



Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo

Facultad de Ciencias Físico-Matemáticas
“Mat. Luis Manuel Rivera Gutiérrez”

*Caracterización de la Firmeza de Frutos Mediante la
Técnica de Impacto Acústico*

Tesis Profesional

Que para obtener el título de
Licenciado en Ciencias Físico-Matemáticas

Presenta
Esmeralda Pérez López

Asesor de Tesis:
M. C. Gabriel Arroyo Correa

Co-asesor de tesis:
Dr. Jorge Isidro Aranda Sánchez

Morelia, Michoacán, Diciembre 2009.

Caracterización de la Firmeza de Frutos Mediante la Técnica de Impacto Acústico

Esmeralda Pérez López

Facultad de Ciencias Físico-Matemáticas
Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo.

Agradecimientos

A mis hermanos Abel, Ariel, Eduardo, Netzahualcoyotl, Felipe de Jesús, Omar Julio y hermanas Liliana y Tatiana, pero sobre todo a mis padres a los cuales admiro mucho a mi madre Rosalilia y mi padre Gildardo que con mucho cariño, sacrificio y paciencia han hecho posible un gran apoyo para que yo haya culminado mi tesis.

A mis amigos, Adalberto Gutiérrez, Ana Isabel Guzmán, Cristóbal Patiño, José Juan Gervacio, Alejandro Vidal, María Claudia Guillén, Miguel Ángel Luna.

A mi novio Raymundo Cortés Sánchez.

Principalmente quiero agradecer a mis asesores: el M.C. Gabriel Arroyo Correa y a mi coasesor de tesis el Dr. Jorge Isidro Aranda, quienes con su paciencia y apoyo han hecho posible la presente tesis.

Se agradece el apoyo parcial a través del proyecto CIC-UMSNH 9.23.

Índice general

1. Presentación	3
2. Técnicas Experimentales para Medir las Propiedades Físicas de los Frutos.	6
2.1. Introducción.	6
2.2. Propiedades Generales de los Frutos.	7
2.3. Medición de las Propiedades Mecánicas.	11
2.4. La Técnica de Impacto Acústico.	16
2.5. Instrumentación de la Técnica de Impacto Acústico Utilizada en este Trabajo.	19
2.6. Consideraciones Generales para Aplicar la Técnica de Impacto Acústico.	20
2.7. Importancia del índice de Firmeza como un Parámetro de Calidad.	22
3. Resultados Experimentales.	25
3.1. Introducción.	25
3.2. Resultados Preliminares.	26
3.3. Frutos de Forma Esférica.	29
3.4. Índice de Firmeza para Mangos de Exportación.	37
4. Conclusiones	55

Capítulo 1

Presentación

México es un país exportador de bastantes productos agrícolas tales como el aguacate, naranja, manzana, mangos, etc., por mencionar solo algunos. Por lo que es importante mantener un control de calidad de los productos agrícolas a lo largo de la cadena de producción: cosecha, recolección, almacenamiento y distribución en el mercado. La determinación de características de calidad, tales como la firmeza y la maduración antes de que los productos sean recolectados, es de gran importancia para el control del tiempo óptimo de cosecha y de almacenamiento [1]-[5]. El control de calidad y la estimación del daño durante el manejo y la selección de productos agrícolas para su adecuada transportación a los mercados de consumo es un problema muy complejo que requiere de estudio [2]. El daño del fruto limita la capacidad de exportación y la ganancia de la industria agrícola. En países de la Comunidad Europea y en los Estados Unidos de Norteamérica, se están usando métodos no destructivos, en donde algunos resultan ser tecnologías caras y complejas. En nuestro país la instrumentación de estas tecnologías es incipiente, por lo que es vital el investigar algunas aplicaciones potenciales de estas tecnologías en la industria agrícola nacional.

Los métodos tradicionales para el control de calidad están basados en gran parte en pruebas sensoriales en las cuales el grado de confiabilidad no puede ser garantizado, ya que las mediciones resultan ser muy subjetivas. Por ejemplo, el uso de penetrómetros para medir la firmeza de frutos implica un daño permanente de la misma, ya que el puntal del aparato penetra la pulpa y después de la deformación el fruto no está apto para su comercialización

[1]-[5]. Incluso en frutos tan delicados como la zarzamora se ha usado esta técnica destructiva [6], aunque creemos que pueden utilizarse mejores alternativas [5].

El uso de nuevas tecnologías para el control de calidad de frutos se basan en la forma en que éstos interaccionan con ondas acústicas, tanto de ultrasonido [7]-[10] como las producidas por vibraciones [11]-[14] y fuerzas de impacto [15]-[23], así como con ondas electromagnéticas [24]-[27]. Dentro de esta diversidad de técnicas existentes, destaca la llamada técnica de impacto por su gran flexibilidad y adaptabilidad para evaluar el grado de calidad de diferentes clases de frutos. En estos casos la calidad de los frutos se cuantifica con la medición del llamado índice de firmeza. En cuanto a las características de calidad se pueden considerar la firmeza y madurez ya que estas características a su vez están relacionadas con propiedades que se pueden medir como la densidad, dureza, contenido de aceite, propiedades elásticas y visco-elásticas. [1]-[5]. La instrumentación de equipos basados en la técnica de impacto para medir la calidad de algunos frutos [29]-[30], ha mostrado el gran potencial que pueden tener tales aparatos en la selección de los frutos en función de su índice de firmeza.

El propósito de la presente tesis es presentar la técnica de impacto acústico que hemos instrumentado para cuantificar el índice de firmeza de frutos como parámetro de calidad [1]-[5], [23]. La caracterización del índice de firmeza del fruto mediante esta técnica requiere de la medición de la masa y la frecuencia de resonancia dominante del fruto al ser impactada por una pequeña masa pendular. El índice de firmeza definido en términos de estos dos parámetros es importante como un indicativo de la elasticidad del fruto a medida que transcurre su proceso de maduración.

En el capítulo 2 se hace una revisión básica de las técnicas empleadas para medir las propiedades físicas de los frutos ligadas con su calidad. En este capítulo se presenta la técnica de impacto acústico y se discute su instrumentación como una herramienta flexible para cuantificar la firmeza de los frutos. En el capítulo 3 se presentan los resultados experimentales de la medición del índice de firmeza de diferentes clases de frutos; en particular,

se caracteriza el índice de firmeza de mangos de exportación de la región de Nueva Italia. En el capítulo 4 se presenta las conclusiones de esta tesis. Al final se citan las referencias usadas en el presente trabajo.

Capítulo 2

Técnicas Experimentales para Medir las Propiedades Físicas de los Frutos.

2.1. Introducción.

Los frutos tienen características particulares que están determinadas genéticamente y que se presentan durante su proceso de maduración [1, 2]. Algunas de las características de los frutos como son su firmeza, color, aroma y sabor, y que se relacionan con su grado de calidad, son cualidades reconocidas a través de los sentidos. Es frecuente asociar la calidad de un producto con su grado de aceptación en el mercado de consumo [1, 2].

Los métodos tradicionales del control de calidad están basados en gran parte en pruebas sensoriales, en la mayoría de los casos estas pruebas arrojan resultados para los cuales su grado de confiabilidad no puede ser garantizado, debido a que se basa en mediciones subjetivas. Las pruebas para medir la calidad de los frutos mediante técnicas no destructivas, en donde no hay un daño permanente del fruto, son preferentes sobre las pruebas de tipo sensoriales, ya que permiten estimar con mayor precisión que propiedades del fruto inciden en mayor grado con su calidad. Los métodos y técnicas no destructivas que se usan para la evaluación de la calidad de productos agrícolas se pueden clasificar en dos grandes grupos [1]-[5]: los basados en técnicas

acústicas (ultrasonido, vibración forzada e impacto) y los basados en técnicas electromagnéticas (radiación óptica, radiación X y radiación gama). Las cualidades vinculadas con las propiedades mecánicas, cuantificables con el uso de las técnicas acústicas mencionadas, son las más estudiadas [1]-[5], así como de modelación matemática [12]-[13].

En este capítulo se hace una revisión de las técnicas de control de calidad, destructivas y no destructivas, aplicadas a la industria agrícola. Se pone especial énfasis en las técnicas acústicas para medir las propiedades mecánicas de los frutos; en particular, se describe en detalle la técnica de impacto acústico que se usa en este trabajo.

2.2. Propiedades Generales de los Frutos.

La Fig. 2.1 muestra la estructura general de los frutos: un centro (hueso) rodeado por la pulpa, y ésta a su vez revestida por la corteza (cáscara). Naturalmente que las características específicas de cada componente dependen de la clase particular de fruto de que se trate.

Como se ha mencionado, la calidad se puede relacionar con ciertas características físicas y químicas que involucran el tamaño, color, sabor, firmeza, textura y ausencia de defectos o materiales extraños. La Fig. 2.1 muestra la estructura básica de los frutos, en donde se nota la no uniformidad de madurez del fruto. De acuerdo con Baryeh [20], las propiedades de varios frutos, como el mango y el aguacate, tienen variaciones no lineales de sus propiedades mecánicas; sin embargo, las estimaciones cuantitativas de éstas, como la firmeza, no son fácilmente predecibles, ya que son propiedades temporales que cambian muy drásticamente de la corteza al centro del fruto, y a medida que transcurre el proceso de maduración.

Las propiedades biomecánicas de los frutos son un aspecto de calidad importante ya que la determinación de dichas propiedades nos permite conocer parámetros útiles tales como el peso y el tiempo que podrían soportar antes

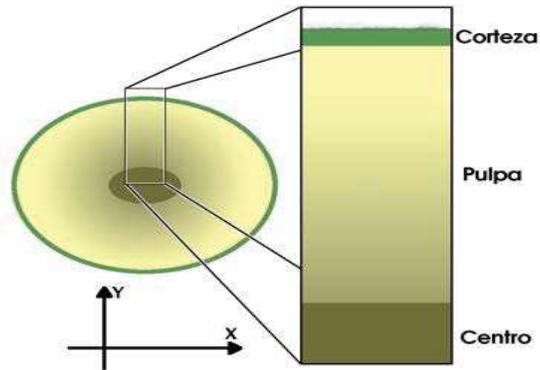


Figura 2.1: Estructura básica de los frutos. En este diagrama se muestra de manera simplificada un corte transversal general. La compleja estructura simulada por el cambio de tonalidad en el dibujo, es la responsable de las propiedades no lineales del fruto.

de llegar a sus límites de elasticidad, la deformación plástica o resistencia al corte en sus diferentes estados de madurez, así como el grado de deformación cuando el fruto es sometido a fuerzas o presiones (que a su vez indican la resistencia del fruto al daño mecánico) y cómo mejorar su manejo postcosecha [6].

El control de calidad de los frutos debe ser medido por sus cualidades y atributos. En la tabla 2.1 se muestran las propiedades generales de los frutos y las características ligadas a ellas [1, 2], [6].

Las propiedades citadas en la tabla pueden medirse tanto con técnicas destructivas como con técnicas no destructivas [1]-[5]. En esta tesis estaremos interesados en las propiedades mecánicas de los mangos las cuales se describen con mayor detalle en la siguiente sección.

Las propiedades ópticas están basadas en la transmisión, reflexión, absor-

Cuadro 2.1: *Propiedades generales de los frutos.*

Propiedades	Caraterísticas
Mecánicas	Aquellas relacionadas con la respuesta de los frutos a fuerzas mecánicas externas. La firmeza y la textura son las manifestaciones comunes ligadas con estas propiedades.
Ópticas	Aquellas relacionadas con la interacción de la luz con los frutos. El color y el brillo de los frutos son manifestaciones relacionadas con estas propiedades.
Eléctricas y magnéticas	Aquellas relacionadas con la respuesta de los frutos a campos eléctricos y magnéticos. La humedad en los frutos es una manifestación ligada a esta propiedad.
Químicas	Aquellas relacionadas con la composición y propiedades internas de los frutos. El sabor, el aroma y el contenido de azúcares de los frutos son las manifestaciones típicas vinculadas con estas propiedades.
Fisiológicas	Aquellas relacionadas con las funciones de las estructuras orgánicas de los frutos. La madurez y descomposición de los frutos son manifestaciones ligadas a estas propiedades.

ción y dispersión de la luz por el fruto, en donde la propiedad más importante tiene que ver con el color el cual puede ser medido y caracterizado con técnicas estándares de colorimetría [1].

Las propiedades eléctricas y magnéticas de los frutos han sido estudiadas muy poco. Desde los primeros reportes del uso de microondas para estudiar las propiedades dieléctricas de frutos [24]-[25], ha habido poco avance en esta área. Los resultados reportados en la literatura se han enfocado a relacionar las propiedades dieléctricas de frutos con su grado de humedad en las diferentes etapas de su almacenamiento y transportación [1].

La medición de las propiedades químicas está relacionada con la determinación de los componentes químicos como son [1]: clorofila y carotenoides (pigmentos), agua, carbohidratos y proteínas. Esto se lleva a cabo mediante los métodos de la espectroscopía visible e infrarroja (técnicas no destructivas) [1]. El olor y el aroma característico de cualquier fruto es debido a la existencia de las sustancias aromáticas presentes en la cáscara y en la pulpa. La determinación del olor y el aroma se hace con procedimientos destructivos muy conocidos en la industria de los alimentos [1]. De manera similar, los azúcares que son componentes mayoritarios en el zumo de los frutos, se estiman con los procedimientos conocidos en la industria química para determinar los sólidos solubles de una muestra [1].

El estudio no destructivo de las propiedades fisiológicas del fruto se ha basado en el análisis del daño producido por agentes externos (golpes severos, magullamientos y plagas). Esto se realiza aplicando técnicas de espectroscopía de infrarrojo cercano, de espectroscopía por fluorescencia y emisión de retardo, de espectroscopía de rayos X y rayos gama [1]. El contenido de almidón es un indicador del estado de maduración del fruto; el almidón de algunas variedades de frutos se rompe en azúcares, por lo que la razón de este rompimiento es una característica de cada variedad. La determinación de esta tasa de conversión se hace de manera destructiva siguiendo procedimientos estándares conocidos en la industria de los alimentos [1]. De manera similar, la producción de etileno, presente en los frutos denominados climatéricos (peras, manzanas, melocotones y nectarinas), se cuantifica con los métodos

conocidos en cromatografía [1].

2.3. Medición de las Propiedades Mecánicas.

En las técnicas destructivas el daño que se hace sobre el fruto es irreversible. Tradicionalmente, en la industria agrícola se han empleado los penetrómetros para medir de forma destructiva el grado de firmeza de los frutos. Estos dispositivos se basan en el hecho de que cuando una fuerza externa se aplica sobre un objeto sólido, éste experimenta una deformación que es proporcional a la fuerza aplicada (ley de Hooke [28]).

El esfuerzo es una cantidad proporcional a la fuerza externa que produce la deformación, es decir, es una fuerza externa por unidad de área de sección transversal que actúa sobre el objeto. En la industria agrícola es usual cuantificar las propiedades mecánicas de los frutos a través de la medición del módulo de Young y del módulo de corte; rara vez se mide el módulo volumétrico [1]. El módulo de Young mide la resistencia de un sólido a un cambio en la longitud, y se define como [1], [28]:

$$Y = \frac{\text{esfuerzo de tensión}}{\text{deformación de tensión}} = \frac{F/A}{\Delta L/L_0}, \quad (2.1)$$

donde F es la fuerza aplicada sobre la superficie A del objeto, ΔL es el cambio de longitud del sólido de longitud inicial L_0 . El módulo de corte S mide la resistencia al movimiento de los planos de un sólido al deslizar uno sobre otro. Este tipo de deformación ocurre cuando un objeto se somete a una fuerza tangencial a una de sus caras mientras (esfuerzo de corte) que la cara opuesta se mantiene fija mediante una fuerza, como la de fricción. El módulo de corte se define como [1], [28]:

$$S = \frac{\text{esfuerzo de corte}}{\text{deformación de corte}} = \frac{F/A}{\Delta x/h}, \quad (2.2)$$

donde Δx es la distancia horizontal que la cara bajo esfuerzo se mueve y h es el espesor del objeto. Nótese que las unidades para Y y S son unidades de

fuerza por unidad de área (presión).

La estructura básica de los penetrómetros consta de un puntal (para aplicar la fuerza) y de un par de escalas que miden simultáneamente la deformación y la fuerza aplicada [1]. En la Fig. 2.2(a) se muestra una forma práctica de construir un penetrómetro con elementos de fácil adquisición en el mercado. Con una estructura similar es posible medir la firmeza de frutos tan delicados como la zarzamora [6]. La Fig. 2.2(b) presenta una fotografía de un penetrómetro comercial del tipo Magness-Taylor. La respuesta típica de fuerza versus deformación se presenta en la Fig. 2.2(c), en donde se observan las diferentes regiones de compresión. El daño permanente al fruto se debe a que los penetrómetros trabajan más allá de la región de ruptura.

El penetrómetro comercial mostrado en la Fig. 2.2 es ampliamente usado en la industria agrícola como una herramienta sencilla cuyos resultados se obtienen en cuestión de segundos. En la práctica, el uso de los penetrómetros implica los siguientes pasos. Primero se elige el puntal adecuado (los calibres del puntal están estandarizados de acuerdo a tablas elaboradas para cada fruto); por ejemplo, de 11 mm de diámetro para manzanas, y de 8 mm de diámetro para peras, melocotones y nectarinas. Enseguida se corta con un cuchillo la piel de la fruta en dos puntos opuestos de su parte ecuatorial. Después, asegurando de que la aguja indicadora de presión del aparato se encuentre marcando 0, se posiciona de forma vertical el aparato, colocando la punta de éste justo donde se ha efectuado el corte con una mano, mientras que con la otra se sujeta el fruto que debe estar sobre el soporte de apoyo, y se presiona hasta que se haya introducido parcialmente el puntal (hasta una marca elegida previamente). Se anota este primer valor (en libras o kilogramos), y se realiza el mismo procedimiento para el otro trozo de pieza sin piel cortado con anterioridad. De los dos valores obtenidos se estima finalmente un valor promedio.

En términos generales, las propiedades mecánicas se pueden analizar en forma no destructiva usando ondas de ultrasonido (frecuencias mayores a 20kHz) y ondas de frecuencia audible (de 20Hz a 20kHz). En el caso de las frecuencias audibles la idea es excitar las frecuencias de vibración de los fru-

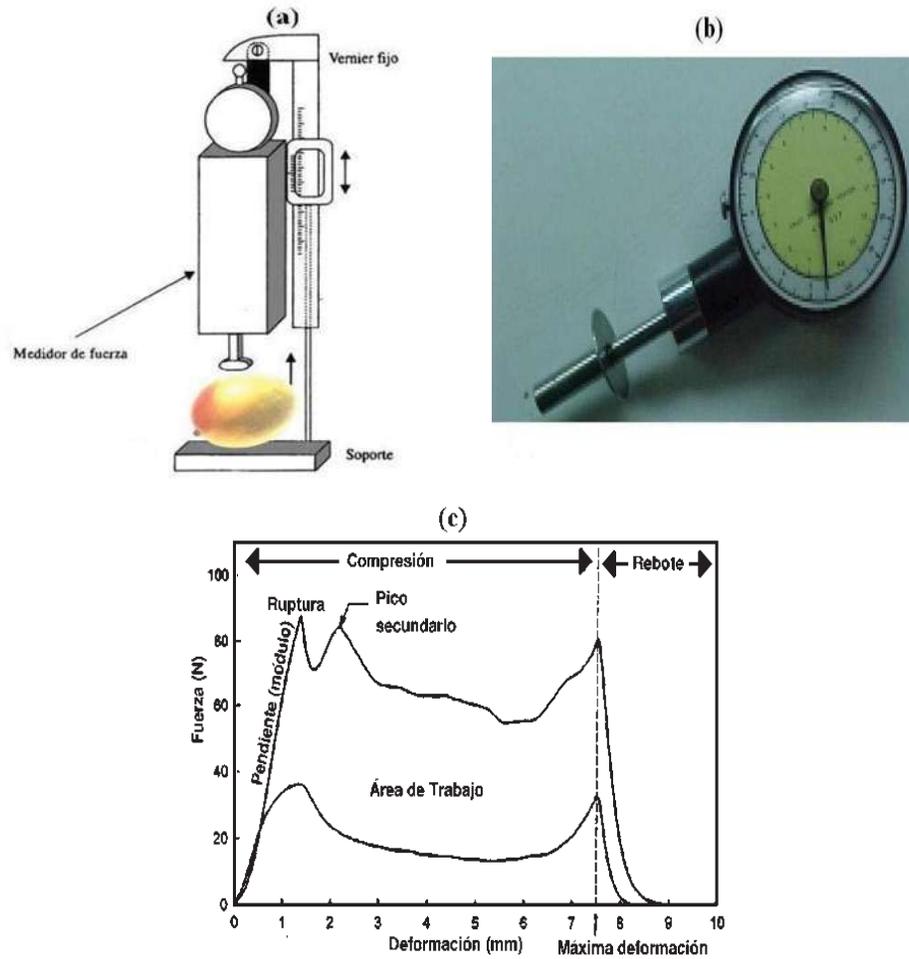


Figura 2.2: Método tradicional de punción usando un penetrómetro para medir la firmeza de frutos: (a) Penetrómetro construido típico; (b) penetrómetro comercial; (c) respuesta típica obtenida con esta técnica destructiva.

tos mediante vibraciones forzadas o mediante impactos.

El uso del ultrasonido en la industria agrícola es bien conocido [7]-[10]. El objetivo al emplear las ondas de ultrasonido es medir la onda que es reflejada y/o transmitida por el fruto. Esta técnica se usa para encontrar relaciones entre propiedades internas tales como el módulo de elasticidad, densidad y propiedades visco-elásticas, las cuales están relacionadas con la velocidad y atenuación de las ondas de ultrasonido [1]. Evidentemente, estas propiedades mecánicas van cambiando a medida que transcurre el tiempo. En la Fig. 2.3(a) se muestra un arreglo experimental típico de esta técnica. Se puede distinguir la pieza de fruta a caracterizar, un emisor/receptor de ultrasonidos, las sondas transmisora y receptora, y el ordenador personal que controla el proceso de medición y almacena los resultados para posteriormente procesarlos con algún programa de cómputo apropiado. Los parámetros que se extraen de las mediciones son la atenuación que sufre la onda acústica en su recorrido y la velocidad con la que atraviesa la estructura del fruto (corteza, pulpa y hueso). En la Fig. 2.3(b) se presenta un resultado para el fruto del aguacate obtenido con este tipo de mediciones (tomado de la ref. [10]).

El uso de las vibraciones forzadas para medir las frecuencias de resonancia de frutos fue introducido inicialmente por el grupo de Abbott [11]. El método consiste en analizar la función de respuesta a la frecuencia cuando se aplica un impulso vibratorio. En la Fig. 2.4(a) se presenta una instrumentación típica de esta técnica. Un acelerómetro está montado sobre la fruta y otro sobre la base del vibrador. El módulo central controla al vibrador y registra las señales de los acelerómetros, previamente amplificadas. Posteriormente se procesa la información en la PC con un software apropiado para obtener el espectro de frecuencia del fruto (espectro acústico). En la Fig. 2.4(b) se muestra una gráfica de la función de respuesta a la frecuencia de una manzana obtenida con esta técnica (tomado de la ref. [14]). En esta figura se identifican claramente las frecuencias de resonancia de la fruta. Resultados obtenidos con esta técnica han demostrado una buena correlación entre el coeficiente de rigidez y las frecuencias de vibración de las frutas. Los resultados obtenidos por el grupo de Abbott [11] fueron corregidos posteriormente por Cooke [12], y mostraron que era posible identificar el parámetro $f^2 m^{\frac{2}{3}}$,

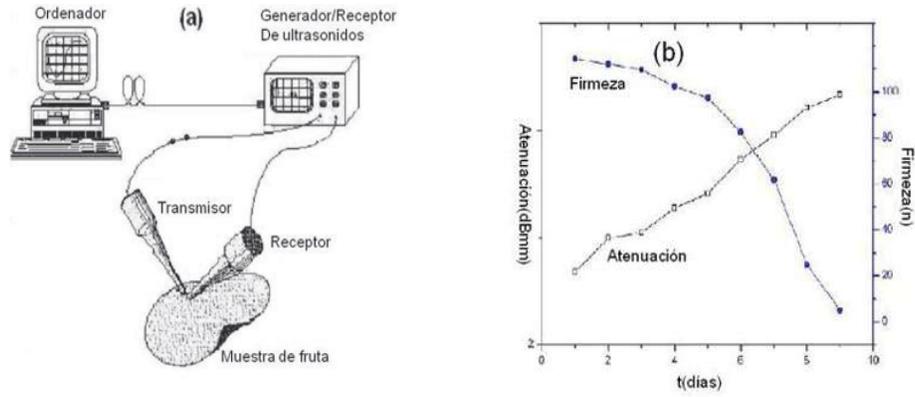


Figura 2.3: *Uso del ultrasonido para medir las propiedades mecánicas de frutos: (a) Arreglo experimental típico; (b) resultados obtenidos con esta técnica.*

donde f es la primera o segunda frecuencia de resonancia de la fruta y m su masa, como un factor de medición de la firmeza del fruto. Por esta razón, este parámetro se conoce como índice de firmeza. Estas predicciones se han confirmado tanto para frutas con forma aproximadamente esféricas como no esféricas [1].

Una de las desventajas de la excitación mecánica de frutos por vibraciones forzadas es que el daño se incrementa por el golpeteo continuo del vibrador sobre el fruto. En este sentido, en años recientes se ha venido usando la llamada técnica de impacto acústico [1], [15]-[23]. Esta técnica consiste en impactar el fruto con una pequeña masa pendular y registrar sus vibraciones (libres) después del impacto. La Fig. 2.5(a) muestra un arreglo experimental de esta técnica. El impacto se puede realizar con una masa suspendida formando un péndulo normal. Las vibraciones del fruto se registran con acelerómetros (también se pueden usar micrófonos) colocados sobre diferentes partes del fruto, y por medio de una tarjeta de adquisición de datos se transmite la información de los datos para ser procesados por la PC con un software adaptado a las necesidades del usuario. En la Fig. 2.5(b) se presenta un espectro de frecuencia para el fruto de manzana obtenido con esta técnica [23]. Nótese la definición de una frecuencia de resonancia dominante que se puede

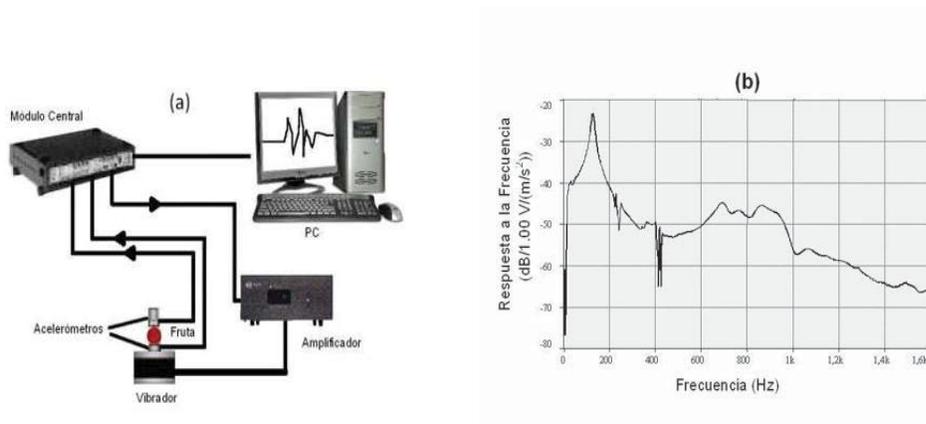


Figura 2.4: *Uso de la técnica de vibraciones forzadas para medir las propiedades mecánicas de frutos: (a) Arreglo experimental típico; (b) resultados obtenidos con esta técnica.*

usar como frecuencia de referencia para cuantificar el índice de firmeza S_c definido en el párrafo anterior: $S_c = f^2 m^{\frac{2}{3}}$. En este trabajo se usará la técnica de impacto acústico para medir S_c de diferentes frutos, la cual se describe en detalle a continuación.

2.4. La Técnica de Impacto Acústico.

El método de impacto acústico ha sido usado para determinar el índice de firmeza de varias clases de frutos como manzanas [17], tomates [18], duraznos [19], aguacates [20] y peras [21]. Las primeras aplicaciones de la respuesta acústica al impacto la desarrolló Saltveit et al. en 1975 [22]. En este trabajo se intentó relacionar el sonido que producía un tomate al ser golpeado con el dedo índice y se grababa el sonido producido. A pesar de que las señales acústicas mostraron ciertas tendencias que permitieron marcar diferencias entre lotes en lo que se refería al estado de madurez, la dispersión de los datos fue tal que dio lugar a numerosos errores en la clasificación de individuos. El avance en el desarrollo de nuevos elementos de detección de señales acústicas y de análisis estadístico de los datos obtenidos, fueron afinando detalles en la

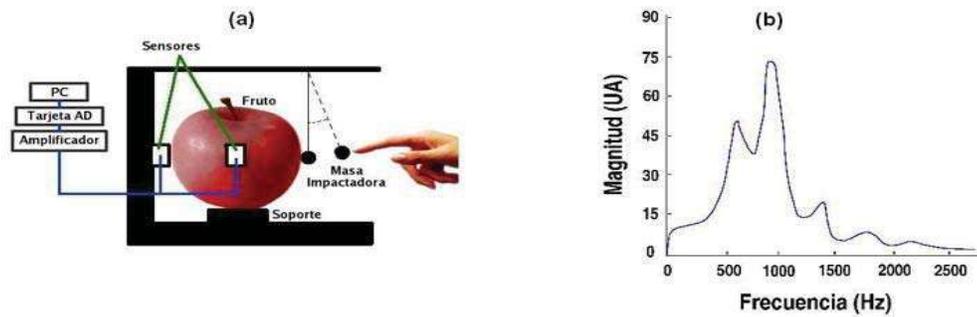


Figura 2.5: *Técnica de impacto acústico: (a) Esquema experimental típico; (b) espectro de frecuencia de la señal registrada por los sensores (acelerómetros o micrófonos).*

confiabilidad y flexibilidad de esta técnica [17]. El estudio realizado por Chen [15], basado en la física de la colisión entre dos cuerpos esféricos sólidos, sentó las bases para el diseño e instrumentación de nuevos esquemas de impacto acústico que fueron utilizados en diferentes frutos [20]-[23].

El principio físico de la técnica de impacto acústico se basa en la colisión de dos cuerpos esféricos sólidos [15], como se muestra en la Fig. 2.6. Aquí m_1 y m_2 son las masas de las esferas 1 (impactador) y 2 (fruto), respectivamente, con razones de Poisson μ_1 y μ_2 , módulos de elasticidad E_1 y E_2 , y radios de curvatura (en el punto de contacto) R_1 y R_2 . La velocidad relativa entre las esferas es v_0 , la cual será igual a v_1 en el caso de que el fruto permanezca inicialmente en reposo ($v_2 = 0$).

Chen demuestra, mediante argumentos de conservación de la energía, que la fuerza máxima de impacto F (actuando sobre cada cuerpo), la aceleración A de la esfera 1, y el tiempo t (requerido para alcanzar la fuerza máxima) se pueden expresar como [15]:

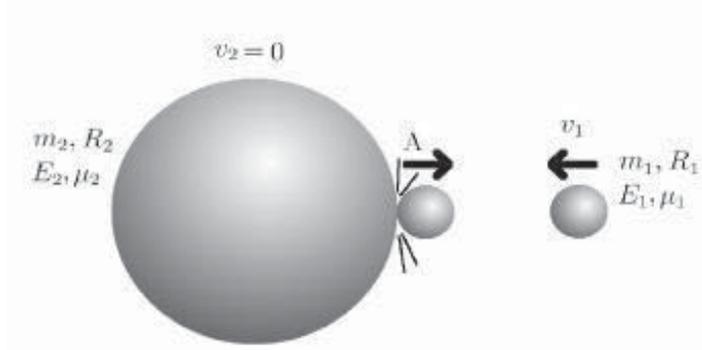


Figura 2.6: Colisión entre dos esferas sólidas.

$$F = \left(\frac{5}{4}v_0^2\right)^{\frac{3}{5}} \left(\frac{m_1 m_2}{m_1 + m_2}\right)^{\frac{3}{5}} \left(\frac{\frac{4}{3}E_1 E_2}{E_2(1 - \mu_1^2) + E_1(1 - \mu_2^2)}\right)^{\frac{2}{5}} \left(\frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2}\right)^{\frac{1}{5}}, \quad (2.3)$$

$$A = \left(\frac{5}{4}v_0^2\right)^{\frac{3}{5}} \frac{1}{m_1} \left(\frac{m_1 m_2}{m_1 + m_2}\right)^{\frac{3}{5}} \left(\frac{\frac{4}{3}E_1 E_2}{E_2(1 - \mu_1^2) + E_1(1 - \mu_2^2)}\right)^{\frac{2}{5}} \left(\frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2}\right)^{\frac{1}{5}}, \quad (2.4)$$

$$t = 1,4325 \left(\frac{1}{v_0}\right)^{\frac{1}{5}} \left(\frac{E_2(1 - \mu_1^2) + E_1(1 - \mu_2^2)}{E_1 E_2}\right)^{\frac{2}{5}} \left(\frac{R_1 + R_2}{R_1 R_2}\right)^{\frac{1}{5}} \left(\frac{m_1 + m_2}{m_1 m_2}\right)^{\frac{2}{5}}. \quad (2.5)$$

A partir de las Ecs. (2.3)-(2.5), Chen encontró que la cantidad A/t se podría usar para caracterizar el módulo de elasticidad del fruto, si éste era impactado por una pequeña esfera rígida. En este caso, $E_1 = \infty$, $m_1 \ll m_2$, $R_1 \ll R_2$ y $v_0 = v_1$, de modo que el factor A/t , según las Ecs. (2.4) y (2.5), queda como:

$$\frac{A}{t} = 0,8954 v_1^{1,4} \left(\frac{m_1 m_2}{m_1 + m_2}\right)^{0,02} \left(\frac{E_2}{(1 - \mu_2^2)}\right)^{0,8} \left(\frac{R_1}{m_1^2}\right)^{0,4}. \quad (2.6)$$

De la Ec. (2.6) se infiere que mientras se mantenga el criterio establecido por Chen (impactador esférico rígido y pequeño), la técnica de impacto acústico puede ser una buena alternativa para medir la firmeza de frutos. En la Fig. 2.5(b) se mostró la forma típica del espectro de frecuencias de los frutos cuando son excitados por impacto acústico, en donde se puede identificar una frecuencia de resonancia dominante. Los estudios experimentales, anteriores y posteriores al trabajo de Chen, mostraron conclusiones similares, lo que llevó a proponer los siguientes parámetros para cuantificar el índice de firmeza S_c y el módulo de elasticidad Y del fruto [16]-[22]:

$$S_c = f^2 m^{2/3}, \quad (2.7)$$

$$Y = f^2 m^{2/3} \rho^{1/3}, \quad (2.8)$$

donde f es la primera o segunda frecuencia natural del fruto de masa m y densidad ρ . La evolución temporal de la frecuencia de resonancia es un parámetro fundamental para cuantificar el grado de firmeza y el módulo de elasticidad de los frutos. Sin embargo, en la práctica es complicado medir el volumen del fruto con precisión, por lo que es más usual medir sólo el índice de firmeza S_c . Conviene aclarar que las Ecs. (2.1) y (2.8) se refieren al mismo módulo de Young, solo que son medidos de forma diferente: en el primer caso la medición es destructiva y en el segundo caso es no destructiva [1].

2.5. Instrumentación de la Técnica de Impacto Acústico Utilizada en este Trabajo.

La Fig. 2.7 muestra el arreglo experimental utilizado para la medición de la firmeza por la técnica de impacto. El impacto se produjo con una bola rígida de plástico (2.46 cm de diámetro y 7.1 g de masa) suspendida de

un hilo, formando un péndulo simple (19.33 cm de longitud) e impactando, desde un ángulo de 20^0 con respecto a la vertical (medido con la ayuda de un transportador, con precisión de un grado) en el plano ecuatorial del fruto. Se utilizó una base mecánica para soportar la estructura del péndulo y el transportador, y así posicionar adecuadamente la masa de impacto a la altura del plano ecuatorial. Estos valores se eligieron, después de varias pruebas, para no tener ningún daño a los frutos y capturar una buena señal con los sensores de sonido PASCO(CI-6506B) colocados en el lado opuesto al impacto (sensor A) y a una dirección de 90^0 con respecto al punto de impacto (sensor B). Se consideraron estos ángulos para monitorear el cambio de la señal, y se encontró, mediante prueba y error, que la señal más pura y robusta se obtenía en 180^0 . Por medio de una interfaz PASCO (CI-7650) se capturó y se amplificó la señal analógica (voltaje) del sonido registrado por los sensores, transfiriéndose la información para ser analizada y procesada por una computadora personal mediante el programa DataStudio de la compañía PASCO. Las señales se registraron a una razón de 5000 muestras por segundo durante 25 milisegundos. Para discriminar el ruido ambiental se eligió una señal de disparo de 50 milivoltios. La masa del fruto se midió con una báscula Ohaus de tres brazos (resolución de 0.1 g) y su circunferencia ecuatorial se midió con una cinta métrica (resolución de 1 mm). Se marcaron los frutos para identificar apropiadamente sus circunferencias ecuatoriales y reducir los errores en las mediciones.

2.6. Consideraciones Generales para Aplicar la Técnica de Impacto Acústico.

Cuando se hicieron las primeras pruebas en el laboratorio, se verificó que cuando el impacto era de forma frontal, las señales registradas por los sensores de la Fig. 2.7 arrojaban resultados similares. Sin embargo, esto no era el caso cuando el impacto no era frontal. Hay cierta evidencia de que el impacto frontal pudiera excitar los modos radiales del fruto [21]. Por esta razón, en todas las mediciones reportadas en el siguiente capítulo siempre se cuidó este aspecto.



Figura 2.7: Arreglo experimental instrumentado para medir el índice de firmeza de frutos mediante la técnica de impacto acústico.

Otro aspecto que es importante mencionar, y que no fue reportado por Chen [15], es el análisis detallado del impulso transferido por la masa pendular al fruto en su región ecuatorial en donde ocurre el impacto. Esto es importante para garantizar un daño mínimo al fruto durante el impacto. La fuerza ejercida sobre dos cuerpos durante un choque tiene en general una forma funcional complicada, como se indica en la Fig. 2.8. El efecto de esta fuerza \vec{F}_i es transferir un impulso \vec{T} durante la duración del impacto, y el cual está relacionado con el cambio del momentum $\Delta \vec{p}$ de un cuerpo en el tiempo dt [28]:

$$d\vec{p} = \vec{F} dt \Rightarrow \Delta \vec{p} \equiv \int_{p_i}^{p_f} d\vec{p} = \int_{t_i}^{t_f} \vec{F} dt \equiv \vec{T}.$$

Con el mismo arreglo de la Fig. 2.7 se midió experimentalmente el impacto transferido al fruto por la masa pendular como función del ángulo, usando un sensor de fuerza PASCO (CI-6537), así como la energía cinética de la masa pendular en el punto de impacto usando una foto-puerta PASCO (ME-9204B). Se utilizó una interfaz PASCO (CI-7650) y el programa DataStudio de PASCO para la captura y procesamiento de las señales registradas

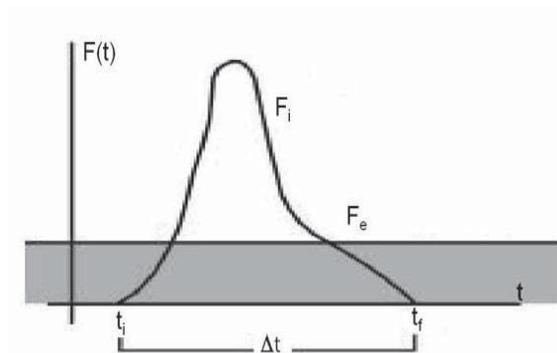


Figura 2.8: Variación típica de una fuerza impulsora F_i con el tiempo durante un impacto que se inicia en el tiempo t_i y termina en el tiempo t_f ; el impulso que se transfiere está dado por el área bajo la curva. Durante el choque, F_i es mucho mayor que cualquier fuerza externa F_e que pueda actuar sobre el sistema.

por estos sensores. En la Fig. 2.9 se muestran los resultados experimentales. Para los frutos analizados se encontró que ángulos de impacto alrededor de los 20° daban buenos resultados en cuanto a un daño mínimo al fruto y señales reproducibles. Este ángulo se encontró mediante prueba y error; ya que con ángulos menores que 20° daban una señal reproducible, pero en ocasiones se podía contaminar con el ruido ambiental al no ser muy robusta, y para ángulos mayores de 20° se dañaba al fruto.

Si se usara una masa impactadora de características diferentes a las de la Fig. 2.7 o frutos distintos a los reportados en el siguiente capítulo, es necesario hacer una nueva caracterización de estos parámetros para decidir el ángulo óptimo de impacto, aunque el valor de 20° se podría tomar como un valor de referencia inicial.

2.7. Importancia del índice de Firmeza como un Parámetro de Calidad.

En México el problema de control de calidad en productos agrícolas está lejos de estar resuelto, lo que limita la capacidad de competitividad del sector agrícola mexicano. Aspectos tan importantes como la determinación de

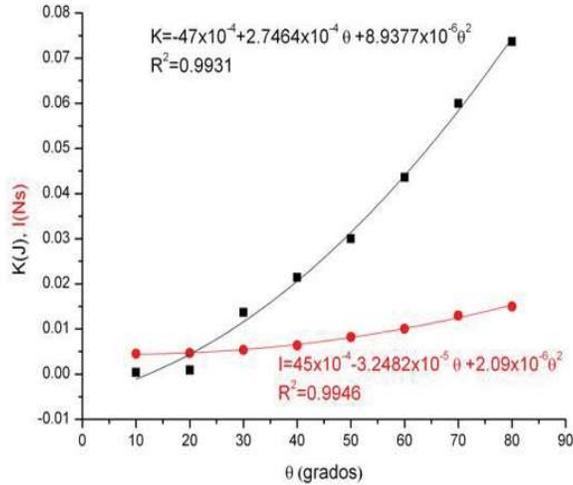


Figura 2.9: Variaciones de la energía cinética (K) y del impulso (I) que transfiere la masa pendular en el arreglo experimental de la Fig. 2.7. La curva continua representa el ajuste de los datos en cada caso

la firmeza y la estimación del daño de los frutos a lo largo de la cadena de producción de los productos agrícolas (precosecha, cosecha, selección, almacenamiento y transportación) constituyen un problema complejo que requiere de estudio.

El concepto de calidad en los frutos ha ido evolucionando a lo largo del tiempo. Al principio, la percepción de la calidad era diferente según el interés particular de cada uno de los agentes que intervenían en el proceso de producción (productor, comerciante y consumidor). Sin embargo, cada vez hay más coincidencia entre los sectores implicados ya que todos ellos tienden a acercarse sus criterios hacia los que impone el consumidor, para quien el estado de maduración del fruto que compra juega un papel fundamental. El precio de la fruta cada vez está más ligado a la calidad del producto final y, por ese motivo, los productores frutícolas planifican su proceso productivo con

objetivos de satisfacer al máximo las exigencias del sector comercial.

En este capítulo se describieron las principales técnicas, destructivas y no destructivas, para cuantificar las propiedades de los frutos más allá del aspecto subjetivo de la percepción humana. El índice de firmeza S_c , que fue definido arriba, es un indicador de calidad que cada vez más se está usando en amplios sectores del mercado hortofrutícola mundial. El hecho de que S_c puede ser medible con técnicas tan simples como el impacto, está empujando cada vez más estudios acerca de la instrumentación de esta técnica en la línea de producción. En este sentido, no es de extrañarse que en la literatura especializada aparezcan los reportes de aparatos construidos, basados en la técnica de impacto, que se están aplicando en el proceso de clasificación de ciertos frutos [29]-[30].

Capítulo 3

Resultados Experimentales.

3.1. Introducción.

Los productos hortofrutícolas tienen características volumétricas y geométricas no uniformes. Estas propiedades se deben a las diversas condiciones de cultivo y sufren modificaciones fisiológicas durante los procesos de la cosecha, poscosecha y comercialización, afectando las características de calidad de los productos. Las propiedades de varios frutos como el mango y el aguacate exhiben variaciones no lineales de sus propiedades mecánicas como se mencionó en el capítulo anterior [20]. Las estimaciones cuantitativas de estas frutas no son predecibles fácilmente, pues el mango y el aguacate tienen una no uniformidad de la pulpa. Durante los primeros días de almacenamiento su firmeza se mantiene casi constante, para seguir una disminución acelerada de éstas. Resultados obtenidos mediante la técnica de impacto acústico descrita en las secciones 2.4-2.6, han demostrado una buena correlación entre el coeficiente de rigidez y las frecuencias de vibración de los frutos. Estas predicciones se han confirmado tanto para frutos con forma aproximadamente esférica como no esférica [11], [17]-[21].

En este capítulo se reportan las mediciones obtenidas con la técnica de impacto acústico [31]-[33]. Primeramente se presentan los resultados de dos clases de frutos unos blandos (tomates) y otros duros (manzanas). Enseguida se presentan resultados de frutos con forma aproximadamente esférica (guayaba y manzana). Finalmente se concluye con la caracterización de los mangos de exportación de la región de Nueva Italia. Hasta donde sabemos,

estos resultados son los primeros que se reportan en la literatura nacional.

3.2. Resultados Preliminares.

Los resultados preliminares presentados en esta sección sirvieron para determinar las variaciones temporales de la masa, la frecuencia de resonancia dominante y el índice de firmeza. Adicionalmente, se reportan la variación de parámetros geométricos. Los frutos analizados fueron tomate de la variedad Bola y tomate de la variedad Saladet; el primero es de forma aproximadamente esférica y el segundo es de forma alargada. Las manzanas estudiadas fueron de la variedad Golden, Rayada (de la región de Chihuahua) y Rayada (de importación chilena). Los frutos se consiguieron en el mercado local y se mantuvieron a temperatura ambiente durante aproximadamente dos semanas (tomates) y cerca de un mes (manzanas).

Las masas se midieron con una báscula Ohaus (0.1 gramos de resolución), las frecuencias de resonancia se midieron de acuerdo a lo establecido en la sección 2.5, y los diámetros ecuatorial y axial se midieron con una cinta métrica (1 mm de resolución) de acuerdo al diagrama mostrado en la Fig. 3.1. Se investigaron dos modelos de ajuste para los parámetros citados, un modelo lineal y un modelo exponencial. Se tomaron en cuenta sólo estos dos modelos dada su simplicidad y porque experimentalmente se observa que a medida que transcurre el tiempo los parámetros que a nosotros nos interesan (masa, frecuencia e índice de firmeza) disminuyen en forma suave. Los modelos de ajuste tienen la siguiente forma:

$$P(t) = at + b, \tag{3.1}$$

$$P(t) = P_0 + P_1e^{-ct}. \tag{3.2}$$

En las Figs. 3.2-3.5 se presentan las variaciones temporales para la masa, la frecuencia, el índice de firmeza y los diámetros (axial y ecuatorial) para el tomate. Las barras de error son las estimaciones calculadas para las incertidumbres de estos parámetros, de acuerdo a los métodos estándares [34].

Los resultados presentados corresponden al promedio de tres frutos de cada variedad. En las figuras se muestran también las curvas de ajuste con sus respectivas ecuaciones y coeficientes de correlación, obtenidos con el programa comercial Origin (versión 8.0).

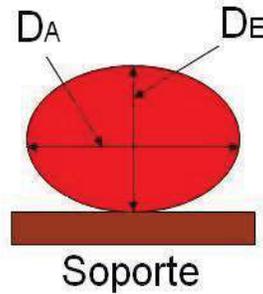


Figura 3.1: Ubicación de los diámetros axial D_A y ecuatorial D_E para los tomates y las manzanas.

De la Fig. 3.2 se puede notar que tanto el modelo lineal como el exponencial dan ajustes comparables para la variación temporal de la masa. Sin embargo, en el caso de las frecuencias de resonancia dominante, Fig. 3.3, el ajuste exponencial es mejor para el tomate Bola que para el tomate Saladet. Creemos que esto se debe a que la forma alargada del tomate Saladet está más alejada de la forma esférica del tomate Bola, por lo que si el choque no es frontal se pueden excitar modos de vibración superiores que se superpongan al modo fundamental. Estas mismas conclusiones se pueden inferir para el índice de firmeza, Fig. 3.4. Finalmente, para la variación temporal de los diámetros, Fig. 3.5, el ajuste exponencial para el tomate Bola también es mejor que para el tomate Saladet. Conviene enfatizar que los resultados mostrados en estas figuras para los tomates no constituyen una muestra estadísticamente representativa. El objetivo es simplemente mostrar como una misma clase de fruto, pero de variedades distintas, presentan diferencias en las variaciones temporales de su masa, frecuencia e índice de firmeza. Finalmente se debe aclarar que, por razones externas, en el caso de los tomates

de la clase Saladet solo se hicieron cuatro mediciones.

En el caso de las manzanas analizadas, Figs. 3.6-3.9, se pueden concluir los siguientes puntos. Para la variación de la masa, Fig. 3.6, se puede notar que ambos ajustes lineal y exponencial proporcionan resultados similares para las tres clases de manzanas citadas. Sin embargo, para las variaciones de la frecuencia de resonancia dominante, Fig. 3.7, y del índice de firmeza, Fig. 3.8, el ajuste exponencial proporciona mejores resultados. Para las variaciones de los perímetros (axial y ecuatorial), Fig. 3.9, el ajuste lineal muestra buenos resultados de ajuste. En este caso, el programa Origin no arrojó resultados aceptables para el modelo exponencial. Creemos que esto se debió a errores sistemáticos al momento de medir los perímetros de las manzanas, situación que no se presentó para los tomates. Básicamente, el error consistió en que no se tomó el mismo punto de referencia al momento de medir el perímetro con la cinta métrica utilizada (resolución de 1 mm). A diferencia de los tomates, los resultados para las manzanas permitieron estudiar las variaciones temporales por casi un mes. De nueva cuenta, los resultados no constituyen tampoco una muestra estadísticamente representativa, siendo el propósito únicamente el mostrar las variaciones temporales de los parámetros físicos de interés (masa, frecuencia e índice de firmeza).

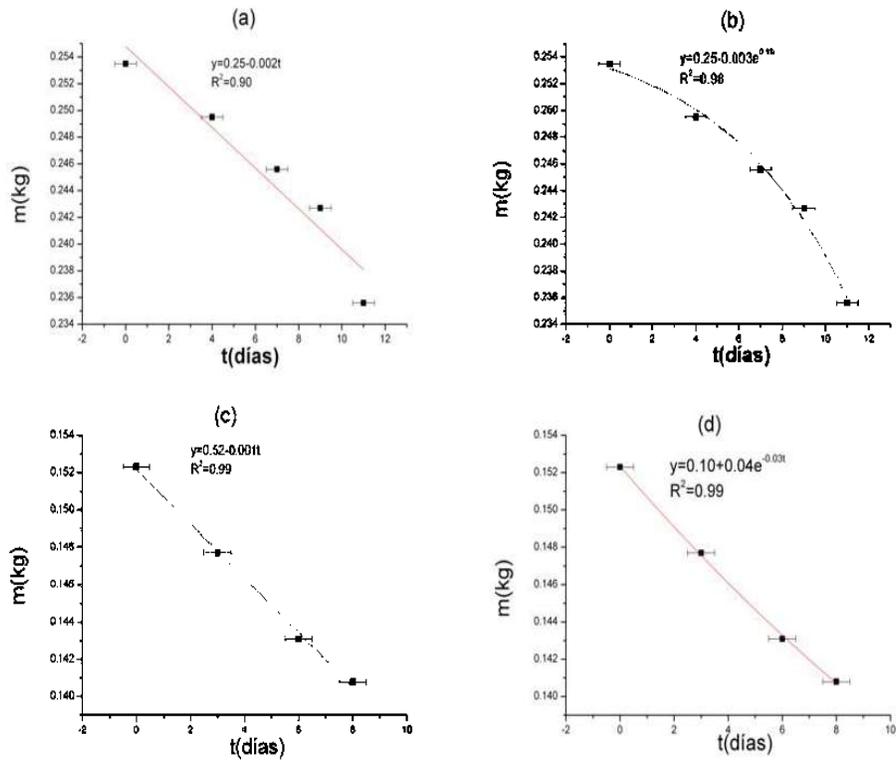


Figura 3.2: Variación de la masa para el tomate Bola ((a) y (b)) y para el tomate Saladet ((c) y (d)). Las figuras de lado izquierdo usan el modelo lineal de ajuste y las del lado derecho usan el modelo exponencial.

3.3. Frutos de Forma Esférica.

La información presentada en esta sección corresponde a frutos de forma aproximadamente esférica. Los frutos analizados son guayaba y manzana, en estado verde y maduro. Los parámetros estudiados son de nueva cuenta la masa, la frecuencia y el índice de firmeza. Para cada uno de estos parámetros se usan los dos modelos descritos por las Ecs. (3.1) y (3.2). Los frutos también se consiguieron en el mercado local y se mantuvieron a temperatura ambiente durante una semana, para ambos frutos. Por razones ajenas a nuestro control, no fue posible hacer mediciones más allá de una semana.

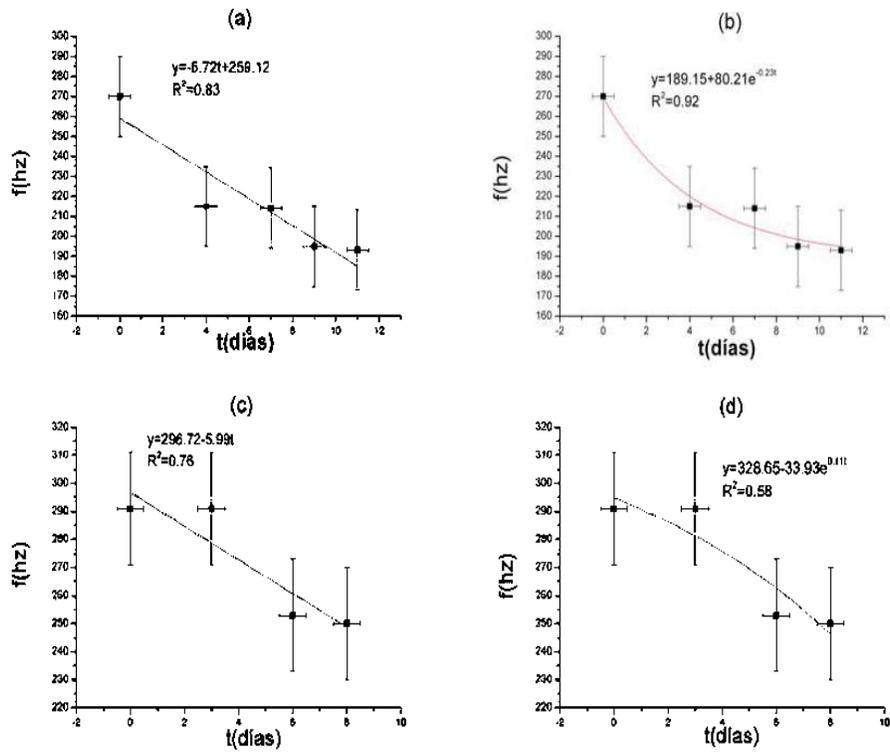


Figura 3.3: Variación de la frecuencia para el tomate Bola ((a) y (b)) y para el tomate Saladet ((c) y (d)). Las figuras de lado izquierdo usan el modelo lineal de ajuste y las del lado derecho usan el modelo exponencial.

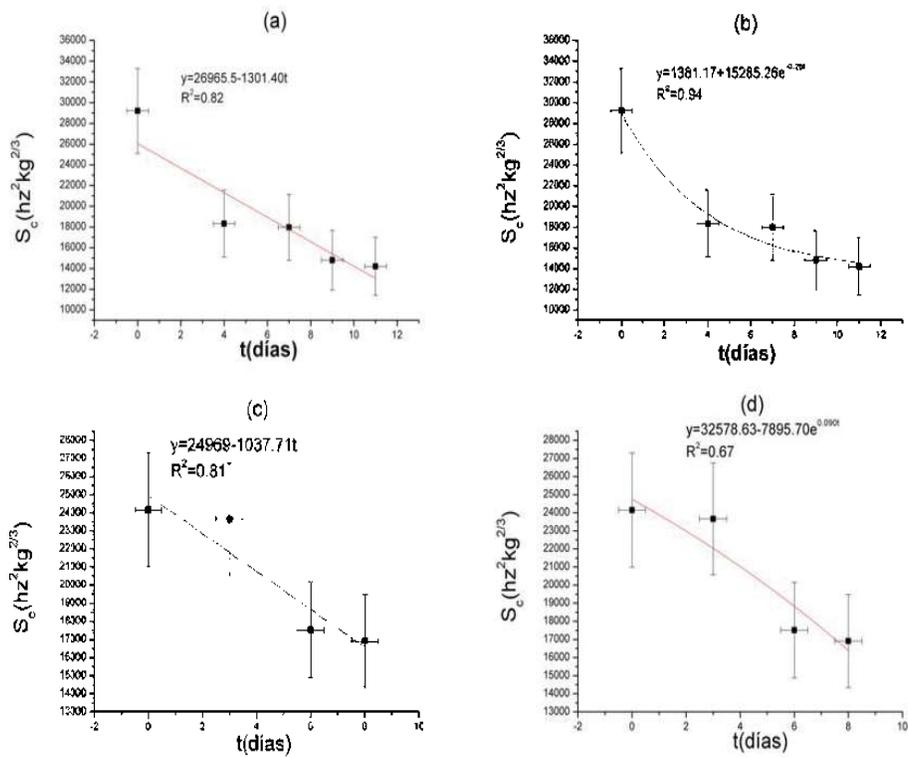


Figura 3.4: Variación del índice de firmeza para el tomate Bola ((a) y (b)) y para el tomate Saladet ((c) y (d)). Las figuras de lado izquierdo usan el modelo lineal de ajuste y las del lado derecho usan el modelo exponencial.

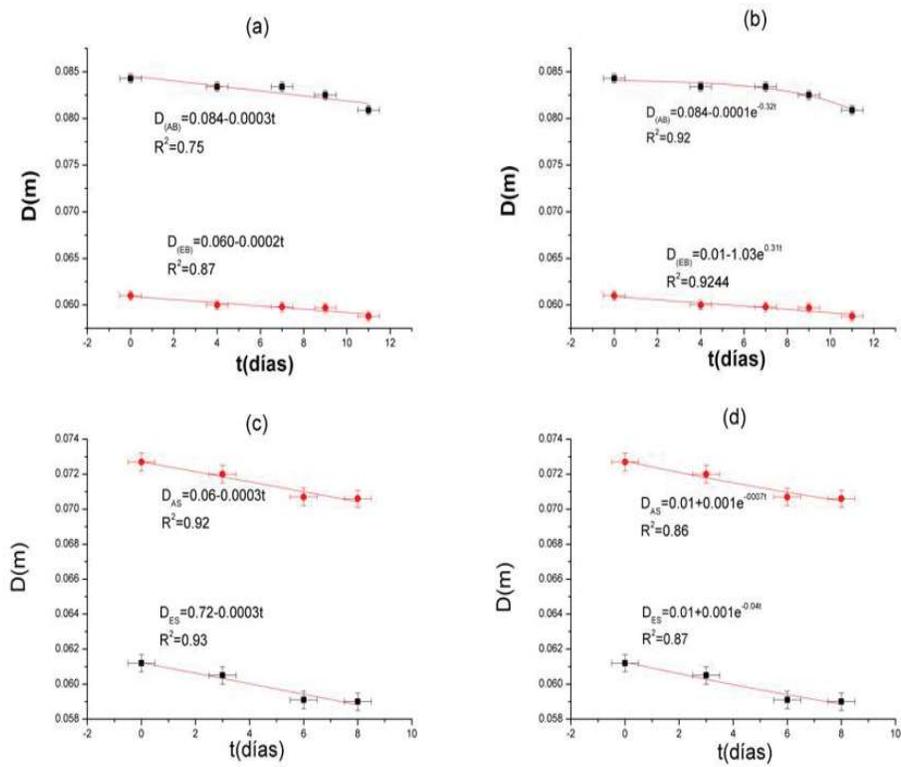


Figura 3.5: Variación del diámetro axial (traza superior) y del diámetro ecuatorial (traza inferior) para el tomate Bola ((a) y (b)) y para el tomate Saladet ((c) y (d)). Las figuras de lado izquierdo usan el modelo lineal de ajuste y las del lado derecho usan el modelo exponencial.

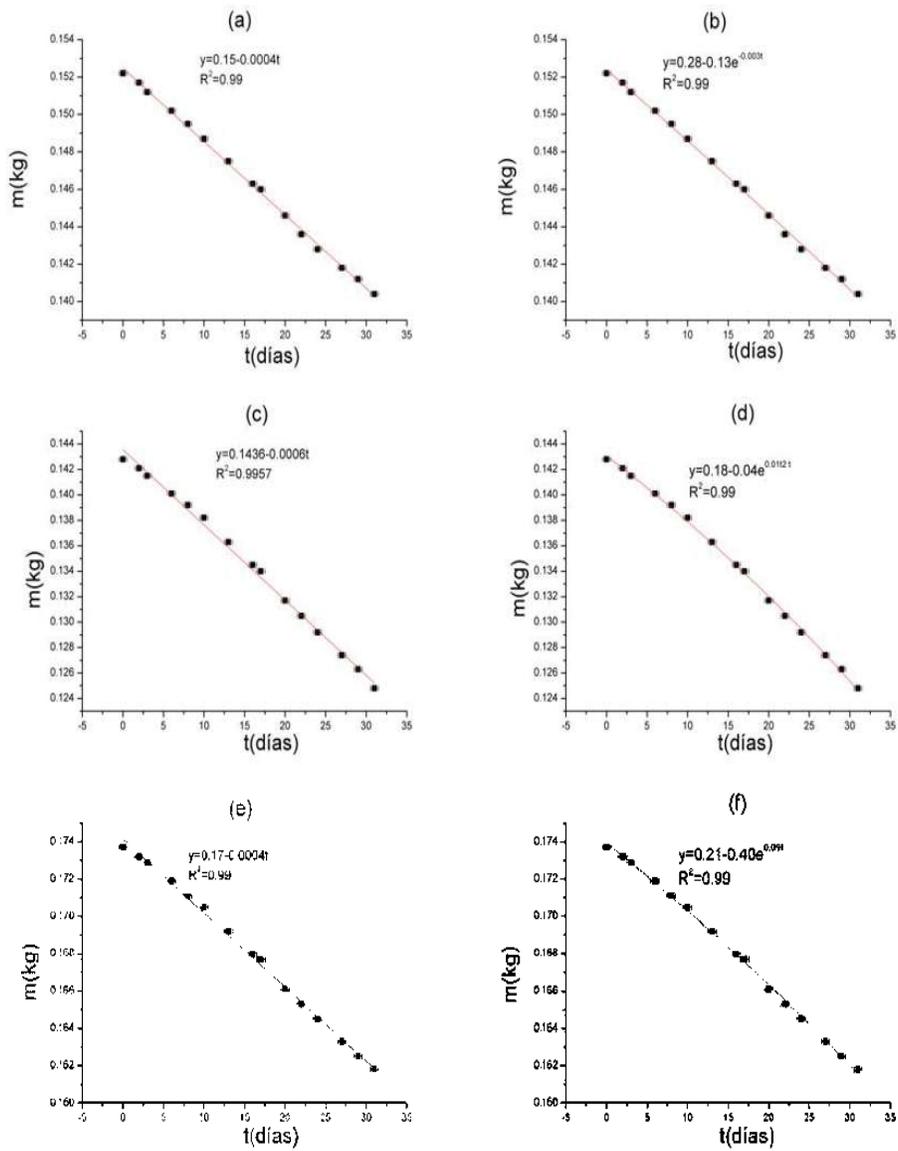


Figura 3.6: Variación de la masa para la manzana Rayada chilena ((a) y (b)), para la manzana Golden ((c) y (d)) y para la manzana Chihuahua ((e) y (f)). Las figuras de lado izquierdo usan el modelo lineal de ajuste y las del lado derecho usan el modelo exponencial.

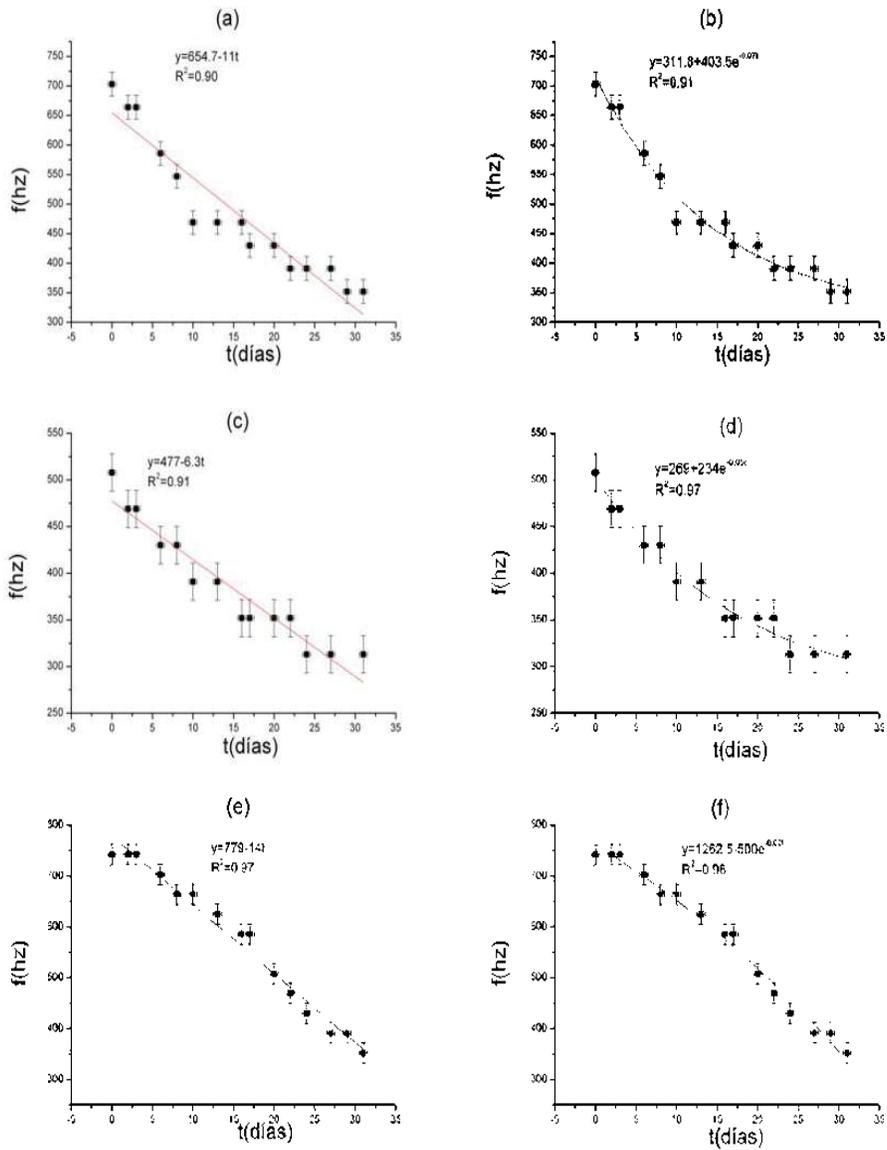


Figura 3.7: Variación de la frecuencia para la manzana Rayada chilena ((a) y (b)), para la manzana Golden ((c) y (d)) y para la manzana Chihuahua ((e) y (f)). Las figuras de lado izquierdo usan el modelo lineal de ajuste y las del lado derecho usan el modelo exponencial.

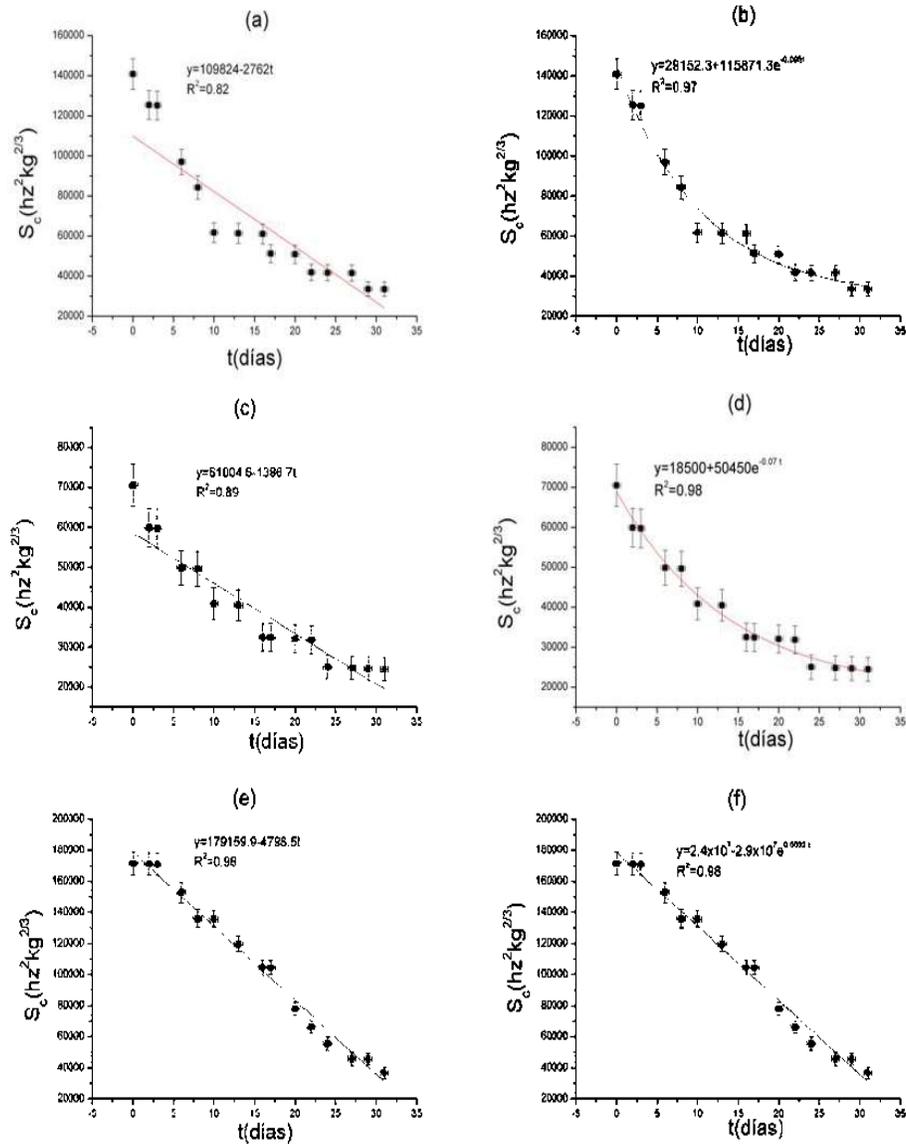


Figura 3.8: Variación del índice de firmeza para la manzana Rayada chilena ((a) y (b)), para la manzana Golden ((c) y (d)) y para la manzana Chihuahua ((e) y (f)). Las figuras de lado izquierdo usan el modelo lineal de ajuste y las del lado derecho usan el modelo exponencial.

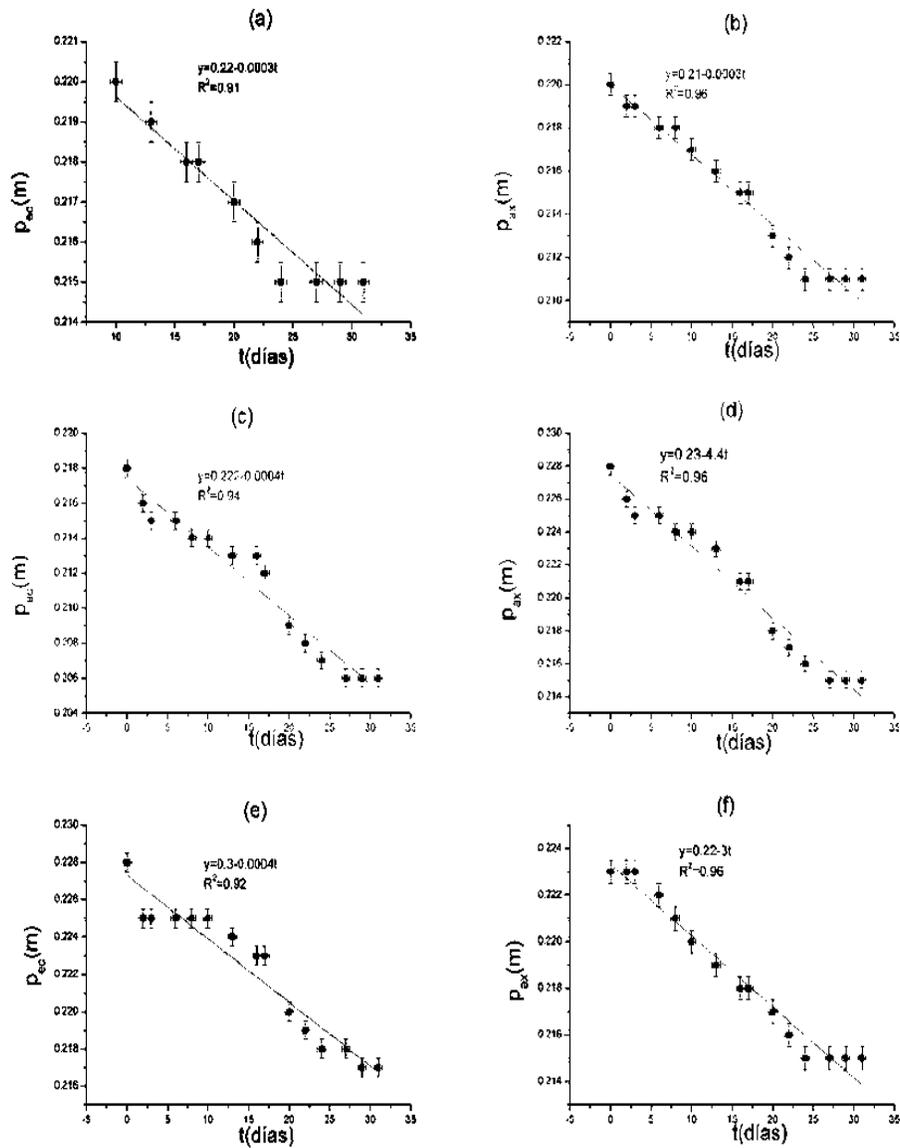


Figura 3.9: Variación del perímetro ecuatorial p_{ec} y del perímetro axial p_{ax} para la manzana Rayada chilena ((a) y (b)), para la manzana Golden ((c) y (d)) y para la manzana Chihuahua ((e) y (f)). Las figuras de lado izquierdo y derecho usan el modelo lineal.

En las Figs. 3.10-3.13 se presentan las variaciones temporales para la masa, la frecuencia y el índice de firmeza para la guayaba y la manzana, tanto en condiciones de madurez como de no madurez. Los resultados presentados corresponden al promedio de tres frutos de cada variedad. En las figuras se muestran también las ecuaciones de ajuste y los coeficientes de correlación respectivos, obtenidos con el programa comercial Origin (versión 8.0).

En el caso de las guayabas y manzanas verdes, Figs. 3.10-3.11, se puede apreciar que en general el ajuste de tipo exponencial proporciona mejores resultados que el ajuste lineal, tanto para la masa, la frecuencia y el índice de firmeza. Para los frutos maduros, Figs. 3.12-3.13, se puede concluir también que en general el modelo exponencial proporciona mejores resultados de ajuste para los tres parámetros que el modelo lineal, en ambos frutos. Al igual que en el caso de los resultados para los tomates de la sección anterior, no se puede hablar de un análisis estadísticamente representativo para las guayabas y manzanas. El objetivo fundamental es simplemente mostrar de nuevo como la técnica de impacto acústico si permite discernir sobre la evolución temporal de los parámetros referidos en ambos frutos.

3.4. Índice de Firmeza para Mangos de Exportación.

Las mediciones previas que se presentaron en las dos secciones anteriores sirvieron de base para la planeación de un estudio más detallado y estadísticamente representativo de los mangos de exportación de la región de Nueva Italia. Estos resultados se describen en esta sección.

Los mangos analizados nos fueron proporcionados por APROAM (Asociación de Productores de Mango de Michoacán), con sede en Nueva Italia. La muestra total de mangos fue de 48 de la variedad Tommy, los cuales fueron tratados térmicamente (los mangos se ponen en agua caliente a 46 grados centígrados durante 110 minutos). Este tratamiento térmico lo utilizan los productores para desparasitar los frutos y cumplir con normas de

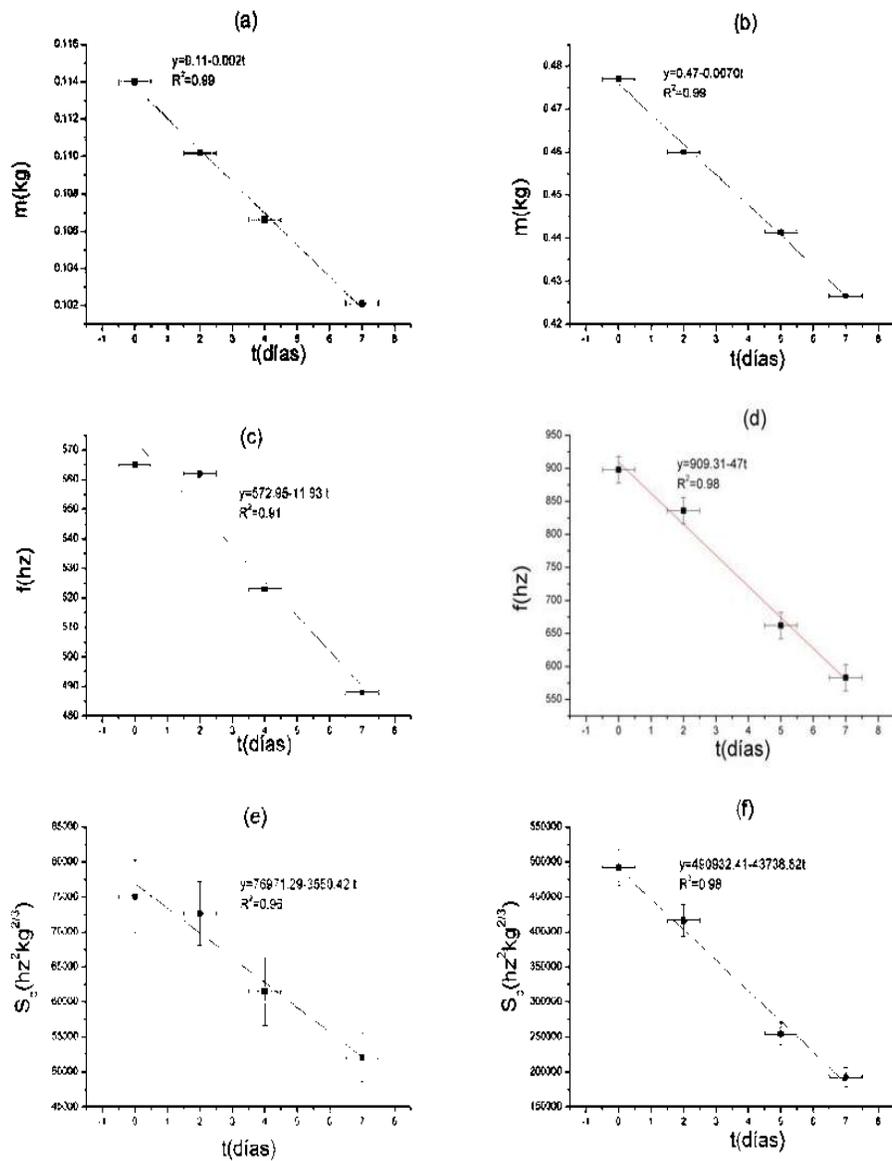


Figura 3.10: Variaciones de la masa (m), la frecuencia (f) y del índice de firmeza (S_c) para guayaba verde ((a), (c), (e)) y manzana verde ((b), (d), (f)). En este caso el modelo de ajuste fue el lineal.

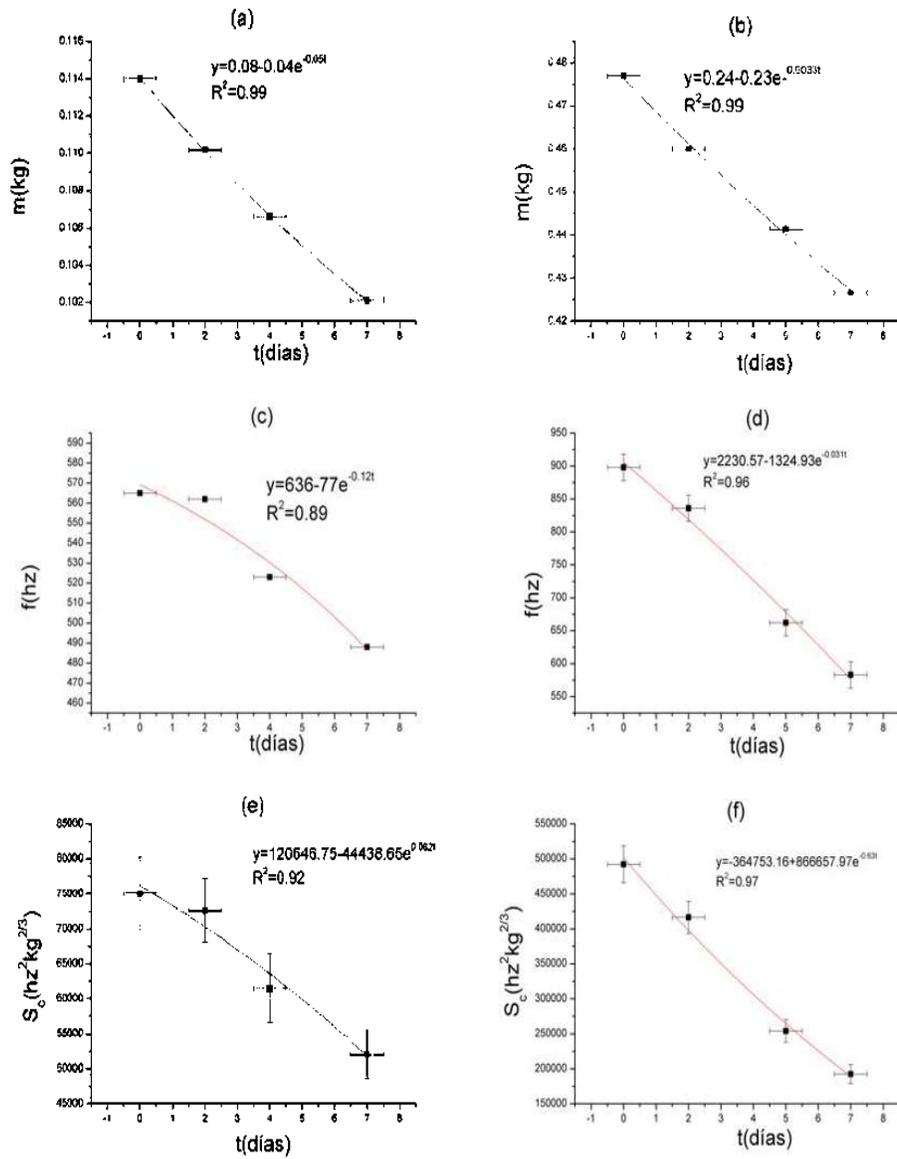


Figura 3.11: Lo mismo que en la Fig. 3.10, excepto que el modelo de ajuste es el exponencial.

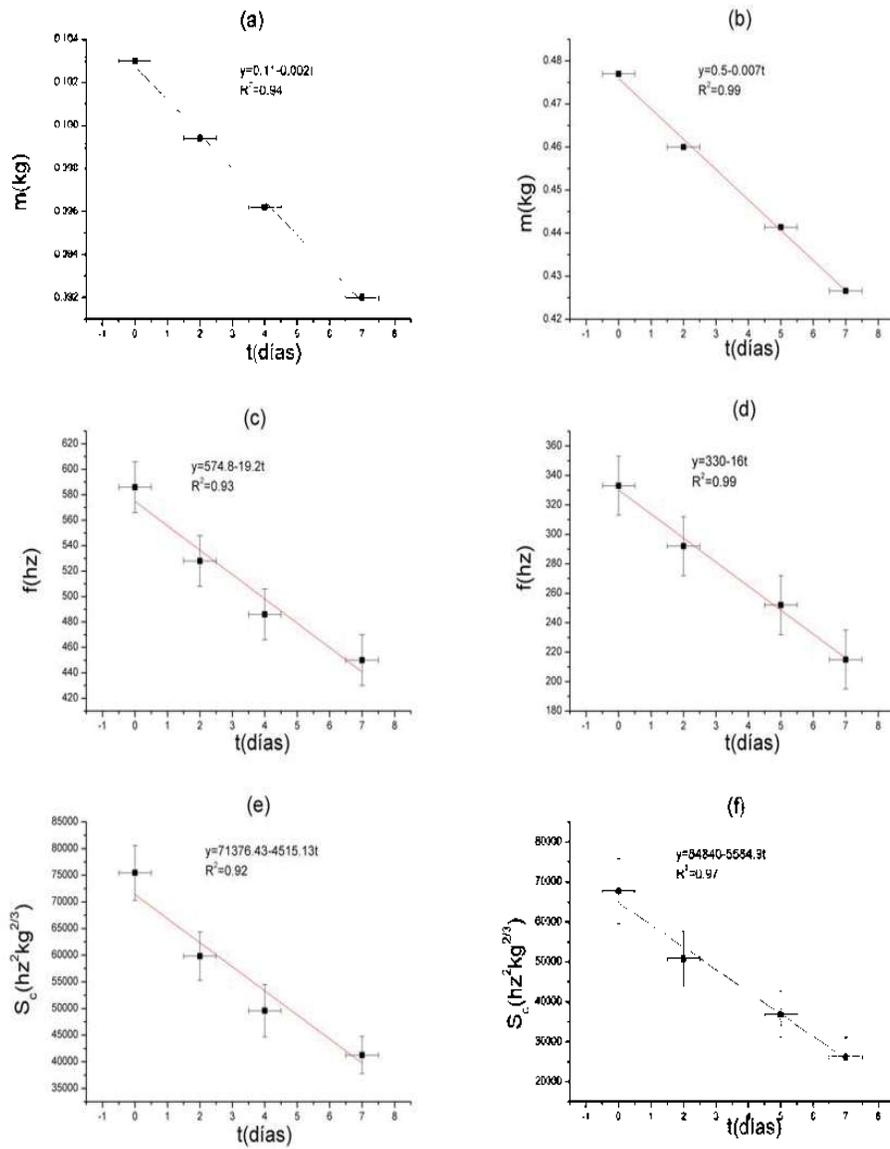


Figura 3.12: Lo mismo que en la Fig. 3.10, excepto que los frutos son guayaba madura y manzana madura. El modelo de ajuste es el lineal.

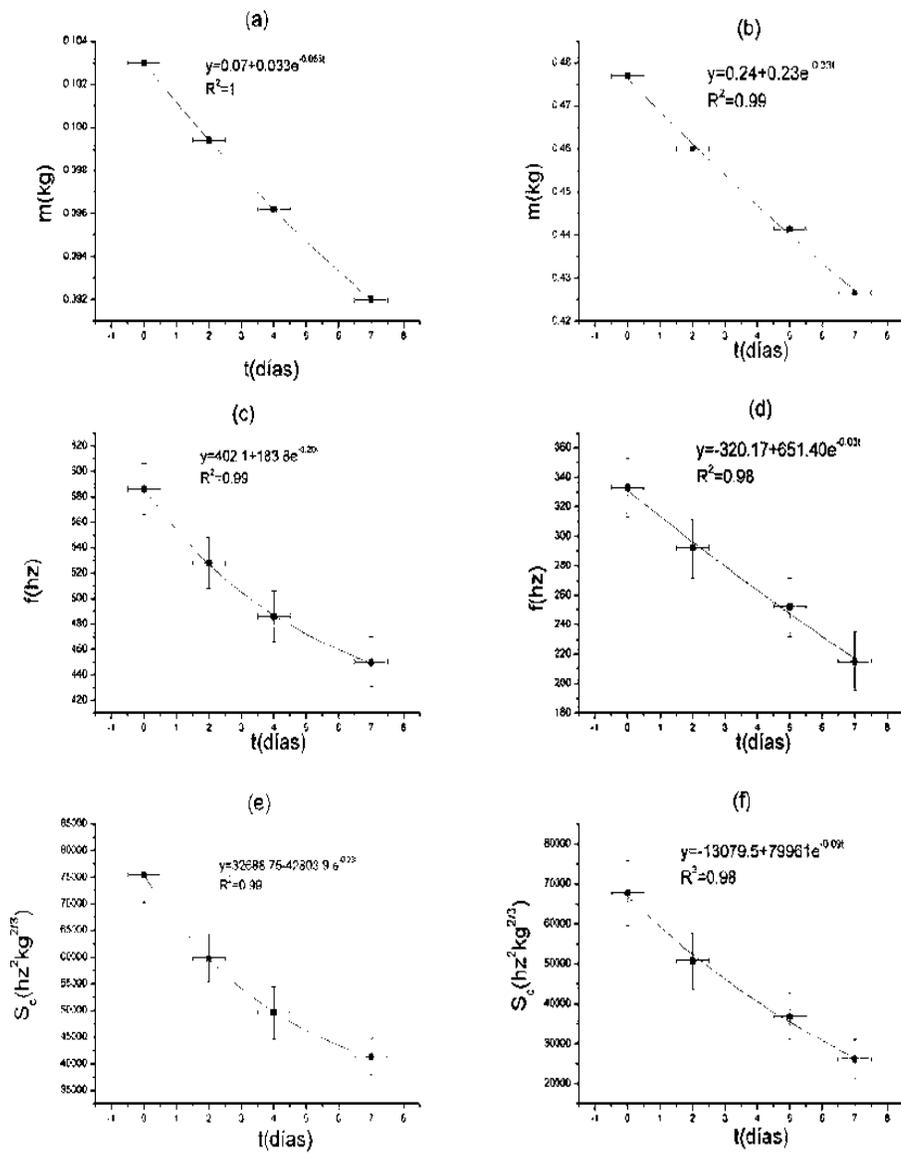


Figura 3.13: Lo mismo que en la Fig. 3.10, excepto que los frutos son guayaba madura y manzana madura. El modelo de ajuste es el exponencial.

calidad en el país donde se va a colocar el fruto, en este caso los Estados Unidos de Norteamérica. La fecha de corte fue del 2 de Mayo del 2005 y el baño térmico se hizo al día siguiente. Se eligieron al azar 24 mangos que se mantuvieron a temperatura ambiente y los 24 restantes se mantuvieron bajo refrigeración a una temperatura de 12 grados centígrados en un refrigerador de tipo doméstico. Se tomó esta temperatura porque fue la más alta que se alcanzó en el refrigerador comercial; cuando se van a exportar los mangos se mandan en carros frigoríficos a temperaturas estándares entre 16 y 18 grados centígrados. Los parámetros medidos fueron, como en los casos anteriores, la masa, la frecuencia y el índice de firmeza.

La Fig. 3.14 muestra la variación temporal de la masa, la frecuencia y el índice de firmeza para los mangos que se mantuvieron a temperatura ambiente. Los datos corresponden a los valores promedios por día de los 24 mangos. La misma presentación se tiene en la Fig. 3.15 para los mangos mantenidos bajo refrigeración. Los datos de la Fig. 3.16 corresponden a los resultados medidos de los mangos que inicialmente estuvieron bajo refrigeración durante dos semanas y después se dejaron a temperatura ambiente. Las barras de error son las estimaciones calculadas para las incertidumbres de estos parámetros, de acuerdo a los métodos estándares conocidos [34]. Conviene resaltar que la evolución temporal de un mango en particular sigue una tendencia similar a los mostrados en las Figs. 3.14-3.16.

De la Fig. 3.14 se puede notar que tanto el modelo lineal como el exponencial dan ajustes comparables para la variación temporal de la masa, la frecuencia y el índice de firmeza. Conclusiones similares se tienen para los mangos que se mantuvieron en refrigeración, Fig. 3.15, y que después se dejaron a temperatura ambiente, Fig. 3.16. Al comparar las variaciones de los valores promedios por día y de un solo mango se observaron similitudes en las tendencias temporales de los parámetros físicos estudiados. La pregunta que surge es cómo entender que los valores promediados por día sean suficientes para describir estadísticamente el comportamiento de la muestra original. Para comenzar a responder a esta interrogante se puede estimar primeramente la distribución de los parámetros de ajuste a y c (véanse las Ecs. (3.1) y (3.2) de todos los mangos de nuestras muestras. Estos resultados se presentan en la serie de histogramas de las Figs. 3.17-3.19. En estas figuras la línea sólida representa la estimación de una distribución normal en base al valor promedio y a la desviación estándar de los diferentes histogramas.

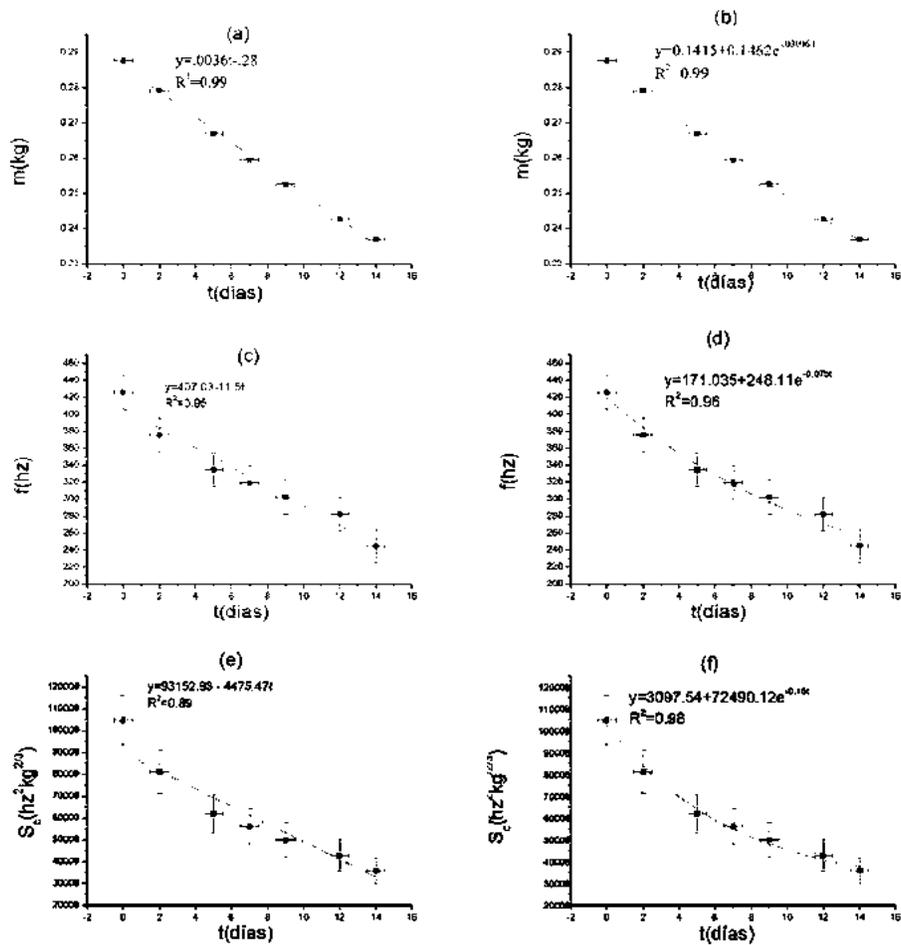


Figura 3.14: Variación temporal de los valores promediados por día para la masa ((a) y (b)), la frecuencia ((c) y (d)) y el índice de firmeza ((e) y (f)) de los mangos mantenidos a temperatura ambiente. Las gráficas de lado izquierdo corresponden a las de un ajuste del tipo lineal y las del lado derecho a un ajuste exponencial.

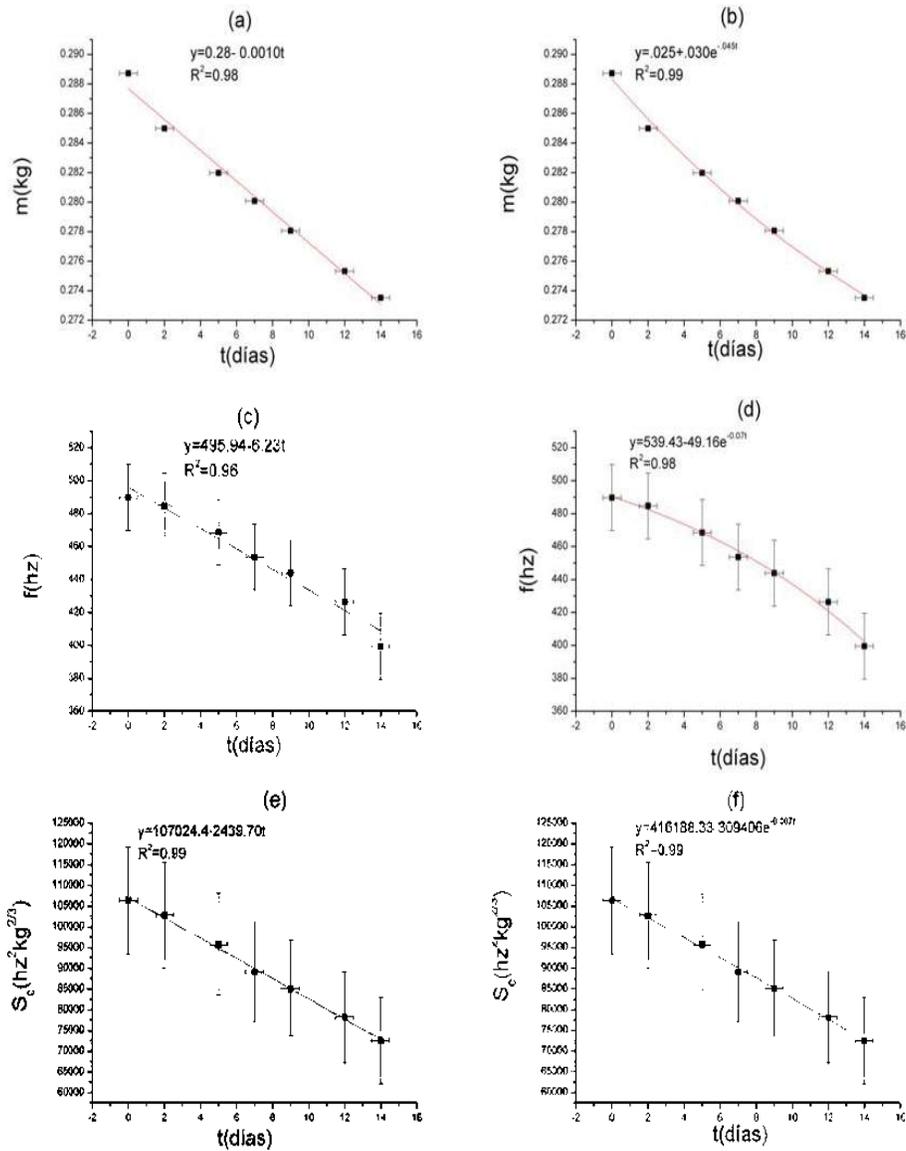


Figura 3.15: Variación temporal de los valores promediados por día para la masa ((a) y (b)), la frecuencia ((c) y (d)) y el índice de firmeza ((e) y (f)) de los mangos mantenidos a una temperatura de refrigeración de 12 grados centígrados. Las gráficas de lado izquierdo corresponden a las de un ajuste del tipo lineal y las del lado derecho a un ajuste exponencial.

Como se puede observar de estas figuras, los dos ajustes muestran buena concordancia en el caso del índice de firmeza y la frecuencia; en el caso de la masa es evidente como el modelo exponencial presenta una menor dispersión en la distribución. Esto confirma el comportamiento esperado de la tendencia de los datos sobre los valores promediados de estos parámetros mostrados en las Figs. 3.14-3.16. Sin embargo, al comparar los histogramas con las predicciones de las tendencias normales respectivas, nos conduce a concluir de que se debe disponer de un enfoque estadístico más apropiado. Después de todo los parámetros analizados cambian con el tiempo y es de esperarse que las mediciones de un día a otro estén correlacionadas. Resulta por tanto más adecuado investigar cómo son las variaciones por día de la muestra total. El procedimiento elegido para realizar esto fue el método de Shapiro-Wilk.

La prueba de Shapiro-Wilk es un método de ajuste que se utiliza para comprobar si ciertos datos determinados (x_1, x_2, \dots, x_n) han sido extraídos de una población normal [35]. Los parámetros de distribución se usan para muestras pequeñas ($n < 50$). Un contraste de ajuste tiene como objetivo comprobar si con base en la información suministrada por una muestra se puede aceptar que la población de origen sigue una determinada distribución de probabilidad, en nuestro caso, la distribución normal. El programa Origin tiene incluido entre sus herramientas estadísticas esta prueba de normalidad de Shapiro-Wilk. Básicamente lo que proporciona el programa es un histograma de la muestra analizada con su respectiva predicción de distribución normal y un valor numérico (conocido como estadístico de Shapiro-Wilk) que entre más cercano sea a uno es un indicio de que la distribución de nuestra muestra se acerca más a una distribución normal [35].

En las Figs.3.20-3.22 se presentan los resultados obtenidos al aplicar la prueba de normalidad de Shapiro-Wilk, con el propósito de mostrar la normalidad o no del conjunto de datos. La serie de histogramas mostrados (B, C ..., H) en cada caso corresponden a los diferentes días de medición; B representa el primer día y H el último día.

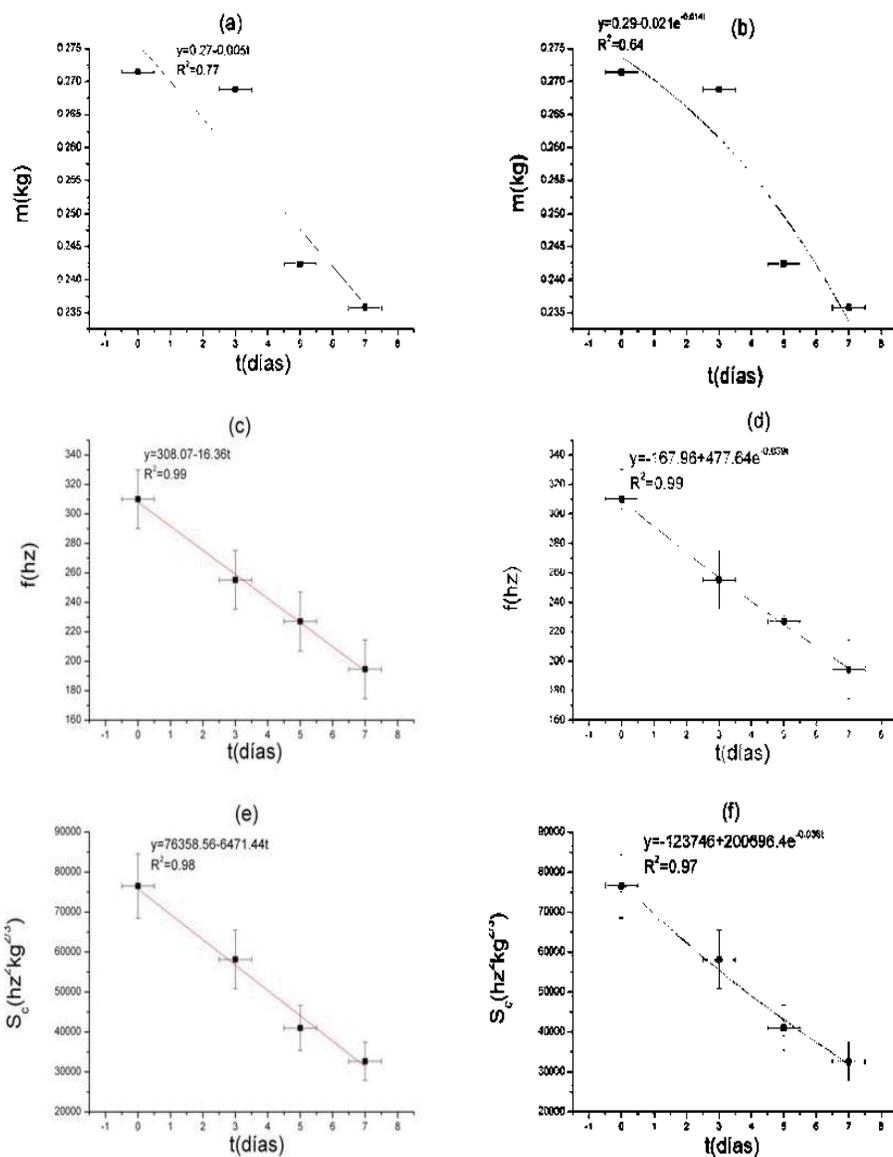


Figura 3.16: Variación temporal de los valores promediados por día para la masa ((a) y (b)), la frecuencia ((c) y (d)) y el índice de firmeza ((e) y (f)) de los mangos mantenidos inicialmente a temperatura de refrigeración de 11 grados centígrados, y después mantenidos a temperatura ambiente. Las gráficas de lado izquierdo corresponden a las de un ajuste del tipo lineal y las del lado derecho a un ajuste exponencial.

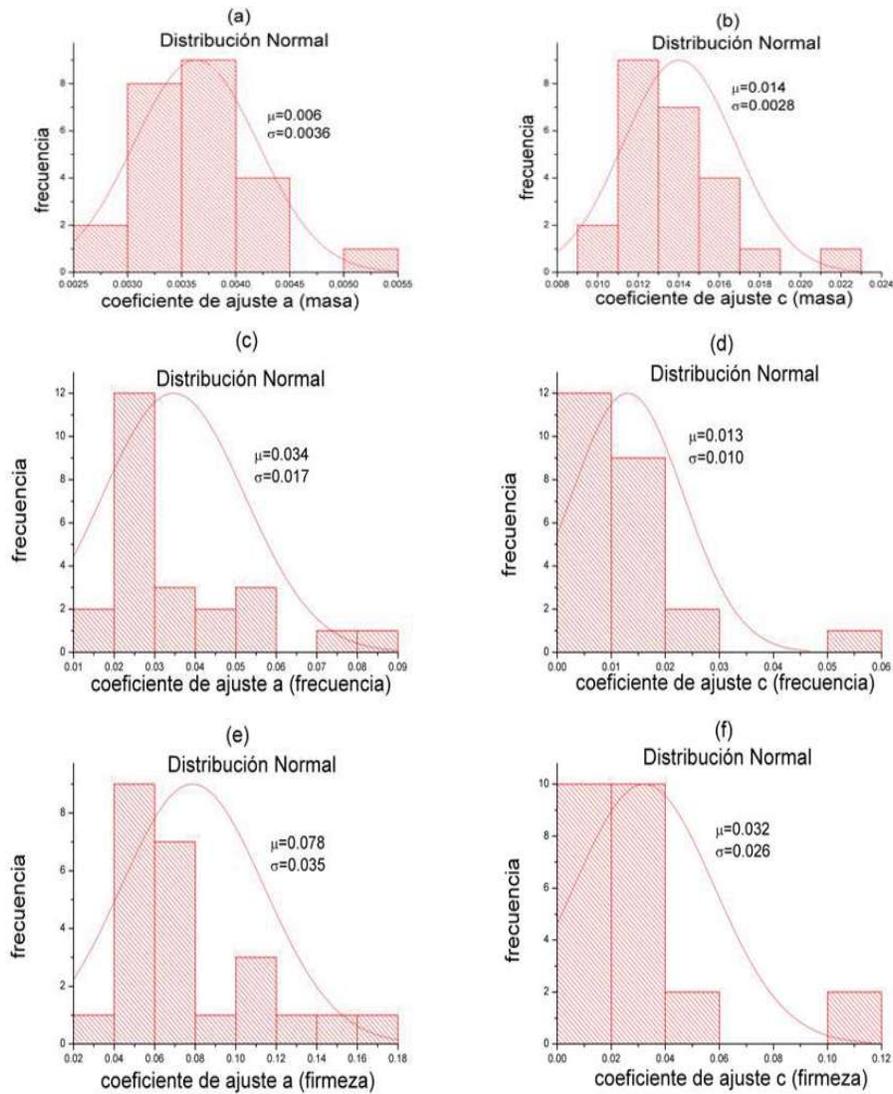


Figura 3.17: *Histogramas de la distribución de los coeficientes de ajuste lineal a y exponencial c, para la muestra de mangos mantenidos a temperatura ambiente, para: la masa ((a) y (b)), la frecuencia ((c) y (d)) y el índice de firmeza ((e) y (f)). Las gráficas de lado izquierdo corresponden a las de un ajuste del tipo lineal y las del lado derecho a un exponencial.*

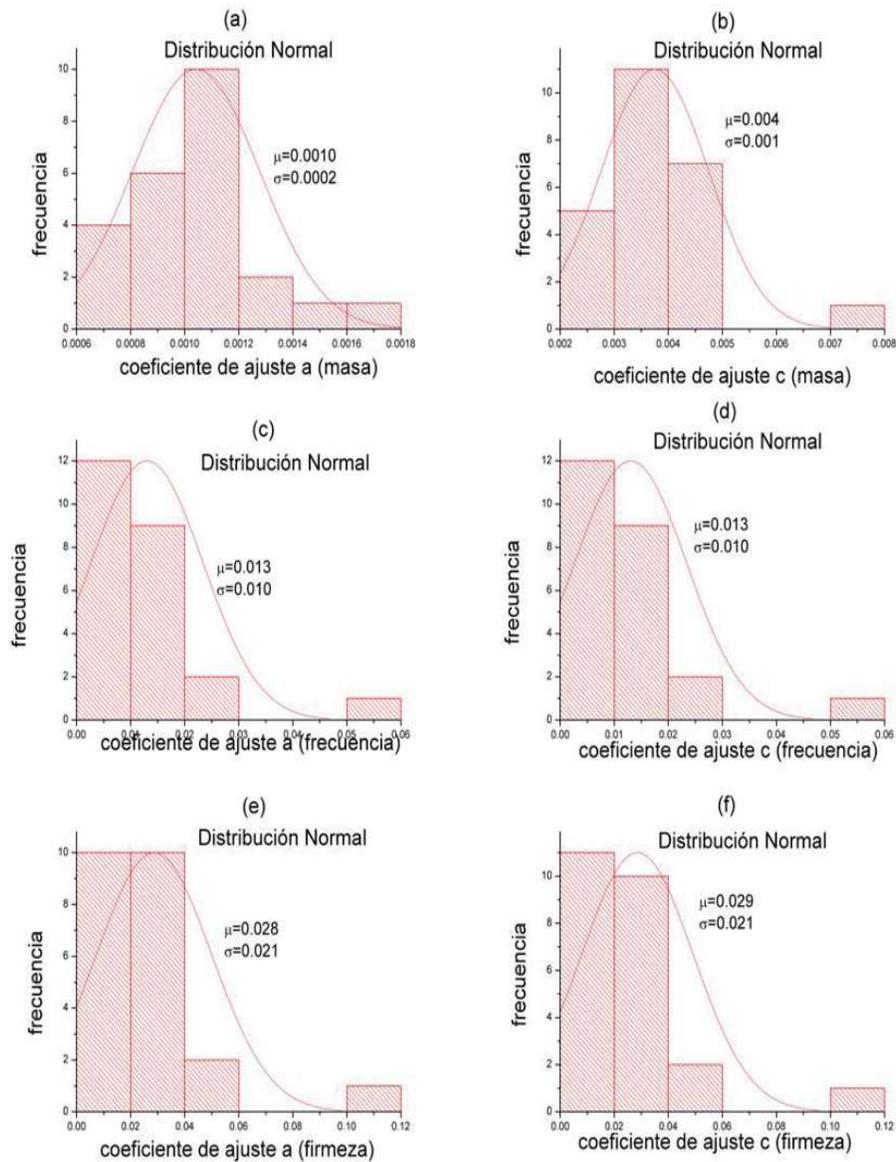


Figura 3.18: *Histogramas de la distribución de los coeficientes de ajuste lineal a y exponencial c, para la muestra de mangos mantenidos bajo refrigeración, para: la masa ((a) y (b)), la frecuencia ((c) y (d)) y el índice de firmeza ((e) y (f)). Las gráficas de lado izquierdo corresponden a las de un ajuste del tipo lineal y las del lado derecho a un exponencial.*

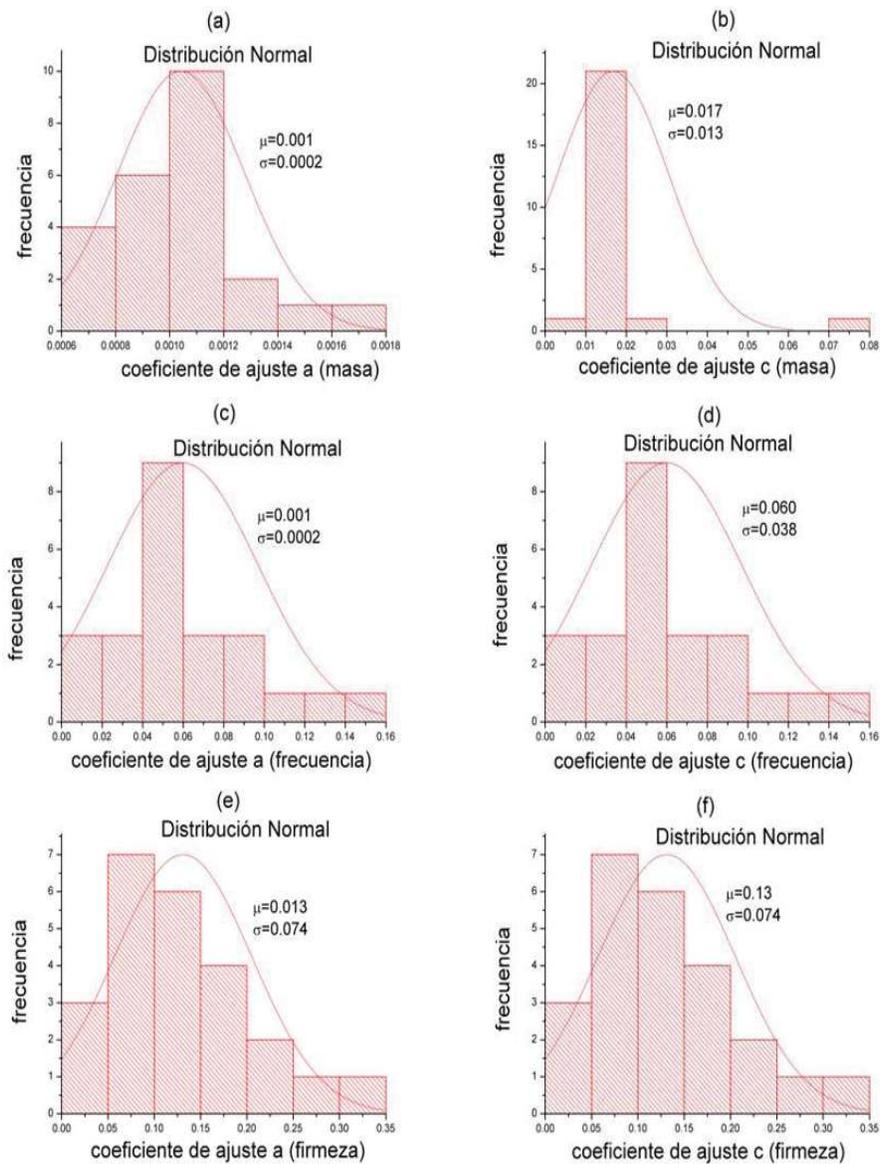


Figura 3.19: *Histogramas de la distribución de los coeficientes de ajuste lineal a y exponencial c, para: la muestra de mangos mantenidos inicialmente bajo refrigeración y después puestos a temperatura ambiente, para la masa ((a) y (b)), la frecuencia ((c) y (d)) y el índice de firmeza ((e) y (f)). Las gráficas de lado izquierdo corresponden a las de un ajuste del tipo lineal y las del lado derecho a un exponencial.*

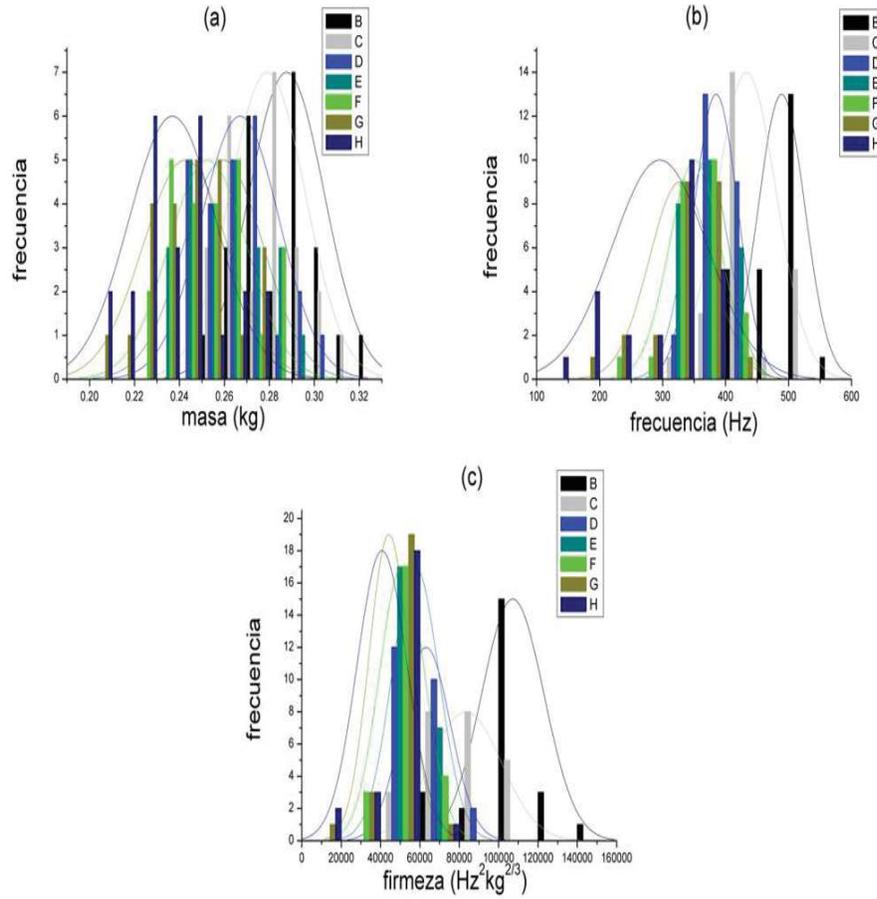


Figura 3.20: Resultados al aplicar la prueba de Shapiro-Wilk para la masa (a), la frecuencia (b) y el índice firmeza (c), de los mangos mantenidos a temperatura ambiente.

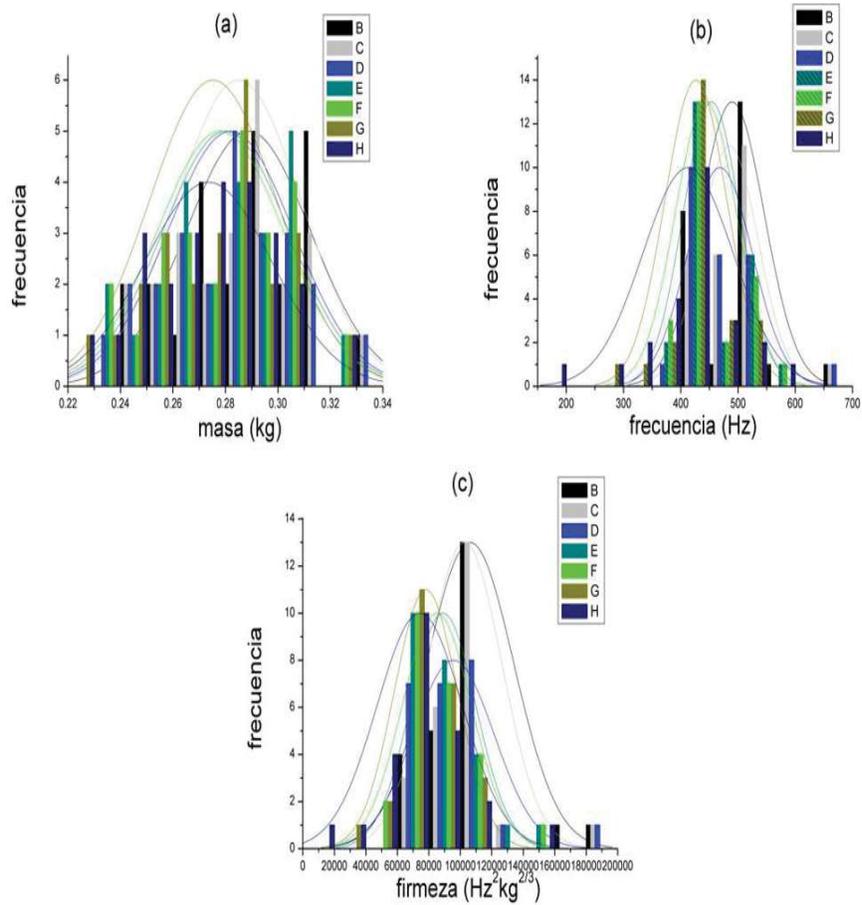


Figura 3.21: Resultados al aplicar la prueba de Shapiro-Wilk para la masa (a), la frecuencia (b) y el índice firmeza (c), de los mangos mantenidos bajo refrigeración.

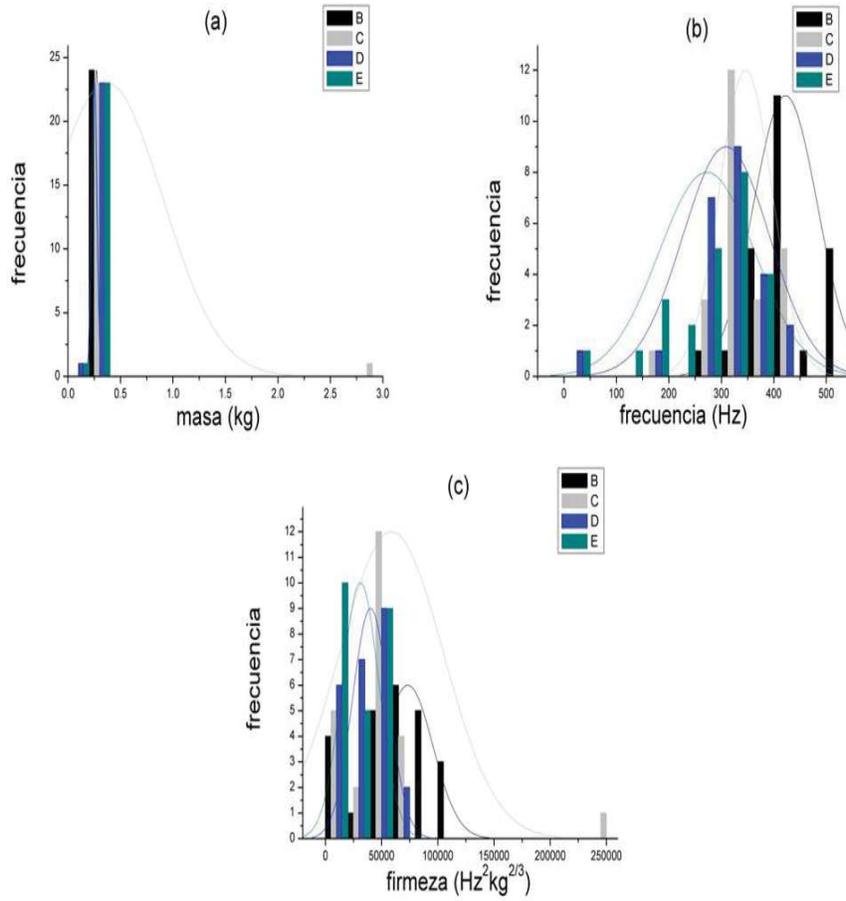


Figura 3.22: Resultados al aplicar la prueba de Shapiro-Wilk para la masa (a), la frecuencia (b) y el índice firmeza (c), de los mangos mantenidos inicialmente bajo refrigeración y luego expuestos a temperatura ambiente.

Al observar los resultados mostrados por la Fig. 3.20 para el caso de los mangos mantenidos a temperatura ambiente se puede notar que las distribuciones multivariadas se acercan a una distribución normal. Conclusiones similares se pueden inferir para los casos de los mangos mantenidos a temperatura de refrigeración, Fig. 3.21, y para el caso de los mangos mantenidos inicialmente en refrigeración y después expuestos a temperatura ambiente, Fig. 3.22.

Los resultados mostrados por las Figs. 3.20- 3.22 nos llevan a concluir que las distribuciones de nuestras muestras siguen una distribución del tipo normal. Para enfatizar estas conclusiones, en la tabla 3.1 se muestran los resultados proporcionados por el programa Origin, para una significancia de 0.05. W es el estadístico de Shapiro-Wilk mencionado anteriormente. Los valores de W entre más cercanos sean a 1 es un indicativo de que la muestra obedece una distribución normal.

Los resultados derivados del análisis estadístico basados en la prueba de Shapiro-Wilk nos muestran que la evolución temporal de los valores promedio por día y de la evolución individual de un mango son equivalentes. Estos resultados también explican que el modelo exponencial resulta adecuado para ajustar la evolución temporal de los tres parámetros físicos estudiados: masa, frecuencia e índice de firmeza.

Cuadro 3.1: Resultados obtenidos al aplicar la prueba de normalidad de Shapiro-Wilk, para los mangos a temperatura ambiente (TA), en refrigeración (R) y para los mangos mantenidos inicialmente en refrigeración y luego expuestos a temperatura ambiente (RTA). W_m , W_f y W_{Sc} son los estadísticos para la masa m , la frecuencia f y el índice de firmeza Sc , respectivamente.

Tamaño de la muestra (TA)	W_m	W_f	W_{Sc}
24	0.97452	0.83401	0.92532
24	0.96845	0.87385	0.89269
24	0.95975	0.85519	0.90863
24	0.96665	0.85582	0.87035
24	0.96564	0.81269	0.92959
24	0.97647	0.81269	0.87551
24	0.97609	0.82903	0.85571
Tamaño de la muestra (R)	W_m	W_f	W_{Sc}
24	0.96971	0.80009	0.83639
24	0.97244	0.81385	0.81009
24	0.97857	0.87191	0.83563
24	0.98200	0.92061	0.93855
24	0.98469	0.92736	0.9384
24	0.98833	0.92589	0.97414
24	0.9891	0.94927	0.96665
Tamaño de la muestra (RTA)	W_m	W_f	W_{Sc}
24	0.99027	0.94271	0.96683
24	0.94667	0.91011	0.53184
24	0.98922	0.79605	0.96342
24	0.98892	0.8974	0.95075

Capítulo 4

Conclusiones

El objetivo de esta tesis fue usar la técnica de impacto acústico para caracterizar el índice de firmeza de frutos. De los resultados presentados en el capítulo 3 podemos concluir los siguientes puntos:

- La técnica de impacto acústico resultó ser una técnica fácil de instrumentar y utilizar para medir el índice de firmeza. Se aplicó la técnica a diferentes tipos de frutos y la cuantificación de la evolución temporal del índice de firmeza se pudo explicar mediante un modelo lineal y exponencial. En términos generales el modelo exponencial resultó aceptable al momento de ajustar las mediciones experimentales.
- Se investigó la variación temporal de la masa, la frecuencia y el índice de firmeza. En general, el modelo de ajuste exponencial fue aceptable, ya que observamos de que a medida de que transcurre el tiempo hay una disminución gradual de los datos, sobre todo en el análisis de los mangos en donde se tenía una muestra estadística representativa. Esto es importante, ya que permite disponer de coeficientes de ajuste de estos parámetros a medida de que transcurre el tiempo, lo cual se puede utilizar en problemas de simulación de estos parámetros a partir de una cierta condición dada. La importancia de la determinación del índice de firmeza radica en que proporciona un factor de calidad del que se puede predecir su comportamiento para un fruto en particular, desde que se corta y hasta que se almacena para ser exportado (etapa postcosecha).
- Los estudios preliminares presentados en el capítulo 3, no constituyen

resultados estadísticamente representativos, sin embargo, nos sirvieron de base para analizar en detalle los parámetros de nuestro interés (masa, frecuencia e índice de firmeza) para los mangos de la región de Nueva Italia.

- Un resultado esencial de esta tesis, y que en la literatura no se ha reportado, es el análisis estadístico de los parámetros masa, frecuencia e índice de firmeza para que se tenga un control de calidad del fruto. El análisis univariado basado en la prueba de normalidad de Shapiro-Wilk que se utilizó arrojó resultados importantes, ya que la evolución temporal de un solo mango y de los valores promedio por día de la muestra proporcionan tendencias similares, por lo que podemos utilizar el valor promedio por día de nuestra muestra para estudiar la evolución temporal de los parámetros relevantes: masa, frecuencia e índice de firmeza. En este sentido, estos resultados son originales. Sin embargo, el hecho de que sea lo mismo hacer un estudio univariado de un solo mango que hacerlo de toda la población, no garantiza que esto suceda con la evolución temporal de las muestras ya que las mediciones de un día a otro están correlacionadas a lo largo del tiempo. Por tanto, se requiere de un estudio más completo basado en un análisis multivariado, en donde las variables de interés corresponden al historial por día de la muestra. No obstante, este análisis queda fuera del alcance de esta tesis. Este estudio es fundamental si se pretende instrumentar algoritmos de clasificación que estén basados en redes neuronales y bayesianas.
- Desde luego que la técnica de impacto acústico se puede aplicar a otras clases de frutos, como por ejemplo, la guayaba de la región de Zitácuaro. Se puede usar esta técnica para catalogar el índice de firmeza de lotes para exportación, con un enfoque estadístico apropiado como el que se usó para los mangos.

Bibliografía

- [1] Abbott J. A., Lu, R., Upchurch, B. L. and R. L. Stroshine. 1997. Technologies for Non destructive Quality Evaluation of Fruits and Vegetables. En: Horticultural Reviews, John Wiley and Sons, Inc., New York. J. Janick Ed., Vol. **20**:1-120.
- [2] Abbott J.A. 1999. Quality measurement of fruits and vegetables. Postharvest Biol.Technology., **15**:207-225.
- [3] Baoping J. 1999. Non destructive technology for fruit grading. Proc. of the International Conference on Agricultural Engineering, Beijing, China.
- [4] Finney E. E. and J. A. Abbott. 1978. Methods for testing the dynamic mechanical response of solid foods. J. Food Quality., **2**:55-74.
- [5] Aranda J. I., Arroyo, G., y A. Baltazar. 2004. Técnicas de control de calidad no destructivas aplicadas a la industria agrícola. Ciencia Nicolaita, **39**:217-226.
- [6] Chávez-Franco S. H., Vázquez-García, E., y C. Saucedo-Veloz. 2000. Propiedades biomecánicas de frutos de zarzamora. Agrociencia, **34**:329-335.
- [7] Mulet A., Benedito, J., Bon, J. and Sanjuan, N. 1999. Low intensity ultrasonics in food technology. Food Sci. Technol. Int., **5**:283-297.
- [8] Mizrach A., N. Galili, and G. Rosenhouse. 1989. Determination of fruit and vegetable properties by ultrasonic excitation. Trans. Amer. Soc. Agr. Eng., **32**:2053-2058.
- [9] Mizrach A., N. Galili, and G. Rosenhouse. 1994. Determining quality of fresh products by ultrasonic excitation. Food Tech., **48**:68-71.

- [10] Mizrach A. 2000. Determination of avocado and mango fruit properties by ultrasonic technique. *Ultrasonics*, **38**:717-722.
- [11] Abbott J. A., G. S. Bachman, N. F. Childers, J. V. Fitzgerald, and F. J. Matuski. 1968. Sonic techniques for measuring texture of fruits and vegetables. *Food Technol.*, **22**:101-112.
- [12] Cooke J. R. 1972. An interpretation of the resonant behavior of intact fruits and vegetables. *Trans. Amer. Soc. Agr. Eng.*, **15**:1075-1080.
- [13] Guillén Gallegos M. C. 2008. Modelación matemática de la respuesta acústica de frutos. Tesis de Licenciatura, Facultad de Ciencias Físico-Matemáticas, UMSNH.
- [14] Bejcek L. Grátz, P. and Klusacek, S. 2003. Measuring mechanical properties of fruits by frequency response. Unpublished.
- [15] Chen P. 2000. Application of elastic theory to high-speed impact sensing of fruits. No publicado.
- [16] Shmulevich I., Ben-Arie, R., Sendler, N., and Y. Carmi. 2003. Sensing technology for quality assessment in controlled atmospheres. *Post. Biol. Technol.*, **29**:145-154.
- [17] Duprat, F., Grotte, M., Pietri, E., and D. Loonis. 1997. The acoustic impulse response method for measuring the overall firmness of fruit. *J. Agric. Eng. Res.*, **66**:251-259.
- [18] Nahir D., Z. Schmilovitch, and B. Ronen. 1986. Tomato grading by impact for response. *Amer. Soc. Agr. Eng.* , paper **No.86-3028**.
- [19] Delwiche M. J., T. McDonald, and S. V. Bowers. 1987. Determination of peach firmness by analysis of impact forces. *Trans. Amer. Soc. Agr. Eng.*, **30**:249-254.
- [20] Baryeh E. 2000. Strength properties of avocado pear. *J. Agric. Eng. Res.*, **76**:386-397.
- [21] Wang J., Teng, B., and Y. Yu. 2004. Pear dynamic characteristics and firmness detection. *Eur. Food Res. Technol.*, **218**:289-294.

- [22] Diezma B. y M. Altisent. 2004. Propiedades acústicas aplicadas a la determinación de los parámetros de calidad interna de productos hortofrutícolas. *Revista de Acústica.*, **35**:20-25.
- [23] Arroyo G., et al. 2005. Técnica de impacto para el estudio del índice de firmeza de manzanas. *Ciencia Nicolaita*, **41**:187-196.
- [24] Nelson S. O. 1973. Electrical properties of agricultural products-a critical review. *Trans. Amer. Soc. Agr. Eng.*, **16**:384-400.
- [25] Nelson S. O. 1983. Dielectric properties of some fresh fruits and vegetables at frequencies of 2.45 to 22 GHz. *Trans. Amer. Soc. Agr. Eng.*, **26**:613-616.
- [26] Diener R. G., J. P. Mitchell, and M. L. Rhoten. 1970. Using an X-ray image scan to sort bruised apples. *Agr. Eng.*, **51**:356-361.
- [27] Tollner H. A., Affeldt, G.K., Brown, P., Chen, N., Galili, C.G., Haugh, A., Notea, Y., Sarig, T., Schatzki, Shmulevich, and B. Zion. 1994. Non-destructive Detection of Interior Voids, Foreign Inclusions and Pests. *Proc. Int. Workshop on Nondestructive Technologies for Quality Evaluation of Fruits and Vegetables*. ASAE Publication, **05-94**:86-96.
- [28] Halliday D., Resnick, R. y J. Walker. 2001. *Física*, Volumen 1, 6ta. Ed., CECSA, pp. 146-147.
- [29] Mizrach A., D. Nahir, and B. Ronen. 1992. Mechanical thumb sensor for fruit and vegetable sorting. *Trans. Amer. Soc. Agr. Eng.*, **35**:247-250.
- [30] Hahn F. 2004. Mango firmness sorter. *Biosyst. Eng.*, **83**:309-319.
- [31] G. Arroyo-Correa et al. 2005. Medición del índice de firmeza de mangos por impacto acústico a temperatura controlada. *Memorias del XLVIII Congreso Nacional de Física*, Guadalajara, Jal. Trabajo 2MD6, p. 57.
- [32] C. Patiño et al. 2005. Comparación del índice de firmeza de tomates de diferente variedad por la técnica de impacto acústico. *Memorias del XLVIII Congreso Nacional de Física*, Guadalajara, Jal. Trabajo 2MD6, p. 57.

- [33] E. Pérez López et al. 2006. Índice de firmeza de mango de exportación por la técnica de impacto acústico. Memorias del XLIX Congreso Nacional de Física, San Luis Potosí, SLP. Trabajo 1MH02, p. 37.
- [34] D. C. Baird. 1991. Experimentación: una introducción a la teoría de mediciones y al diseño de experimentos, 2da. Ed., Prentice-Hall Hispanoamericana, S. A.
- [35] Origin, Versión 8.0. 2008. OriginLab Corporation, Manual de usuario; www.genciencia.com/2006/09/28-contraste-de-shapiro-wilk.