

Caracterización mecánica y físico-química del banano tipo exportación (*CAVENDISH VALERY*)

Leonidas de Jesús Millán Cardona*

Héctor José Ciro Velásquez**

Resumen

Introducción. La economía colombiana depende en gran parte del sector agropecuario; el cultivo y producción de frutas tropicales, como lo es el banano, ocupa un papel importante en la comercialización internacional. **Objetivo.** Caracterización mecánica y físico-química del banano Cavendish Valery bajo ensayos de compresión unidireccional mediante pruebas de firmeza, fractura y módulo elástico, y de propiedades físico-químicas como grados Brix, pH y acidez. **Materiales y métodos.** El material vegetal fue adquirido con el mismo grado de maduración y almacenado a una temperatura promedio de $24 \pm 4^\circ\text{C}$. Estos frutos fueron sometidos a pruebas de compresión unidireccional diariamente durante doce días usando un texturómetro TA-XT2i y el software Textura Expert Excede, versión 1,00. **Resultados.** Los resultados mostraron que la fuerza de firmeza en la cáscara varió significativamente ($p < 0.05$) respecto al tiempo poscosecha al presentar un valor entre el primero y el último día de 16,49N y 12,39N, respectivamente. En las pruebas de fuerza de fractura y esfuerzo de falla se encontró que el producto presenta una mayor resistencia mecánica bajo ensayos de flexión, y una disminución en el valor del módulo elástico bajo ensayos de compresión

* Docente Corporación Universitaria Lasallista, Facultad de Ingenierías, programa de Ingeniería Industrial.

** Docente Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín, Facultad de Ciencias Agropecuarias, Departamento de Ingeniería Agrícola y Alimentos.

y flexión durante el período poscosecha, lo que constituye el ablandamiento del fruto; esta pérdida de rigidez es uno de los cambios más evidentes durante el período de almacenamiento, propia de materiales viscoelásticos. Las pruebas físico-químicas realizadas a la pulpa del banano mostraron un aumento significativo ($p<0.05$) en el contenido de grados Brix y acidez, y una disminución significativa ($p<0.05$) en el pH durante la madurez. **Conclusiones.** El fruto se comporta anisotrópicamente, es decir, ciertas propiedades mecánicas como fuerza de fractura y módulo de elasticidad dependen de la dirección de carga. La prueba 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. La firmeza del fruto depende del punto de la fruta: es menor en la zona próxima al extremo distal (parte del fruto donde esta sujeto al racimo), debido posiblemente a que la maduración comienza en este extremo. La composición físico-química de los frutos varía durante el período poscosecha, y presenta un aumento en el contenido de grados Brix y acidez titular al tiempo que una disminución en el pH. El banano como material y elemento biológico es de carácter viscoelástico, es decir, su comportamiento mecánico es intermedio entre un sólido elástico y un líquido newtoniano.

Palabras clave: ????????????????

Mechanical and physical-chemical characteristics of export-type bananas (CAVENDISH VALERY)

Abstract

Introduction. Colombian economy highly depends on the agricultural sector. The cultivation and the production of tropical fruits, such as bananas, have a very important role of its international trade. **Objective.** To provide a mechanical and physical-chemical characterization of Cavendish Valery bananas under unidirectional compression tests by the use of tests of strength, fracture and elastic modulus and tests of physical-chemical properties such as Brix, pH and acidity rates. **Materials and methods.** The material was gotten with the same maturation degree and stored at a media temperature of $24\pm4^{\circ}\text{C}$. These fruits were submitted to unidirectional compression tests every day for a twelve days period, using a TZ-XT2i texturometer and the Texture Expert Exceed software, version 1,00. **Results.** The results showed that the strength of the peel had a significant variation ($p<0.05$) concerning the

post-harvest time, having values of 16,49N y 12,39N between the first and the last days, respectively. In the fracture strength tests and stress failure, it was found that the product is more resistant mechanically under bending tests, plus a reduction of the elastic module value under compression and bending tests during the post-harvest period, which is the softening of the fruit. This loss of stiffness is one of the most evident changes during the storing period, and is typical in viscoelastic materials. The physical-chemical tests performed on the pulp of the bananas showed a significant increase ($p < 0.05$) in the Brix degrees content and the acidity, and a significant reduction ($p < 0.05$) in the pH during the maturation. **Conclusions.** The fruit has an anisotropic behavior, which means that certain mechanical properties such as fracture strength and elasticity module depend on the load direction. The fracture test of the material demonstrated that banana's resistance is higher under bending tests than in compression tests. This also happened in the stress failure tests performed on the pulp, and this means that the best position to store and transport the product is the longitudinal one. The firmness of the fruit depends on the fruit's point. It is lower in the zone around the distal extreme (the part of the fruit in which it is attached to the cluster), possibly due to the fact that the maturation process in that extreme. The physical-chemical composition of the fruits vary during the post-harvest period, and shows an increase in the Brix degrees and titratable acidity, and a pH reduction takes place at the same time. Bananas, as a biological matter and as an element, have a viscoelastic character. This means that its mechanical behavior is placed between an elastic solid and a Newtonian liquid.

Key words: Bananas, properties, Maturation, pH.

Introducción

La economía colombiana depende en gran parte del sector agropecuario; el cultivo y producción de frutas tropicales, como lo es el banano, ocupa un papel importante en la comercialización a nivel internacional. Las especificaciones de los clientes en el exterior obligan a las productoras bananeras a desarrollar y aplicar modernas prácticas tecnológicas tendentes a incrementar los rendimientos en la producción, mejorar la calidad de la fruta y facilitar la realización de las tareas al trabajador, con el fin de ofrecer un producto que cumpla con las características y estándares exigidos en el mercado mundial¹.

Por lo tanto, si se pretende desarrollar, mejorar y/o adaptar tecnologías que logren cumplir con estos requerimientos es indispensable aplicar los conceptos básicos de ingeniería. En Colombia es poco lo que se ha avanzado en la aplicación de Ingeniería en el sector agrícola. Existe un desconocimiento global del comportamiento mecánico de las frutas colombianas, estudios que si se realizaran ayudarían a mejorar procesos básicos de manipulación de la fruta en la poscosecha, en etapas como empaque, transporte y almacenamiento.

La realización y aplicación de un estudio de la respuesta mecánica y físico-química de la fruta definiría las diferentes fuerzas o cargas y deformaciones, cuyas magnitudes resultarían determinantes para mejorar las técnicas de empaque, transporte, control de calidad, índices de cosecha, manejo y control de daño mecánico, para ofrecer así un producto de óptima calidad, y aportar un significativo desarrollo en el sector agrícola colombiano, y específicamente en la industria del sector agroindustrial bananero.

Banano (*Cavendish Valery*)

El banano es un cultivo permanente que se auto reemplaza con un pequeño retoño que crece al lado de la planta y muere al ser cosechada. Las dos especies más conocidas en nuestro medio son: la *musa paradisíaca* que corresponde al plátano para cocción, y el *Cavendish Valery* o banano².

Origen

El banano silvestre ha sido usado probablemente por el hombre desde los comienzos de su existencia. Al igual que el plátano, el banano es una fruta tropical originada en el sudoeste asiático, probablemente de Malasia, China Meridional e Indonesia. Desde allí fue llevado a Madagascar en el siglo XV, y luego difundido en la costa oriental y central de África, aunque algunos lo sitúan en ese continente desde hace unos 8.000 años. En el siglo XV los portugueses lo encontraron en la costa occidental africana, en la región de Guinea, y lo llamaron guineo. Hacia 1516 el padre Tomás de Berlanga lo introdujo en la isla La Española, en el Caribe; probablemente lo llevó desde las islas Canarias, donde se cultiva desde 1450³.

El banano comestible resultó de una serie de mutaciones y cambios genéticos ocurridos a partir de especies silvestres de frutos pequeños y numerosas semillas. Las variedades comerciales de origen triploide *Gross Michel*

y Cavendish, originario de Burna, Tailandia, Malaya, Indonesia y Ceilán y el sudeste de Asia, respectivamente⁴.

Historia del cultivo en Colombia

Es probable que el banano fuera conocido por las tribus del Atrato desde 1535. Desde esa fecha, el banano llegó al río San Juan debido a la difusión realizada por las tribus chocoes, a través del Istmo de San Pablo de Urabá. Sin embargo, la entrada del banano al río San Juan también pudo presentarse por la vía de Buenaventura. Es probable que por esa vía también llegara a Cali. El célebre naturalista Humboldt puso en duda el origen europeo del banano en América, argumentando la posibilidad de que el banano se encontraba tanto en América como en Asia⁵.

Taxonomía y morfología

El banano pertenece al orden Zingiberales, familia Musáceas y género *Musa*. Son hierbas gigantes con pseudotallos aéreos que se originan de rizomas carnosos o colinos con múltiples yemas laterales. Los pedúnculos de las hojas se cubren en forma helicoidal formando los pseudotallos. Debido a que las variedades modernas de plátanos y bananos se caracterizan por su parte no carpia, su propagación es exclusivamente por medios vegetativos⁶.

Genética y variedades

Las especies más destacadas son: la *Musa acuminata* que ha dado origen a las variedades comerciales, *M. balbisiana* de interés científico por su contribución en la formación de bananos y plátanos y *M. acuminata* diploide como el Orito, y triploide como la *Acuminata AAA*, el genoma dominante *Acuminata AAB* y el genoma dominante *Balviciana ABB*⁷.

Requerimientos del cultivo

Por sus fines de exportación 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. Según Sierra⁸ los factores que se deben tener en cuenta para un óptimo cultivo son:

- **Localización geográfica.** Las condiciones climáticas para la producción se ubican entre una latitud de 30 grados norte y 30 grados sur del Ecuador, pero las condiciones óptimas se dan entre los 0 y 15 grados.

- **Altitud.** A medida que aumenta la altitud se prolonga el ciclo vegetativo del cultivo. Contando con buenas condiciones climatológicas en cuanto a precipitación, temperatura y suelos, las zonas comprendidas entre los 0 y 300 metros sobre el nivel del mar (m.s.n.m.) son adecuadas.
- **Precipitaciones y requerimientos de agua.** El promedio anual de lluvia que se considera adecuado es de 2286 mm (90 pulg.) siempre y cuando exista buena distribución cada año. Un nivel de precipitación de 150 a 180 mm por mes es suficiente para suplir los requerimientos de la planta. No obstante, la cantidad de agua requerida se fija entre 1.800 y 2.800 mm al año bien distribuidos; la planta produce bien en regiones en Colombia con 1500 mm de lluvia siempre y cuando no se presenten veranos prolongados.
- **Temperatura.** La temperatura media que es óptima para el cultivo es de 25°C. Temperaturas entre 25 y 30°C le favorecen. La humedad relativa apropiada se estima en un 50%.
- **Luminosidad.** Factores como la luminosidad que en Colombia, Ecuador y parte de Venezuela es similar durante todo el año y la radiación solar, que en definitiva define las zonas de cultivo, son herramientas muy ventajosas para el manejo del cultivo; de hecho, a mayor cantidad de horas despejadas habrá mayor heliofanía y, por ende, mejor producción. Se requieren 1.200 h/año, aproximadamente de 3 a 5 horas de sol brillante por día y una acumulación de 4.380 h/luz al año. La planta es muy eficiente capturadora de energía solar para sus procesos de fotosíntesis, razón por la que en las zonas de menor heliofanía o temporadas nubladas el tamaño de las hojas es mayor, situación que debilita los tejidos y los hace susceptibles de contraer enfermedades.
- **Suelos.** Los bananos del grupo Cavendish requieren suelos con buena textura, adecuada mezcla de arcilla, arena y materia orgánica y un perfil mayor a 1,20 m de profundidad, básicamente del tipo franco arenoso, franco arcilloso o franco limoso con menos del 40% de arcilla y en los cuales la capa freática esté más abajo del perfil típico. Debido a su condición de bulbo con partes aéreas largas y carnosas y raíces poco profundas, es altamente susceptible a pudriciones por encharcamiento, por lo que los suelos, a más de tener una buena retención de agua, deben ser porosos y permitir aireación. El pH ideal es de 6,5 pero puede tolerar rangos entre 5,5 y 7,5.

- **Nutrición.** El banano es una fruta de agradable sabor, altamente energético, rico en carbohidratos y contiene poca grasa. Ayuda a proveer vitaminas esenciales como la vitamina C, B1, B2 y B6. También contiene grandes cantidades de potasio y magnesio. Los niveles de sodio son bajos y pobre en proteínas y lípidos.
- **Cosecha.** Esta debe realizarse una vez calibrada la fruta, para determinar el estado fisiológico adecuado. Dicha calibración se realiza tomándole el diámetro del dedo medio de la última mano y se comprueba con la segunda mano. El diámetro dependerá fundamentalmente de la variedad⁹.
- **Manejo poscosecha.** Durante esta fase la fruta debe recibir un máximo cuidado para preservar su calidad; de allí que el manejo, transporte y almacenamiento estarán a cargo de un personal calificado en dichas labores.
- **Empacado.** Esta labor es determinante para lograr un producto final de excelente calidad, por lo que el personal debe estar suficientemente entrenado sobre la importancia de su labor en la calidad, tanto en la prevención de las lesiones al empacar como en la apariencia general de la fruta empacada¹⁰.
- **Transporte.** Al término de la colocación de las manos debe recogerse el plástico como una bolsa, se amarra con una liga gruesa y se coloca el nudo en un lugar donde no produzca compresión en la fruta al momento de cerrar la caja. No debe olvidarse el extraer la mayor cantidad de aire a la bolsa¹¹.

Normativa

El grado de desarrollo y el estado del banano debe permitir el transporte y manipulación de manera que llegue satisfactoriamente al lugar de destino.

De acuerdo con la “Norma NTC 1190,” Industria “Alimentaria – plátano”, dada por el ICONTEC en 1976 los bananos se clasifican por su tamaño en tres categorías: Extra, Primera y Segunda, en cada una de las cuales los frutos deben estar:

- Enteros, duros, con la forma característica de la variedad.
- Secos, limpios, sin manchas ni grietas.
- Sin rayas profundas, ni ataques de plagas o enfermedades.

- Sin principios de pudrición, magulladuras, heridas no cicatrizadas o cuellos.
- El plátano se puede comercializar verde, pintón o maduro, en manos, dedos o racimos.

Daños mecánicos

Los daños mecánicos son uno de los principales factores que conducen al deterioro poscosecha de los bananos y pueden ocurrir en cualquier momento desde el punto de la cosecha hasta el punto de consumo¹². Los daños mecánicos pueden restar valor a la apariencia del producto y crear el potencial para la penetración de infecciones. También pueden resultar en una baja calidad para el mercado y precios más bajos. Existen tres principales fuentes de daño mecánico que afectan a los bananos y son las siguientes:

1. **Impacto.** Los daños por impacto pueden resultar en magulladuras con o sin rotura de la cáscara. Las magulladuras por impacto son causadas por un golpe fuerte como por ejemplo, el de un objeto que cae sobre la fruta, el de la fruta que cae contra otra fruta en una superficie dura con fuerza suficiente para dañar las células. El daño por impacto puede ocurrir a través de todo el proceso de comercialización desde la cosecha hasta la llegada al consumidor. Algunas veces los daños no son visibles pero pueden presentarse más tarde.
2. **Presión o compresión.** Los daños por compresión resultan de la presión excesiva sobre la fruta. No hay necesidad de movimiento físico para que ocurra el daño por presión. El daño por presión puede ser causado por otras frutas y ocurre primariamente durante y después del empaque como resultado de forzar la entrada de demasiados productos en un contenedor muy pequeño (es decir, sobre empacado, o cuando los empaques se apilan muy alto, uno arriba de otro).
3. **Vibración.** El daño por vibración es principalmente asociado con el transporte y resulta de la vibración repetida y prolongada de la fruta. Este daño es mayor en las capas superiores de la fruta, particularmente, cuando el empaque es poco compacto, ya que en esta situación nada impide que la fruta vibre durante el transporte y distribución. El daño por vibración es particularmente severo cuando el empaque de las frutas es muy suelto.

Factores que pueden ser causa de daños mecánicos

Los factores que pueden ser causa son los siguientes:

- **Factores precosecha.** Entre los factores precosecha que pueden ser causa de daños mecánicos en los bananos, se encuentran: clima, viento, aspersión y aplicación de fertilizantes, plagas e insectos, pájaros, roedores e implementos de cultivo.
- **Factores de cosecha.** Durante el proceso de la cosecha, el daño mecánico podría resultar de las pobres técnicas de cosecha y manipulación. La tierra que se adhiere a las frutas (cuando se permite su caída durante la cosecha) también puede causar daños como rayar las frutas al remover la tierra o lavarla.
- **Factores poscosecha.** Los factores poscosecha que pueden causar daño mecánico son: alta o baja densidad en el empaque de las frutas; empaque o manipulación pobre de las frutas empacadas durante la carga y descarga; vibración (sacudidas) de los vehículos especialmente en malas carreteras y velocidad de transporte.

Efectos de los daños mecánicos

Cambios físicos del color y sabor de la fruta; ablandamiento del tejido de la fruta que resulta del colapso de las paredes celulares individuales. Las frutas dañadas se maduran generalmente más temprano que las frutas sin daño. Esto sucede debido a un aumento en la tasa de respiración asociada con el daño mecánico, así como con un aumento en la producción de etileno que apresura la maduración.

Firmeza

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, la compresión, la 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 deformación¹³. Es una importante característica de calidad poscosecha durante la cosecha. La misma podría ser utilizada como un índice de madurez/maduración. También podría facilitar la comparación de la tasa de ablandamiento del banano¹⁴.

La firmeza de los bananos es una característica compuesta, que es el resultado de una combinación de varios factores, como los componentes estructurales de los tejidos y células¹⁵. Cualquier procedimiento individual de evaluación física sólo puede suministrar una indicación limitada de estas propiedades de la textura. La indicación de la firmeza se obtiene mediante la fuerza necesaria ejercida para causar la penetración de una sonda a una profundidad específica dentro del producto; es necesario registrar el diámetro de la sonda.

Cambios en la firmeza del producto

Bajo condiciones normales de almacenamiento los bananos sufren transformaciones de textura a medida que pasa el proceso de maduración. La fruta crujiente, dura y verde se convierte en una fruta amarilla con la pulpa interna tierna y suave en la etapa óptima de madurez, y se torna blanda a medida que avanza hacia la senescencia. La pérdida de firmeza durante la maduración lleva a una calidad más baja y a una mayor incidencia de daños mecánicos durante la manipulación y transporte. La pérdida de firmeza de la pulpa durante la maduración varía de acuerdo con el cultivo y tipo de banano. La firmeza a menudo está relacionada con la maduración; ello implica que al progresar la maduración, la firmeza de la pulpa disminuye¹⁶.

La pérdida de la firmeza o ablandamiento durante la maduración ha sido asociada con tres procesos. El primero es la degradación del almidón para formar azúcar. El segundo proceso es la degradación de las paredes celulares o reducción en la cohesión de la lamella media, debido a la solubilización de las sustancias pécticas. El tercero es el movimiento de agua desde la cáscara a la pulpa debido al proceso de ósmosis¹⁷.

Viscoelasticidad

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^{18,19}.

Materiales anisotrópicos

Los materiales biológicos, incluyendo los alimentos, son altamente caracterizados por su anisotropía, es decir, que ciertas propiedades físicas y

mecánicas no son las mismas en todas las direcciones que pasan por un punto determinado, sino que varían en función de la dirección (longitudinal, radial y tangencial), en la que se aplique el esfuerzo²⁰.

Módulo de elasticidad

Todos los sólidos (acero, vidrios, rocas) exhiben algunas características propias de los líquidos, menos uno, el sólido ideal que, por definición, carece de estas propiedades. De igual modo, existe un líquido que también, por definición, carece de cualquier propiedad característica de los sólidos. Al sólido ideal se le llama sólido de Hooke, y al líquido ideal se le conoce como el líquido de Newton. Estos dos materiales ideales constituyen auténticos límites de comportamiento reológico. Ambos carecen de estructura (no tienen átomos), son isotrópicos, es decir, exhiben idénticas propiedades en todas las direcciones²¹. El sólido de Hooke es el sólido teórico en el que la deformación que experimenta es directamente proporcional al esfuerzo aplicado es decir:

$$\sigma = E\varepsilon \quad (1)$$

donde E (N/m^2) es la constante de proporcionalidad, ε es la deformación (relación entre el cambio de longitud y la longitud original, es adimensional) y σ es el esfuerzo (relación entre la fuerza aplicada y el área transversal del material, N/m^2). A la constante E de la ley de Hooke se le conoce como módulo de Young²² y su expresión matemática es

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon} \quad (2)$$

El valor del módulo de Young “ E ” 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. Debido a que los alimentos son materiales anisotrópicos, el módulo aparente es diferente tanto para pruebas de compresión y flexión.

Fractura

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 mecánico²³. 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, siendo un daño mecánico ocasionado por una fuerza externa que puede ocasionar cambios de sabor, alteración química del color sin romper la superficie del producto²⁴.

La fractura ocasionada por compresión unidireccional es un proceso continuo que comprende dos etapas: una fractura interna en la que el producto permanece intacto y la segunda etapa es la fractura neta, donde existe una desintegración física del producto²⁵.

En teoría, en un sólido elástico, la carga se reparte homogéneamente entre los enlaces interatómicos y cuando sobrepasa ciertos límites se rompen todos. En la realidad, sin embargo, la carga no se distribuye de un modo tan homogéneo y los enlaces se van rompiendo sucesivamente. De otra parte, en el producto existen pequeñas fisuras que afectan la resistencia a la fractura, por lo que los valores de resistencia a la fractura, límite de ruptura, calculados sobre la base de las fuerzas interatómicas son siempre mucho más altos que los determinados experimentalmente²⁶.

Sólidos solubles totales (grados Brix)

Las frutas, incluyendo los bananos, contienen muchos compuestos solubles en agua, como por ejemplo, azúcares, ácidos, vitamina C, aminoácidos y algunas pectinas. Estos compuestos solubles forman el contenido de los sólidos solubles de la fruta. En la mayoría de las frutas maduras, incluyendo el banano, los azúcares representan el principal componente de los sólidos solubles. Los sólidos solubles totales (SST) son una importante característica de la calidad poscosecha en la selección de bananos, ya que la cantidad de SST o azúcar en las frutas aumenta a medida que éstas maduran. El contenido de sólidos solubles en la fruta puede representar un índice o estado de madurez útil²⁷.

Cambios del contenido de sólidos solubles totales

Durante la maduración de los bananos, el contenido de SST aumenta²⁸. Sin embargo, la magnitud del aumento depende del cultivo y tipo de

banano. El contenido de sólidos solubles varía entre los cultivares y entre los grados de madurez. Por ejemplo, en algunos bananos, el contenido de sólidos solubles aumenta hasta un pico y luego disminuye (la caída en sólidos solubles totales puede ser debida a la conversión del azúcar de la pulpa en alcohol). En otros bananos los sólidos solubles totales continúan su aumento con la maduración.

Acidez titular y pH

Los valores de pH brindan la medida de la acidez o alcalinidad de un producto, mientras que la acidez titular brinda una medida de la cantidad de ácido presente.

La evaluación del pH y la acidez titular de los bananos se utiliza primariamente para estimar la calidad para el consumo y características ocultas. Los mismos pueden ser considerados como indicadores de madurez de la fruta. Los ácidos contribuyen grandemente a la calidad poscosecha de la fruta, ya que el sabor es principalmente un balance entre los contenidos de azúcar y de acidez, por lo tanto, la estimación poscosecha de acidez es importante en la evaluación del sabor de la fruta²⁹.

Cambios del pH y de la acidez titular de la pulpa

En la mayoría de los bananos existe una rápida disminución del pH de la pulpa en respuesta del aumento de la madurez. Sin embargo, la magnitud de la disminución depende del cultivo³⁰. Generalmente, cuando las frutas se cosechan con el grado de madurez verde maduro el pH de la pulpa es alto, pero al progresar la maduración, el pH cae. De este modo, el pH de la pulpa podría ser utilizado como un índice de maduración.

Usualmente, los ácidos orgánicos disminuyen durante la maduración debido a la respiración o su conversión en azúcar³¹. Los ácidos orgánicos son importantes por suministrar un balance azúcar/ácido deseable, que da como resultado un sabor y aroma agradables a la fruta durante la maduración. La acidez medida como acidez titular en los tejidos de la pulpa de la mayoría de los bananos muestra grandes aumentos durante la maduración o a medida que la maduración progresa. Por lo tanto, la acidez titular total podría ser utilizada como un índice de maduración³².

Materiales y métodos

Materia prima

El material vegetal fue adquirido en la Central Mayorista. El producto proviene de la Empresa Chiquita, la cual tiene su principal centro de operaciones en el Urabá y Magdalena; en estas zonas la temperatura es de $27\pm4^{\circ}\text{C}$ aproximadamente y con una precipitación anual de 78-98 pulgadas. Los bananos obtenidos se clasifican en calidad (primera) de acuerdo con la norma NTC 1190 y con el mismo grado de maduración, empacados en cajas de cartón de 40 libras y con una longitud mínima del banano de 20 cm.

Diariamente fue seleccionada aleatoriamente una muestra de 10 bananos por prueba (50 unidades) durante 12 días.

Caracterización de la acidez titular y pH

El valor del pH del jugo de pulpa de banano fue medido con un pHmetro digital manual, introduciendo el electrodo en la muestra. El valor se obtiene directamente. Antes de realizar cada medición se calibró el pHmetro.

La acidez titular de la mezcla se determinó mediante un análisis volumétrico con hidróxido de sodio 0.1 N. Primero se pesaron 5 g de pulpa y se mezclaron con agua destilada. Se agregaron unas gotas de indicador de fenolftaleína, se tituló hasta obtener un color rosado/rojo y se registró el volumen titulado de NaOH añadido. Por último, los resultados se expresaron en términos del ácido predominante presente en el banano (ácido málico).

Caracterización mecánica

Las pruebas se realizaron con el texturómetro TA-XT2i, Stable Micro Systems empleando el software Texture Expert Exceed, versión 1.00.

Prueba de firmeza

Inicialmente se midió la curvatura exterior del dedo individual (banano) con una cinta métrica desde el extremo distal hasta el extremo proximal, donde se considera que termina la pulpa, el valor fue de $23,3\pm1,13$ cm. Luego se marcaron los puntos al 25, 50 y 75% de la longitud obtenida (Los diámetros externos a 25, 50 y 75% de la longitud de curvatura fueron $3,4\pm0,20$ cm $3,6\pm0,23$ cm y $3,4\pm0,19$ cm, respectivamente), y en estos se aplicó la fuerza de punción al banano con cáscara con un eje cilíndrico de 2mm de diámetro hasta causar una penetración de 20 mm (Figura 1).

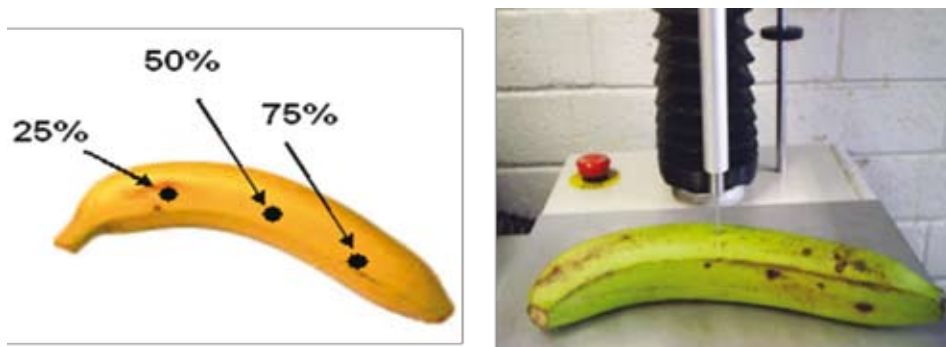


Figura 1. Medida del largo exterior (25, 50 y 75%) y prueba de firmeza con eje cilíndrico de 2mm de diámetro.

Los parámetros de operación del texturómetro TA-XT2i para la prueba de firmeza fueron: velocidad de pre-ensayo 10 mm/s, velocidad de ensayo 2 mm/s, velocidad de pos-ensayo 10 mm/s y distancia de penetración 20 mm.

Por medio de la gráfica Fuerza-Deformación proveniente del software Texture Expert Exceed, versión 1.00, se obtuvo la fuerza máxima en Newtons que necesita la sonda para penetrar la cáscara del banano, y la fuerza media que corresponde a la fuerza que necesita el dispositivo para penetrar posteriormente la pulpa (Ver figura 2).

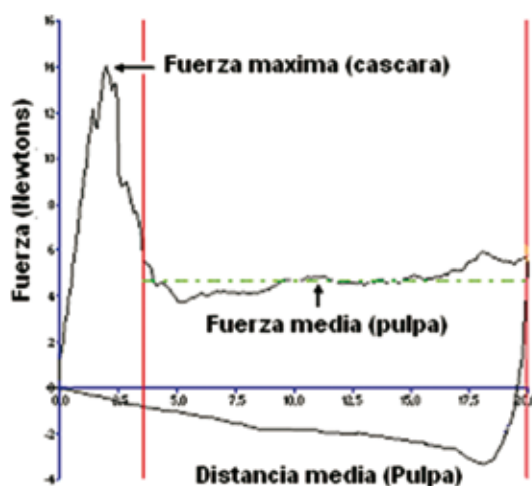


Figura 2. Curva típica Fuerza-Deformación suministrada por el software Texture Expert Exceed, versión 1.00 para la prueba de firmeza.

Módulo de Young o elasticidad

Teniendo presente que la pulpa de banano es un material biológico (productos de ingeniería de altos contenidos de agua y caracterización celular), se determinó el módulo de Young o elasticidad, el cual define la resistencia mecánica del material en ensayos de flexión y compresión. Para cada uno de los métodos de carga se aplicaron los principios básicos de materiales que definen la respuesta mecánica del producto:

Módulo elástico a compresión

Para los ensayos a compresión se tomaron probetas cilíndricas de pulpa con un sacabocados de 2 cm de diámetro y 4 cm de longitud, los cuales fueron sometidos a pruebas de compresión uniaxial mediante un plato de compresión de 100 mm de diámetro hasta su fractura. Los parámetros de operación de la prueba fueron: velocidad de pre-ensayo 10 mm/s, velocidad de ensayo 2 mm/s, velocidad de pos-ensayo 10 mm/s y distancia de penetración 20 mm. Además de los parámetros anteriores se determinó el área transversal (314 mm²) y la altura inicial de la probeta (40 mm).

El esfuerzo aplicado de ingeniería se obtuvo a través de la expresión (3):

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

La deformación relativa o unitaria alcanzada (ε) se determinó como:

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L_0} \quad (4)$$

Donde:

ΔL = cambio de longitud (m)

L_0 = Longitud inicial (m)

Debido a las complejidades en la estructura y morfología de los materiales biológicos, no siempre existe una relación lineal entre esfuerzo y deformación, por lo tanto, se dividió la gráfica suministrada por el software Texture Expert Exceed Versión 1.0, en cuatro zonas como se muestra en la figura 3, las cuales corresponden aproximadamente al 17, 34, 50 y 100% de la deformación total sufrida por la probeta hasta su fractura, y se obtuvo el valor del módulo de elasticidad o módulo de Young por medio de la pendiente en cada zona.

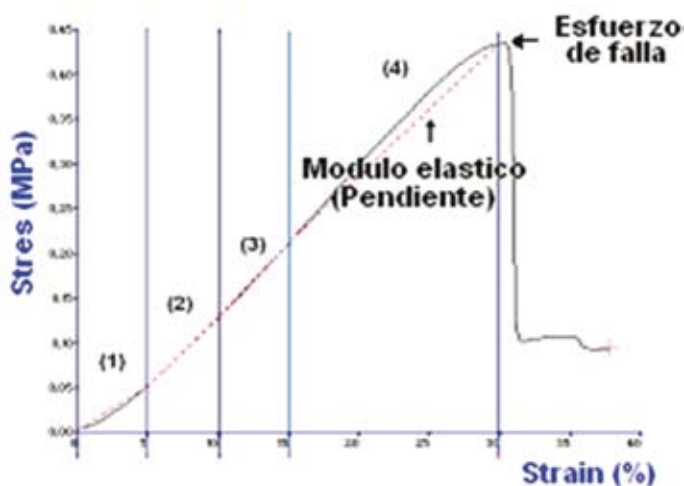


Figura 3. Curva típica Esfuerzo-Deformación unitaria suministrada por el software Texture Expert Exceed, versión 1.00 para la prueba de Módulo elástico a compresión

Módulo elástico a flexión

Para los ensayos a flexión se tomaron muestras cilíndricas de la pulpa mediante un sacabocados de 1 cm de diámetro y 6 cm de longitud. En este ensayo la pulpa se suspende transversalmente sobre dos varillas cilíndricas paralelas separadas por una distancia fija de 4 cm, como se muestra en la figura 4. Una tercera varilla paralela a las dos primeras de 1 cm de diámetro y 6 cm de longitud se fija al texturómetro y se hace descender sobre la probeta hasta su fractura. La carga fue impuesta en el punto medio entre los soportes, midiendo su deformación para cada carga aplicada en cada instante.

Los parámetros de operación de la prueba fueron: velocidad de pre-ensayo 10 mm/s, velocidad de ensayo 0.1 mm/s, velocidad de pos-ensayo 10 mm/s y distancia de penetración 20 mm. Con los valores de la carga y deflexión (deformación) del punto medio suministrada por el software-Texture Expert Exceed Versión 1.0, y aplicando la teoría de vigas circulares (figura 4) se determinó el módulo de elasticidad del producto a flexión.

$$E = \frac{4FL^3}{3\pi D^4 d} \quad (5)$$

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)

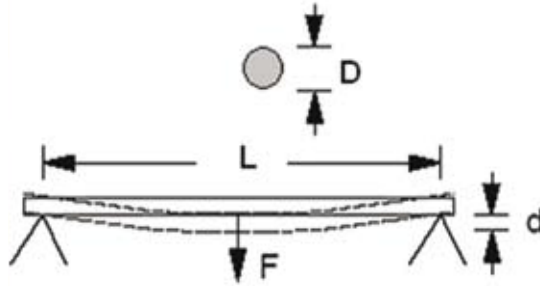


Figura 4. Prueba módulo elástico a flexión y Vista esquemática del ensayo de flexión.

Prueba de fractura

En esta fase de la investigación fueron determinadas las fuerzas de fractura del banano tanto a compresión como a flexión, y el esfuerzo de falla.

Los parámetros de operación de las pruebas fueron: velocidad de pre-ensayo 10 mm/s, velocidad de ensayo 2 mm/s, velocidad de pos-ensayo 10 mm/s y distancia de 100 mm. La figura 5 muestra una gráfica general de Fuerza-Deformación para las pruebas de compresión y flexión del material vegetal proveniente del software Texture Expert Exceed, versión 1.00

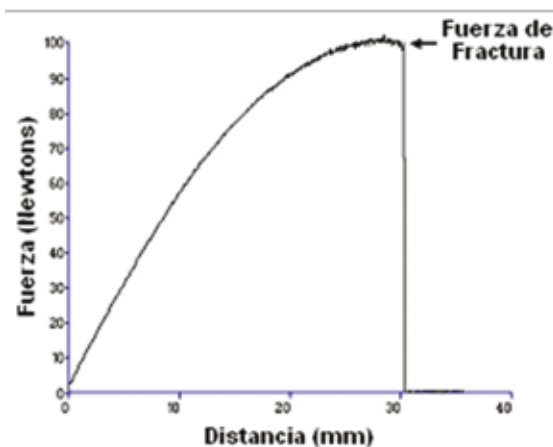


Figura 5. Curva típica presentada por el software Texture Expert Exceed, versión 1.00 para la prueba de fractura

Fuerza de fractura a compresión y a flexión del material vegetal

Usando el texturómetro TA-XT2i, los bananos seleccionados fueron sometidos a pruebas de compresión unidireccional (longitudinal) mediante un plato de compresión de 100 mm de diámetro, y a pruebas de flexión con un soporte de fractura en tres puntos con una distancia fija de 15 cm entre los soportes, donde se apoyó el banano en posición horizontal, y una sonda de 1,5 cm de diámetro y 7 cm de longitud (ver figura 6). La prueba de compresión y flexión se aplicó hasta su primera ruptura.

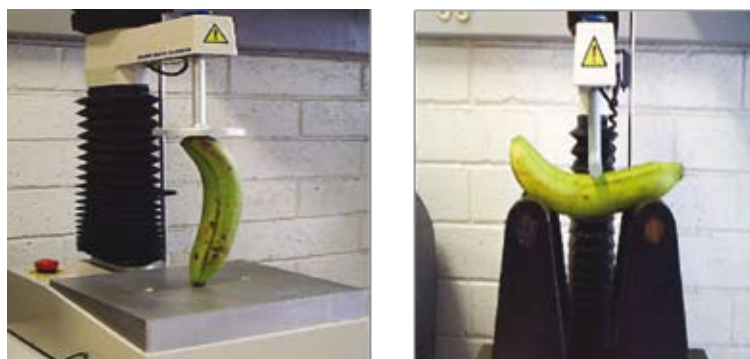


Figura 6. Prueba de fractura a compresión y a flexión del material vegetal.

Debido a que el banano es un material biológico, de la gráfica Fuerza-Deformación suministrada por el software Texture Expert Exceed Versión 1.0 se registra el valor de la fuerza de fractura macroscópica (Ver figura 5).

Caracterización físico-química

Para la caracterización físico-química del producto se seleccionaron aleatoriamente 5 elementos de cada prueba y en cada uno de éstos se determinaron el pH, Grados Brix y acidez titular³³.

Sólidos solubles totales (Grados Brix)

Para la determinación de los grados Brix ($^{\circ}\text{Bx}$), se tomaron 30 gramos del tejido de la pulpa de cada producto seleccionado, se licuaron con 90 gramos de agua destilada durante dos minutos. Se colocaron 3 gotas de la mezcla en el prisma del refractómetro. El valor registrado se multiplicó por 4 (debido a que se toman 4 partes).

Acidez titular y pH

El valor del pH del jugo de pulpa de banano fue medido con un pHmetro digital manual, introduciendo el electrodo en la muestra. El valor se obtiene directamente. Antes de realizar cada medición se calibró el pHmetro.

La acidez titular de la mezcla se determinó mediante un análisis volumétrico con hidróxido de sodio 0.1 N. Primero se pesaron 5 g de pulpa y se mezclaron con agua destilada. Se agregaron unas gotas de indicador de fenolftaleína, se tituló hasta obtener un color rosado/rojo y se registró el volumen titulado de NaOH añadido. Por último, los resultados se expresaron en términos del ácido predominante presente en el banano (ácido málico).

Análisis de datos

Los resultados fueron analizados a partir de análisis de varianza ANOVA, utilizando el método Duncan como método de comparaciones múltiples, con un nivel de confianza del 95% ($\alpha=0,05$). El análisis de varianza fue realizado con el paquete estadístico Statgraphics Plus versión 15.

Análisis y resultados

Caracterización mecánica

Firmeza en el material vegetal

El análisis de varianza con un nivel de significancia del 5% mostró que los factores tiempo poscosecha y puntos de penetración (25, 50 y 75% de la longitud total de cada banano) resultaron significativos ($p<0,05$) pero la interacción (puntos de penetración-Día) no fue significativa ($p>0,05$). Esto quiere decir que la firmeza en la cáscara de los frutos fue afectada por el tiempo poscosecha y los puntos donde penetró la sonda.

En la figura 7 se observa una disminución progresiva en la firmeza de la cáscara durante el período de almacenamiento de los frutos de 12 días, lo que concuerda con lo presentado por Gómez, et al³⁴ y Boudhrioua, et al³⁵, quienes afirman que durante la maduración, el fruto modifica su firmeza de manera progresiva.

Firmeza en la pulpa

El modelo de análisis de varianza para la variable respuesta fuerza de firmeza (Newtons) en la pulpa, utilizando tiempo poscosecha (Días) como factor fijo, resultó significativo ($p<0,05$). El análisis de varianza al 5% mos-

tró que el día es significativo ($p < 0,05$); esto quiere decir que el tiempo poscosecha afecta la firmeza de la pulpa del fruto.

La disminución en el valor de fuerza de firmeza se debe a la degradación de almidones para formar azúcares, a la ruptura de células y solubilidad de sustancias pépticas. La diferencia de los datos muestra que existe una heterogeneidad del producto en sí y en conjunto.

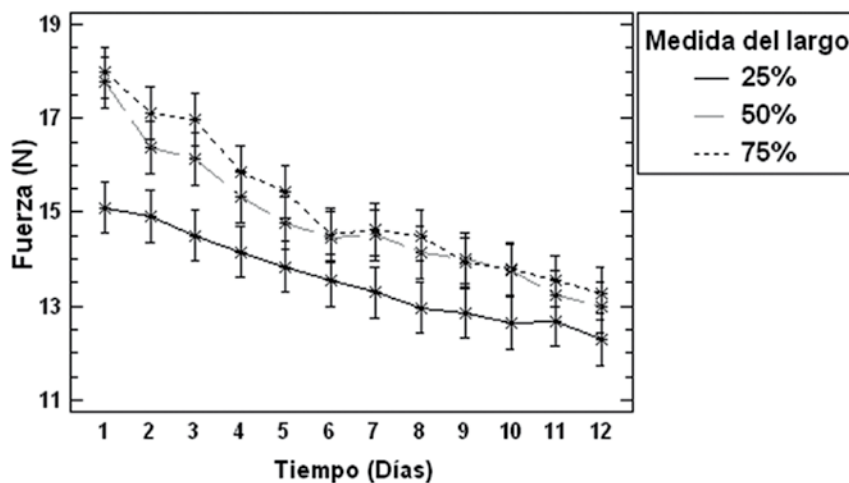


Figura 7. Firmeza promedio de la cáscara vs tiempo.

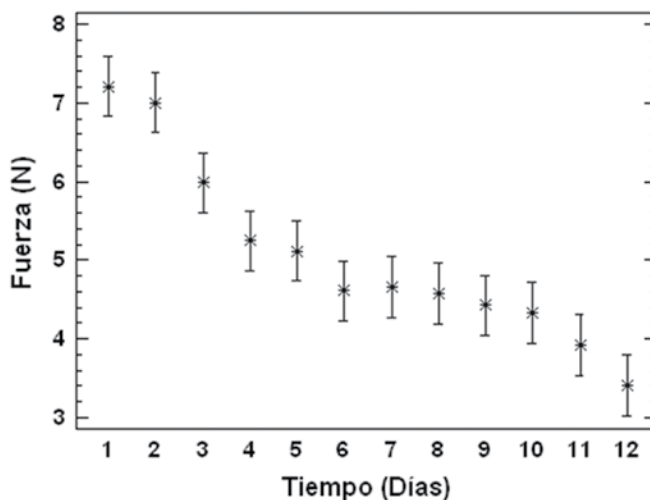


Figura 8. Firmeza promedio de la pulpa vs tiempo.

Módulo elástico a compresión

El modelo de análisis de varianza para la variable respuesta módulo elástico a compresión, utilizando tiempo poscosecha (días) y zonas (17, 34, 50 y 100% de la deformación total sufrida por la probeta hasta su fractura) como factores fijos, resultó significativo ($p < 0,05$).

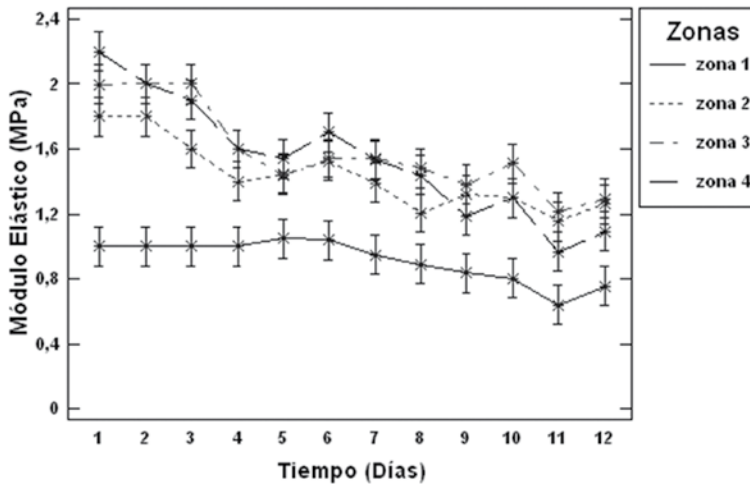


Figura 9. Modulo elástico medio a compresión a través del tiempo.

Módulo elástico a flexión

Las medias del factor (tiempo poscosecha) difieren, es decir, los días afectan significativamente el valor del módulo elástico a flexión ($p < 0,05$).

Los valores correspondientes a la variable respuesta módulo elástico a flexión van disminuyendo a medida que transcurre el tiempo poscosecha (ver figura 10).

Fractura del material vegetal

El análisis estadístico mostró que las medias de los niveles día y posición (compresión y flexión) difieren, es decir, los días y la posición afectan significativamente la resistencia del banano ($p < 0,05$). Situación contraria ocurre con la interacción de los factores posición*día, la cual no afectan significativamente ($p > 0,05$).

Los valores correspondientes a la variable respuesta fuerza de fractura disminuyen a medida que transcurre el tiempo poscosecha (figura 11). A

partir del noveno día, la fuerza necesaria para fracturar el vegetal es aproximadamente la misma tanto a ensayos de compresión como a flexión, lo que indica que el banano resiste igual, independiente de la posición en que se encuentre cuando está alcanzando la madurez.

En los ensayos de compresión y flexión se observó una disminución de la fuerza de fractura al transcurrir el tiempo poscosecha; esto es debido a que en los productos biológicos la respuesta mecánica es altamente dependiente del tiempo.

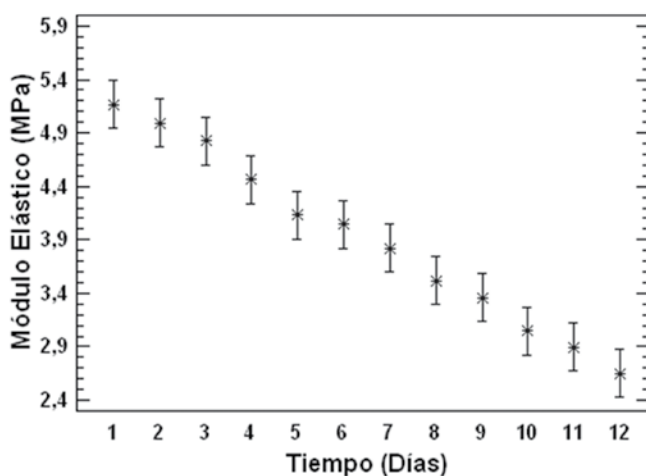


Figura 10. Módulo elástico medio a flexión a través del tiempo

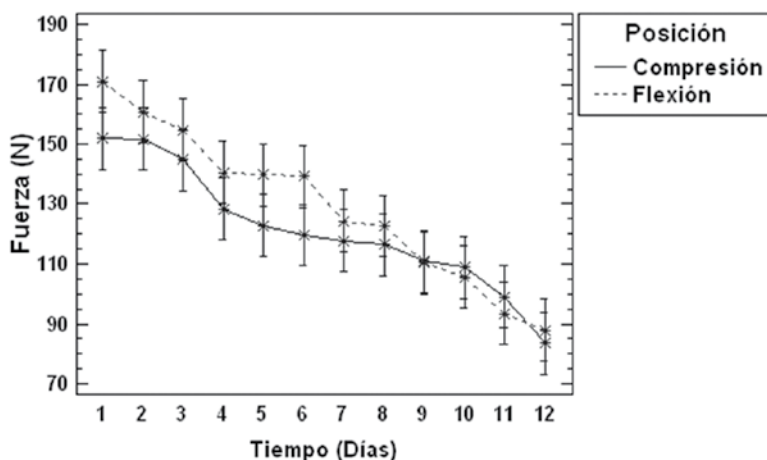


Figura 11. Fuerza de fractura media (flexión y compresión) a través del tiempo

Esfuerzo de falla

El análisis estadístico mostró que las medias de los niveles día, posición (compresión y flexión) y la interacción entre los factores (posición-día) difieren, es decir, los días, la posición y la interacción afectan significativamente el valor del esfuerzo de falla ($p < 0,05$).

Los valores correspondientes a la variable respuesta esfuerzo de falla van disminuyendo a medida que pasa el tiempo poscosecha (figura 12). El esfuerzo de la pulpa del banano es mayor a flexión que a compresión.

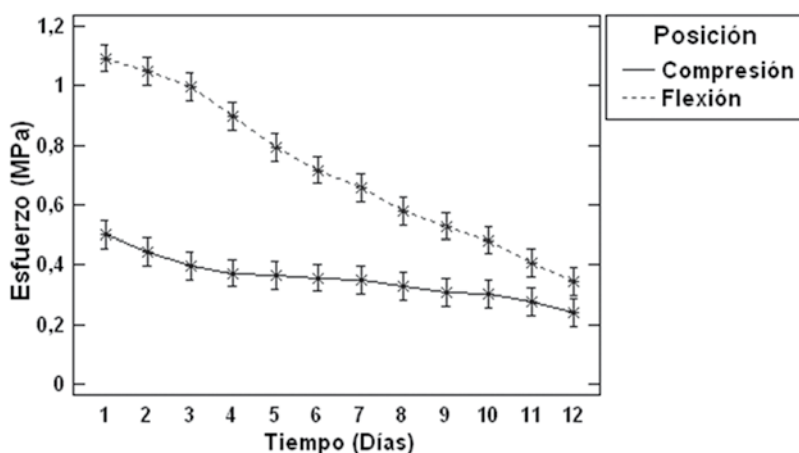


Figura 12. Esfuerzo medio de falla (compresión y flexión) en el tiempo.

De acuerdo con la anterior e independientemente de los análisis estadísticos se encontró que el producto se comporta anisotrópicamente, es decir, ciertas propiedades físicas no son las mismas en todas las direcciones.

Caracterización físico-química

Sólidos solubles totales (Grados Brix)

El análisis de varianza con un nivel de significancia del 5% mostró que las medias de los tratamientos son diferentes, es decir, los días afectan significativamente el valor del contenido de sólidos solubles totales (SST) ($p < 0,05$).

La figura 13 muestra que a medida que se incrementa el tiempo poscosecha, aumenta la cantidad de (SST) del producto, lo que coincide con lo reportado por Fernández, et al³⁶.

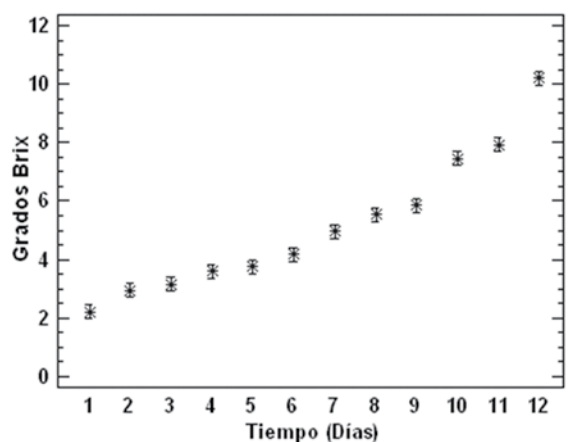


Figura 13. Sólidos Solubles Totales medios a través del tiempo.

Acidez titular

El análisis estadístico mostró que las medias de los tratamientos difieren, es decir, los días afectan significativamente el valor de la acidez ($p < 0,05$). Lo que indica que cuando aumenta el tiempo poscosecha el contenido de ácido málico cambia durante el proceso de maduración del fruto.

A medida que se incrementa el tiempo poscosecha, aumenta la acidez del producto lo cual coincide con lo reportado por Fernández, et al³⁷. (Ver figura 14).

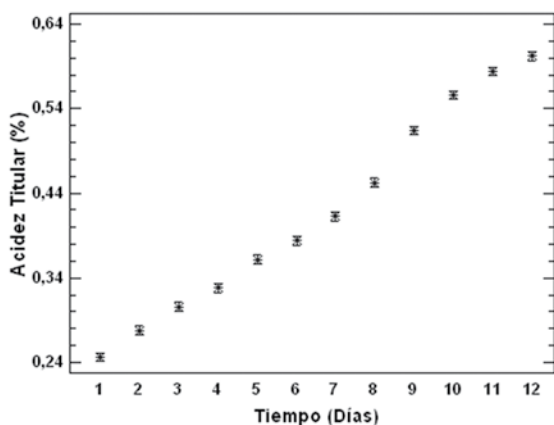


Figura 14. Acidez titular a través del tiempo.

pH

El análisis estadístico muestra que las medias de los tratamientos difieren, es decir, los días afectan significativamente el valor del pH ($p < 0,05$). Ello indica que a medida que transcurre la maduración del fruto, el pH cambia.

Los resultados muestran que a medida que se incrementa el tiempo poscosecha, disminuye el pH, como se observa en la figura 15, lo que concuerda con lo reportado por Cardeñoso³⁸.

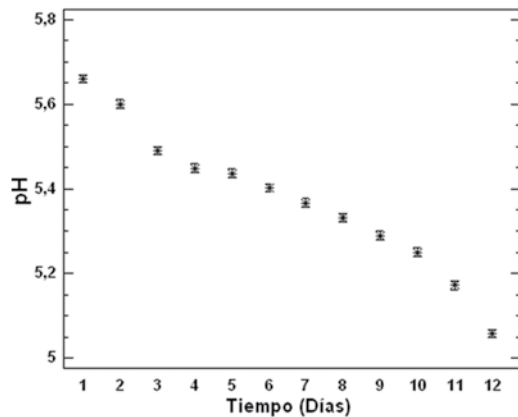


Figura 15. pH a través del tiempo.

Conclusiones

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.

La prueba 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.

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 está sujeto al racimo), debido a que la maduración comienza en este extremo.

La respuesta mecánica del fruto es afectada por la maduración. Se encuentra que a menor tiempo poscosecha mayor resistencia.

La composición físico-química de los frutos varía durante el período poscosecha, y presenta un aumento en el contenido de grados Brix y acidez titular al tiempo que una disminución en el pH.

Los resultados mostraron una disminución en la firmeza, fuerza de fractura y módulo elástico durante la maduración, lo que constituye el ablandamiento del fruto; esta pérdida de rigidez es uno de los cambios más evidentes durante el proceso de maduración propia de materiales viscoelásticos.

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

Bibliografía

1. COLOMBIA. AUGURA. Actividad Bananera de Urabá. Folleto divulgativo. Medellín, Colombia: Editorial Colina, 1990. 24 p.
2. SIERRA, Luis Eduardo. El Cultivo del Banano: Producción y Comercio. Medellín, Colombia. Editorial Graficas Olímpicas, 1993. 680 p.
3. SIMMONDS, Norman Willison. Los Plátanos., Ed. Blume. Barcelona, España: Blume, 1973. 539 p. Colección Agricultura Tropical.
4. SIERRA, Luis Eduardo., Op. Cit., 680 p.
5. GÓMEZ, G.; JURADO, Y. y ARCILA, M. Comportamiento físico, químico y organoléptico de frutos de plátano dominico-hartón sometidos a diferentes sistemas de almacenamiento y tipos de empaques en el Quindío. *En*: Décima reunión internacional acorbat sesión cartel cosecha y poscosecha. 2002. p. 517-522.
6. SOTO BALLESTERO, Moises. Banano Cultivo y Comercialización. San José, Costa Rica: Litografía e Imprenta Lil, 1985. 648 p.
7. SIERRA, Luis Eduardo., Op. cit., 680 p.
8. *Ibíd.*
9. COLOMBIA. AUGURA., Op. cit., 24 p.
10. SIERRA, Luis Eduardo., Op. cit. 680 p.
11. *Ibíd.*
12. DADZIE, B. K. y ORCHARD, J. E. Evaluación Rutinaria Postcosecha de Híbridos de Bananos y Plátanos: Criterios y métodos. INIBAP, Francia. 1997. 63 p.
13. BUITRAGO, Germán; *et al.* Determinación de las características físicas y propiedades mecánicas de papa cultivada en Colombia. *En*: Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental. 2004. Vol.8, No. 1. p. 102-110.

14. KRAMER, A. Definition of Texture and Its Measurement in Vegetable Products. En: Food Technology. May 1964. Vol. 18. p. 46-49.
15. DADZIE, Op. cit., 63 p.
16. SMITH, N. J. S.; *et al.* Softening and Cell Wall Changes in Bananas and Plantains. En: Aspects of Applied Biology. 1989. Vol.20. p. 57-65.
17. PALMER, J. K. The Banana. En: The Biochemistry of fruits and their products. En: Academic Press, London. 1971. Vol. 2, p. 65-105.
18. STROSHINE, Richard. Physical Properties of Agricultural Materials and Food Products. West Lafayette: Department of Agricultural and Biological Engineering, 1999. p. 113-152.
19. MOHSENIN, Nury N. Physical Properties of Plant and Animal Materials: Structure, Physical, Characteristics and Mechanical Properties. New York: Gordon and Breach Science, 1986. 664 p.
20. Ibid.
21. MULLER, H. G. Introducción a la reología de alimentos. Zaragoza, España: Editorial Acribia, 1973. p. 13-17, 22-34, 133-144.
22. PYTEL, Andrew y SINGER, Ferdinand. Resistencia de materiales. México: Editorial Oxford, 1994. p. 31, 32.
23. STROSHINE, Op. cit., p. 113-152.
24. MOHSENIN, Op. cit., 664 p.
25. POLLAK, N. and PELEG, M. Early Indications of failure in large compressive deformation of solid foods. En: Journal of Food Science. July 1980. Vol. 45, no. 4. p. 825-830
26. MULLER, Op. cit., p. 22-34
27. DADZIE, Op. cit., 63 p.
28. Ibid., 63 p.
29. Ibid., 63 p.
30. Ibid., 63 p.
31. WILLS, Ron; *et al.* Postharvest: An introduction to the physiology and handling of fruit and vegetables. 3rd edition. Oxford, UK: Blackwell Scientific Publications, 1989. 176 p.
32. DADZIE, Op. cit., 63 p.
33. AOAC (Association of Official Agricultural Chemists). Official Methods of Analysis. Washington, D.C.: AOAC, 1990.

34. GÓMEZ, Op. cit., p. 517-522.
35. BOUDHRIOUA, N.; *et al.* Influence of ripeness and air temperature on changes in banana texture during drying. En: Journal of Food Engineering. November 2002. Vol. 55, no. 2. p. 115-121.
36. FERNÁNDEZ, K. M.; CARVALO de V.D. and CALVIDAL, J. A. Research Note Physical changes during ripening of silver bananas. En: Journal of food science. 1979. Vol. 44. p. 1254, 1255.
37. *Ibíd.*, p. 1254, 1255.
38. CARDEÑOSA BARRIGA, Ricardo. El genero Musa en Colombia, plátanos y bananas afines. Palmira : Minagricultura, 1954. 367 p.

