad Agraria de la Habana, Facultad de Ciencias Técnicas.
Autopista Nacional y carretera Tapaste, km 231/2, apartado 18-19, San José de las Lajas, Mayabeque, Cuba. e-
mail: lazarar@unah.edu.cu.

Leidy L. Monzón-Monrabal, e-mail: leidym@unah.edu.cu

Jorge García-Coronado, e-mail: jgarcia@unah.edu.ch

Annia García-Pereira, e-mail: annia@unah.edu.cu

Los autores de este trabajo declaran no presentar conflicto de intereses.

Este artículo se encuentra bajo licencia [Creative Commons Reconocimiento-NoComercial 4.0 Internacional \(CC BY-NC 4.0\)](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/)

La mención de marcas comerciales de equipos, instrumentos o materiales específicos obedece a propósitos de identificación, no existiendo ningún compromiso promocional con relación a los mismos, ni por los autores ni por el editor.