

CARACTERIZACIÓN DE PROPIEDADES MECÁNICAS DEL BANANO (Cavendish Valery)

Héctor José Ciro Velásquez¹; Mary Luz Montoya López² y
Leonidas de Jesús Millán Cardona³

RESUMEN

Bananos (Cavendish Valery) fueron sometidos a cargas de compresión unidireccional usando un analizador de textura TA-XT2i. Los resultados de las pruebas de fuerza de fractura a flexión y compresión mostraron que tanto el producto en su estado natural y su pulpa tienen una resistencia mayor a flexión que a compresión. Los modelos estadísticos indicaron que las propiedades mecánicas del producto definidas en firmeza, fractura y módulos elásticos son altamente dependientes del tiempo poscosecha. Situación similar ocurrió en la caracterización físico-química.

Palabras claves: Reología, propiedad mecánica, firmeza, banano.

ABSTRACT

CHARACTERIZATION OF MECHANICAL PROPERTIES OF BANANA (Cavendish Valery)

Bananas (Cavendish Valery) were subjected to unidirectional compression loads using a TA-XT21 texture analyzer. The results of the force to fracture and compression tests indicated that the mechanical properties of the product in its natural state and its pulp

¹ Profesor Asistente. Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín, Facultad de Ciencias Agropecuarias. A.A. 1779, Medellín, Colombia. <hjciro@unalmed.edu.co>

² Ingeniera Industrial. Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín. Facultad de Minas. A.A. 1027, Medellín, Colombia. <mlmontoy@unalmed.edu.co>

³ Ingeniero Industrial. Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín. Facultad de Minas. A.A. 1027, Medellín, Colombia. <ldmillan@unalmed.edu.co>

have a higher resistance to flexion than to compression. The statistical models indicated that the mechanical properties of the products defined by firmness, fracture and elastic modulus are highly dependent upon post-harvest time. A similar situation occurred in the physical-chemical characterization.

Key words: Rheology, mechanical property, firmness, banana.

La economía Colombiana depende en gran parte del sector agropecuario. El cultivo y producción de frutas tropicales, como es el banano, ocupa un papel importante en la comercialización a nivel internacional (Asociación de Bananeros de Colombia (Augura), 1990). Las especificaciones de los clientes en el exterior obligan a desarrollar y aplicar prácticas tecnológicas modernas, las cuales contribuyen a incrementar los rendimientos en la producción y, mejorar la calidad de la fruta.

La realización y aplicación de un estudio de la respuesta mecánica y reológica de la fruta, definiría las diferentes fuerzas o cargas y deformaciones, cuyas magnitudes resultarían determinantes para mejorar técnicas de empaque, transporte, control de calidad, índices de cosecha, manejo y control de daño mecánico.

Generalidades del banano. El banano pertenece al orden Zingiberales, familia Musaceae y género Musa (Soto, 1985). Las especies más destacadas son: la *Musa acuminata* Colla que ha dado origen a las variedades comerciales, *Musa balbisiana* Colla y *Musa acuminata* diploide (Sierra, 1993).

Desde el punto de vista de exportación el banano se cultiva con tecnología de punta y exhaustivo control de todos sus requerimientos. La rentabilidad del cultivo frente a otras alternativas productivas

permite el uso de nuevas tecnologías de riego, drenaje y transporte (Sierra, 1993).

Conceptos básicos de reología y fractura.

La reología o ciencia de la deformación de la materia para Muller (1973), Prentice (1992) y Rao (1999) se ocupa preferentemente de la deformación de los cuerpos aparentemente continuos y coherentes.

Los alimentos que bajo condiciones de carga durante un tiempo de aplicación exhiben simultáneamente las propiedades viscosas propias de un líquido y las elásticas, características de un sólido, son agrupados bajo la definición de materiales viscoelásticos y su comportamiento es representado por modelos reológicos (Stroshine, 1999 y Mohsenin, 1986).

La firmeza mide la resistencia a daños físicos ocasionados por medios mecánicos durante la recolección, manipulación y transporte; depende del momento y método de recolección y de la temperatura de almacenamiento. Existen distintas técnicas para medir la firmeza, basadas en diferentes propiedades mecánicas como son, la punción, penetración, etc. En general los ensayos tradicionales de firmeza miden la fuerza que opone un material biológico al ser perforado o comprimido hasta cierta profundidad y deformación (Buitrago *et al.*, 2004).

La firmeza del banano es una importante característica de calidad de cosecha. La misma podría ser utilizada como un índice de madurez/maduración. También podría facilitar la comparación de la tasa de ablandamiento del banano (Kramer, 1984).

El valor del módulo de Young es característico de cada material y es independiente de la forma y tamaño de la muestra empleada en su medición. Es un indicador de la resistencia que tiene un material sometido a un esfuerzo de tensión o compresión y se interpreta como la máxima fuerza que se puede aplicar al material sin romperlo (Pytel y Singer, 1994).

De acuerdo con Stroshine (1999) el conocimiento de las características mecánicas de frutas y productos vegetales, que son materiales viscoelásticos, es una información básica necesaria para el desarrollo de procesos mecanizados de cosecha, transporte, manejo, requerimientos de empaque, almacenamiento, procesos de transformación y control de daño mecánico. La fractura podría ser descrita de manera macroscópica como la formación de grietas o ranuras en el producto, sin embargo, existen otros tipos de fallas en las cuales las células pueden ser fracturadas como ocurre en frutas y vegetales cuando existe un daño por abrasión, el cual de acuerdo con Mohsenin (1986), es un daño mecánico ocasionado por una fuerza externa que puede ocasionar cambios de sabor, alteración química del color sin romper la superficie del producto.

El objetivo del presente trabajo fue analizar los cambios en la respuesta mecánica de la fruta con el tiempo de

almacenamiento. Estas magnitudes podrían contribuir para mejorar técnicas de empaque, transporte, control de calidad, índices de cosecha, manejo y control de daño mecánico

MATERIALES Y MÉTODOS

Localización. La investigación se desarrolló en los laboratorios de Nutrición Animal y Frutas y Hortalizas de la Universidad Nacional de Colombia-sede Medellín.

Materiales. El producto vegetal (bananos) de la variedad Cavendish Valery, fue obtenido de una comercializadora local (Central Mayorista de Antioquia, Medellín-Colombia) y proveniente de la empresa Chiquita (Urabá). Los bananos se seleccionaron en tamaño, forma y maduración aparente y almacenados a una temperatura promedio de 24 ± 3 °C y una humedad relativa de 68 ± 5 %, antes de su uso. La longitud de la curvatura exterior del banano, medida desde el extremo distal hasta el extremo proximal, donde se considera que termina la pulpa fue $23,3 \pm 1,13$ cm. Los diámetros externos a 25, 50 y 75 % de la longitud de curvatura fueron $3,4 \pm 0,20$ cm, $3,6 \pm 0,23$ cm, y $3,4 \pm 0,19$ cm respectivamente.

Caracterización físico-química. El contenido de sólidos solubles (°Brix) fue determinado de acuerdo a la Association of Official Agricultural Chemists (AOAC) (1990) método 932.12 con un refractómetro Leica auto ABBE.

El valor del pH fue medido con un potenciómetro digital manual METER, cg-840b (Schott) de acuerdo a la AOAC (1990) método 981.12.

La acidez titular se determinó mediante un análisis volumétrico con Hidróxido de Sodio 0.1 N. de acuerdo a la AOAC (1990) método 22.070.

Métodos. Las pruebas mecánicas se realizaron con un analizador universal de textura TA-XT2i (Stable Micro Systems) usando el software Texture Expert Exceed, versión 1.00.

Prueba de firmeza. La firmeza de las muestras se determinó a partir de una prueba de compresión unidireccional usando un eje cilíndrico de acero inoxidable de diámetro de 2 mm, a una velocidad de deformación de 2 mm/s y distancia de deformación de 20 mm (Figura 1). Durante 12 días, 10 muestras fueron evaluadas por cada día y cada muestra se evaluó a una distancia correspondiente al 25, 50 y 75 % de la longitud de la curvatura externa.



Figura 1. Prueba de firmeza por compresión unidireccional en banano var. Cavendish Valery.

A partir de la gráfica fuerza - distancia (deformación), se obtuvo la fuerza máxima requerida para penetrar la cáscara del banano, y la fuerza media requerida para penetrar posteriormente la pulpa (Figura 2).

Módulo elástico (Módulo de Young). Se determinó a partir de ensayos de compresión y de flexión en 3 puntos hasta su fractura como lo muestra la Figura 3.

Los ensayos a compresión se hicieron durante doce días, haciendo 10 pruebas

por cada día utilizándose muestras cilíndricas de pulpa (diámetro: 20 mm, longitud: 40 mm), las cuales fueron sometidas a carga axial mediante un plato de 100 mm de diámetro y a una velocidad de deformación de 2 mm/s.

Debido a la complejidad de la estructura que exhibe los productos de naturaleza biológica (Mohsenin, 1986), el análisis del módulo elástico a compresión se realizó a 4 niveles de deformación de 17, 34, 50 y 100 % relativa con respecto a la altura inicial de la probeta cilíndrica como lo muestra la Figura 4.

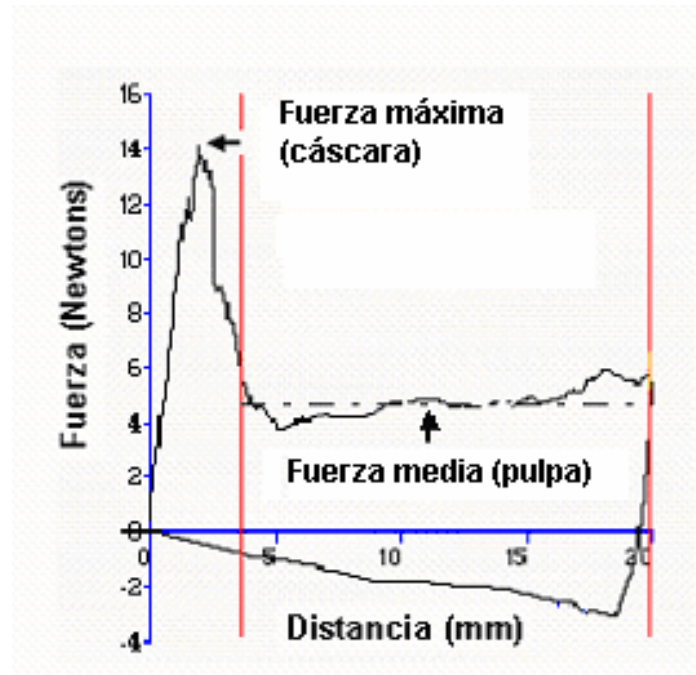


Figura 2. Curva de firmeza de la cáscara y la pulpa de banano var. Cavendish Valery al ser sometidas a deformación.

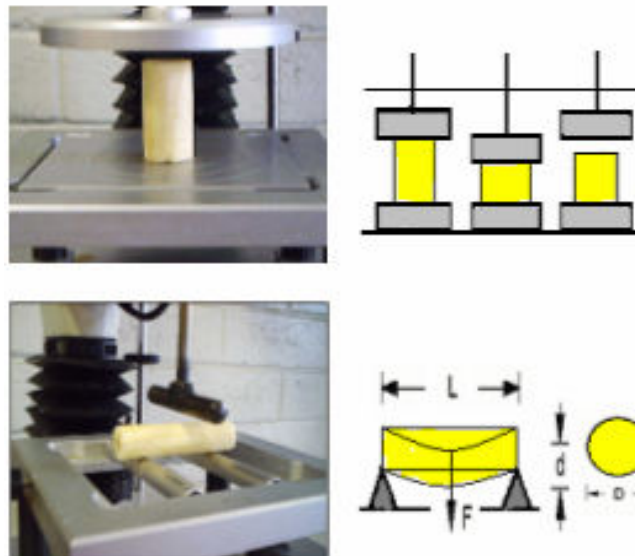


Figura 3. Ensayos de compresión y flexión en banano var. Cavendish Valery

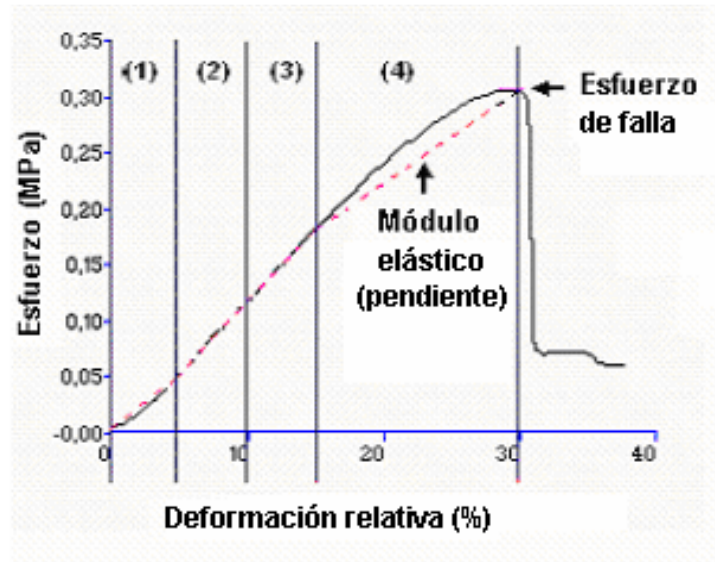


Figura 4. Curva esfuerzo - deformación en banano var. Cavendish Valery.

Para los ensayos a flexión, los 2 soportes inferiores en la base del analizador de textura, se localizaron a 4 cm de distancia y el punto superior se ajustó a una velocidad de deformación de 2 mm/s. Los ensayos a flexión se hicieron durante doce días, 10 pruebas por cada día usando muestras cilíndricas de pulpa con un diámetro de 10 mm y 60 mm de longitud.

El módulo de elasticidad del producto a flexión se determinó mediante la siguiente expresión (Pytel y Singer, 1994):

$$E = \frac{4FL^3}{3\pi D^4 d} \quad (1)$$

Donde:

E = Módulo de Young (N/m²)
 F = Fuerza aplicada a la probeta (N)
 L = Longitud efectiva (m)
 D = Diámetro de la probeta (m)
 d = Deformación (m)

Prueba de fractura. Las fuerzas de fractura del banano se realizaron en su estado natural (elemento) tanto a compresión como a flexión (Figuras 5 y 6). Los ensayos a compresión se hicieron durante doce días, 10 pruebas por cada día, donde las muestras fueron sometidas a compresión unidireccional (longitudinal) hasta su ruptura mediante un plato de compresión de 100 mm de diámetro.

Los ensayos a flexión a 3 puntos se hicieron durante doce días y 10 pruebas por cada día. Los soportes inferiores se ajustaron a una distancia de 14 cm y el soporte superior (sonda de 15 mm de diámetro y 70 mm de longitud) a una velocidad de deformación de 2 mm/s.

Esfuerzo de falla. El esfuerzo de falla fue determinado a la pulpa tanto a compresión como a flexión. En la compresión fue obtenido de la respectiva curva esfuerzo versus deformación relativa y para el esfuerzo a flexión se determinó con base

en la expresión citada por (Pytel y Singer, 1994). Donde:

$$\sigma_f = \frac{8 F L}{\pi D^3} \quad (2)$$

σ_f = Esfuerzo de falla a flexión (MPa)

F = Fuerza de falla (N)

L = Longitud efectiva (m)

D = Diámetro de la probeta (m)

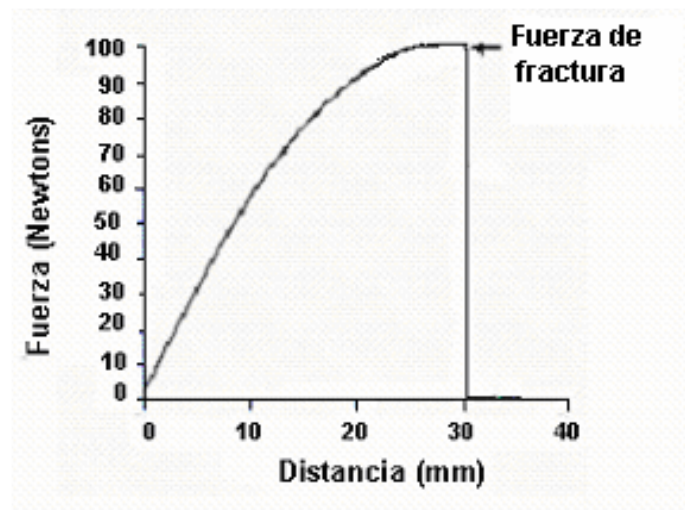


Figura 5. Curva fuerza-deformación en banano var. Cavendish Valery.

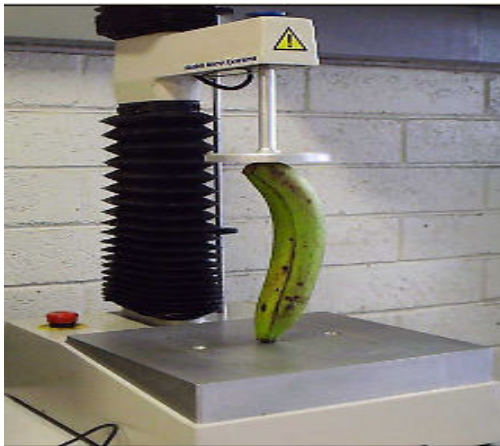


Figura 6. Prueba de fractura a compresión y flexión en banano var. Cavendish Valery.

Análisis estadístico. Los resultados fueron analizados con el programa estadístico SAS versión 8.0. Los datos fueron sometidos a un análisis de varianza y a la prueba de comparación, rangos múltiples de Duncan con un nivel de significancia del 5%.

La prueba de firmeza en la cáscara se analizó mediante un arreglo factorial 12 x 3 x 10 (doce días, tres puntos de penetración y diez repeticiones). En la pulpa se utilizó un modelo de efectos fijos con un solo factor, doce niveles de tratamiento (días) y diez repeticiones.

El módulo elástico a compresión se analizó mediante un arreglo factorial 12 x 4 x 10 (doce días, cuatro zonas y diez repeticiones). La prueba de módulo elástico a flexión, se analizó mediante un modelo de efectos fijos con un solo factor con doce niveles de tratamiento (días) y diez repeticiones.

Los ensayos de fractura y esfuerzo de falla se analizaron mediante un arreglo factorial 12 x 2 x 10 (doce días, dos sentidos de carga (compresión y flexión) y diez repeticiones).

En las pruebas físico-químicas (pH, acidez titulable y sólidos solubles totales (SST)) se utilizó un modelo de efectos fijos con un solo factor con doce niveles de tratamiento (días) y cinco repeticiones para cada prueba.

ANÁLISIS DE RESULTADOS

Prueba de firmeza en la cáscara (Newtons). La Tabla 1 muestra los valores promedios con un intervalo de confianza del 95% de la fuerza máxima de firmeza en los puntos de penetración al (25, 50 y 75% de la longitud de curvatura externa).

Tabla 1. Firmeza en la cáscara. en banano var. Cavendish Valery.

Media (Newtons)	Límite inferior	Límite superior	Localización relativa
15,21 a	14,98	15,44	75%
14,79 b	14,57	15,01	50%
13,64 c	13,42	13,87	25%

Promedios con letras diferentes, son estadísticamente diferentes según la prueba rangos múltiples de Duncan ($P < 0,05$)

El análisis estadístico mostró que existen diferencias significativas con respecto al punto de evaluación (Figura 7). Los valores de la fuerza de firmeza en el punto de penetración al 25 % (extremo distal del banano) fueron menores que al 50 y 75 % esto es atribuible a la forma como se distribuye la maduración del fruto,

comenzando en el extremo distal hasta el extremo proximal.

Con respecto al tiempo de maduración del producto, en la Figura 7 se puede observar un decrecimiento en la firmeza de la cáscara para cada punto de penetración a lo largo del tiempo poscosecha. Lo que concuerda con lo

presentado por Boudhrioua *et al.* (2002) quienes determinaron que durante el almacenamiento, el fruto modifica su firmeza de manera decreciente. A su vez, Aguilera y Stanley

(1999) consideran que durante la maduración, la velocidad de degradación de las sustancias pécticas está relacionada con el ablandamiento de la fruta.

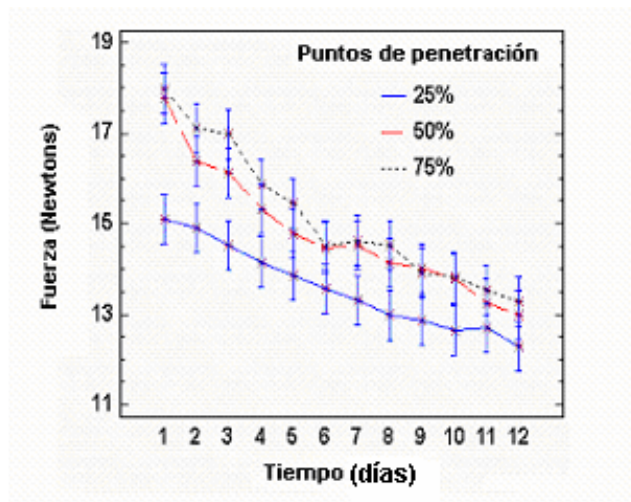


Figura 7. Firmeza promedio de la cáscara en banano var. Cavendish Valery.

Prueba de firmeza en la pulpa (Newtons). El análisis estadístico mostró que la fuerza necesaria para penetrar la pulpa del banano es significativa con el tiempo poscosecha ($P < 0,05$). En el primer día la fuerza media (promedio para los tres puntos de penetración) necesaria para penetrar la pulpa fue de 7,20 N y para el último día de 3,41 N, esto indica que la fruta perdió aproximadamente la mitad

de firmeza en los doce días de almacenamiento.

Determinación del módulo elástico (MPa). Módulo elástico a compresión. El análisis estadístico mostró diferencias significativas con respecto a las zonas. Las zonas 3 y 4 (50 y 100 % de la deformación relativa respectivamente) se presentan como grupos homogéneos (Tabla 2).

Tabla 2. Módulo elástico a compresión en banano var. Cavendish Valery.

Media (MPa)	Límite inferior	Límite superior	Zonas
1,58 a	1,54	1,63	3
1,54 a	1,49	1,58	4
1,43 b	1,38	1,48	2
0,91 c	0,86	0,96	1

*Promedios con letras diferentes, son estadísticamente diferentes según la prueba rangos múltiples de Duncan ($P < 0,05$)

El valor del módulo elástico a compresión varió significativamente respecto al tiempo poscosecha ($P < 0,05$) presentando un valor medio entre el primer y último día de 1,75 MPa y 1,09 MPa respectivamente. Esto es atribuible a la pérdida de rigidez del fruto

el cual ocurre en su proceso de maduración.

En la Figura 8 se puede observar un decrecimiento en el módulo elástico a compresión para cada zona a lo largo de los doce días de almacenamiento.

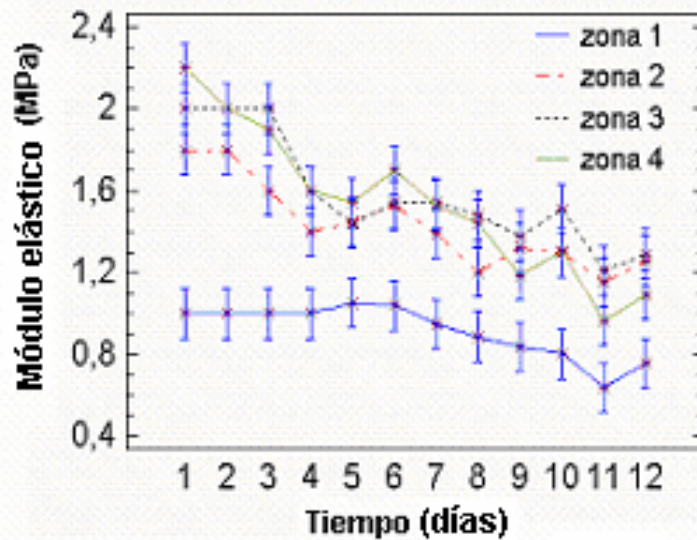


Figura 8. Módulo elástico medio a compresión a través del tiempo para cada zona en banano var. Cavendish Valery.

Módulo elástico a flexión. A medida que transcurre el tiempo de poscosecha, la pulpa del banano pierde rigidez ($P < 0,05$). Entre el primer y el último día, el módulo elástico medio a flexión fue de 5,16 MPa y 2,65 MPa respectivamente, presentando una diferencia media de aproximadamente 2,51 MPa, esto indica que la fruta perdió el 50 % de su rigidez, pero aumentó su grado de elasticidad.

Esfuerzo de falla (MPa). La Figura 9 presenta la evolución del esfuerzo de falla con el tiempo poscosecha para los ensayos de compresión y flexión. El

análisis estadístico reflejó diferencias estadísticamente significativas con respecto a la posición de carga y al tiempo de poscosecha. La pulpa de banano resiste más a flexión, siendo la compresión el comportamiento de más baja variación y en el cual se presenta la más baja reducción en resistencia.

Fuerza de fractura (Newtons). En la Tabla 3 se registran los valores promedios con un intervalo de confianza del 95 % de la fuerza de fractura según la posición de carga (flexión, compresión).

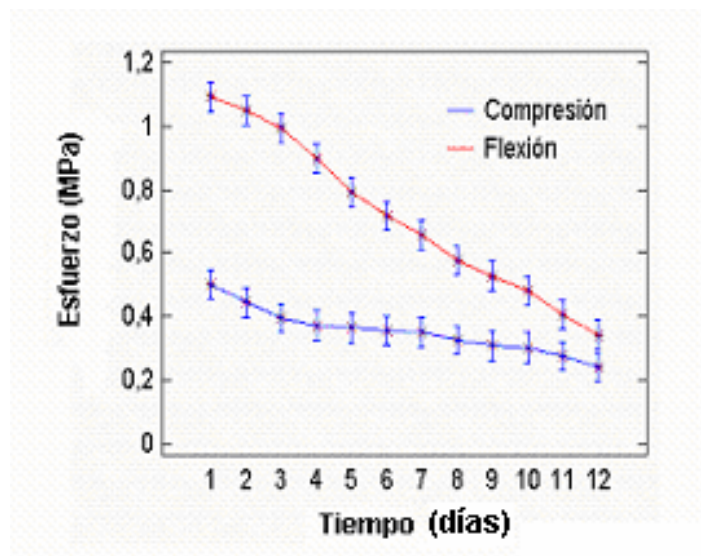


Figura 9. Esfuerzo de falla en función del tiempo de poscosecha en banano var. Cavendish Valery.

Tabla 3. Fuerza de fractura en banano var. Cavendish Valery.

Media (Newtons)	Límite inferior	Límite superior	Posición de carga
129,16 a	124,93	133,40	Flexión
121,35 b	117,12	125,58	Compresión

*Promedios con letras diferentes, son estadísticamente diferentes según la prueba rangos múltiples de Duncan ($P < 0,05$)

Los resultados indican que la posición de carga tiene un efecto significativo en la respuesta mecánica del producto; éste resiste más a flexión que a compresión lo cual puede ser originado a la heterogeneidad estructural de la pulpa-cáscara y a la influencia de la curvatura.

En términos de tiempo poscosecha, el análisis estadístico presentó una influencia significativa del factor tiempo con respecto a la fuerza de fractura. La Figura 10 muestra el comportamiento de la fuerza de fractura con el tiempo pos-

cosecha se observa una reducción entre un 40 % y 50 % en su resistencia para el tiempo de poscosecha estudiado.

La disminución de la resistencia mecánica del banano, el cual ocasiona su ablandamiento se debe según Thompson (1995) y Zhang *et al.* (2005) a la degradación de almidones para formar azúcares, a la ruptura de células y solubilidad de sustancias pépticas.

Caracterización físico-química. El análisis estadístico reflejó diferencias sig-

nificativas respecto al tiempo poscosecha para cada uno de los factores (acidez titulable, sólidos solubles totales ($^{\circ}$ Brix) y pH) ($P < 0,05$).

La Figura 11 presenta el cambio de acidez titulable, sólidos solubles totales ($^{\circ}$ Brix) y pH respecto al tiempo de poscosecha.

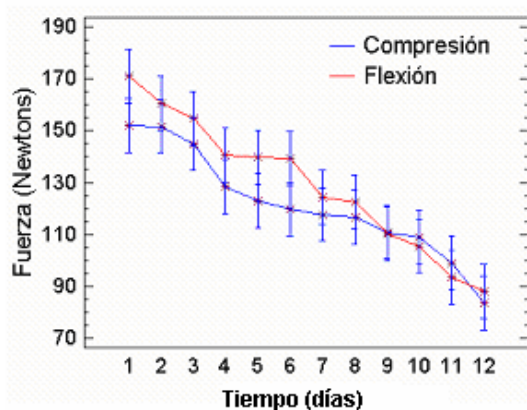


Figura 10. Efecto del tiempo de poscosecha sobre la fuerza de fractura para el banano var. Cavendish Valery.

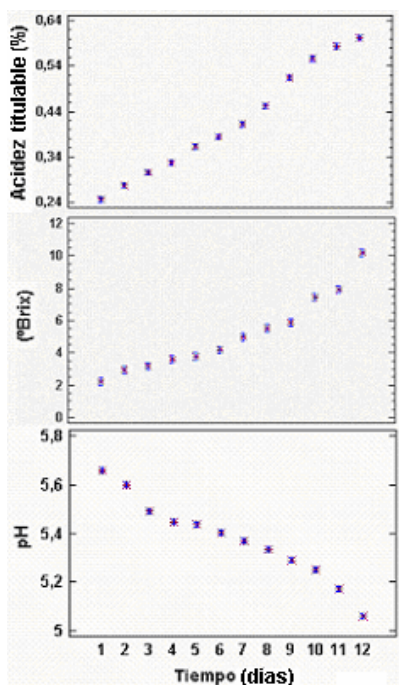


Figura 11. Acidez titulable, sólidos solubles totales ($^{\circ}$ Brix) y pH en función del tiempo de poscosecha en banano var. Cavendish Valery.

Los resultados muestran que a medida que se incrementa el tiempo de poscosecha, disminuye el pH, lo que concuerda con lo reportado por Cardenosa (1955). Los sólidos solubles totales (°Brix), el cual es un indicativo del contenido de sacarosa en el producto y el contenido de ácido se incrementan a medida que avanza la maduración, lo cual coincide con lo reportado por Fernández; Carvalo y Cal-Vidal (1997) y Zhang *et al*, (2005).

CONCLUSIONES

Para la fuerza de firmeza el punto de penetración influye en la caracterización reológica del producto, donde la firmeza del banano es menor en la zona próxima al extremo distal (parte del fruto donde esta sujeto al racimo), debido a que la maduración comienza en este extremo.

El fruto se comporta anisotrópicamente, es decir, ciertas propiedades mecánicas tales como fuerza de fractura y módulo de elasticidad dependen de la dirección de carga.

Las pruebas de fractura del material vegetal, mostró que la resistencia del banano es más alta bajo ensayos a flexión que a compresión, esto también ocurrió en las pruebas de esfuerzo de falla de la pulpa, lo que indica que la posición longitudinal es la más adecuada para transportar y almacenar el producto.

El banano como material y elemento biológico es de carácter viscoelástico, es decir su comportamiento mecánico es intermedio entre el de un sólido elástico y un líquido newtoniano altamente dependiente del tiempo.

RECOMENDACIONES

Realizar estudios a nivel microestructural de la pared celular del fruto, pulpa y de la cáscara, con el fin de determinar su relación con el comportamiento mecánico a nivel macroestructural.

Relacionar el estudio de firmeza con la vida de almacenamiento o anaquel del producto para establecer criterios prácticos del manejo a nivel de poscosecha.

Estudiar el efecto de la temperatura, humedad relativa y presión de turgencia en la respuesta mecánica de la fractura, ya que son variables que afectan la estructura celular del material y podrían influir en la respuesta mecánica.

BIBLIOGRAFIA

AGUILERA, J. M. and STANLEY, D. W. Microestructural principles of food processing and engineering. 2 ed. Maryland: ASPEN publications, 1999. p. 251-291.

ASSOCIATION OF OFFICIAL AGRICULTURAL CHEMISTS. Official methods of analysis. Washington, D.C.: AOAC, 1990. 304 p.

AUGURA. Actividad bananera de Urabá. Medellín: Colina, 1990. 24 p. (Folleto divulgativo)

BOUDHRIQUA, N. *et al*. Influence of ripeness and air temperature on changes in banana texture during drying. *Err*. Journal of Food Engineering. Vol. 55 (2002); p. 15-121.

- BITRAGO V., G. *et al.* Determinación de las características físicas y propiedades mecánicas de papa cultivada en Colombia. *En: Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*. Vol. 8, No. 1 (2004); p.102 -110.
- CARDENOSA B, R. El género *Musa* en Colombia, plátanos y bananas afines. Cali: s.n., 1955. 367 p.
- FERNÁNDEZ, K. M.; CARVALO, V.D. and CAL-VIDAL, J. A research note physical changes during ripening of silver bananas. *En: Journal of Food Science*. Vol. 44 (1979); p. 1254-1255.
- KRAMER, A. Definition of texture and its measurement in vegetables products. *En: Food Technology*. Vol. 18 (1984); p.304-307.
- MOHSENIN, N. N. Physical properties of plant and animal materials: structure, physical, characteristics and mechanical properties. New York: Gordon and Breach Science, 1986. 664 p.
- MULLER, H. G. Introducción a la reología de alimentos. Zaragoza: Acribia, 1973. p. 13-17, 22-34, 133-144.
- POLLAK, N. and PELEG, M. Early indications of failure in large compressive deformation of solid foods. *En: Journal of Food Science*. Vol. 45 (1980); p. 825-835.
- PRENTICE, J. H. Dairy rheology a concise guide. S.I.: VCH Publishers, 1992. 165 p.
- PYTEL, A. y SINGER, F. Resistencia de materiales. México: Oxford, 1994. p. 31-32.
- RAO, M. A. Rheology of fluid and semisolid foods: principles and applications. New York: Aspen, 1999. 433 p.
- SIERRA L. E. El cultivo del banano: producción y comercio. Medellín: Gráficas Olímpicas, 1993. 680 p.
- SOTO, B. M. Banano cultivo y comercialización. San José, Costa Rica: Litografía e Imprensa LIL., 1985. 648 p.
- STROSHINE, R. Physical properties of agricultural materials and food products. Department of Agricultural and Biological Engineering. West Lafayette, 1999. p. 113-152.
- THOMPSON, A. and BURDEN, O. J. Harvesting and fruit care. *En: GOWEN, S., ed. Bananas and Plantains*. London, UK: Chapman and Hall, 1995. p. 403-433.
- ZHANG, P. R. *et al.* Banana starch: production, physicochemical properties, and digestibility: a review. *En: Carbohydrate Polymers*. Vol. 59 (2005); p. 443-458.