



COLEGIO DE POSTGRADUADOS

**INSTITUCION DE ENSEÑANZA E INVESTIGACION EN CIENCIAS
AGRÍCOLAS**

CAMPUS MONTECILLO

POSTGRADO DE RECURSOS GENÉTICOS Y PRODUCTIVIDAD

FRUTICULTURA

ANÁLISIS DIGITAL DE IMÁGENES COMO HERRAMIENTA EN EL ESTUDIO DE CAMBIO COLOR DE FRUTOS EN POSTCOSECHA

GERARDO LOERA ALVARADO

T E S I S
PRESENTADA COMO REQUISITO PARCIAL
PARA OBTENER EL GRADO DE:

MAESTRO EN CIENCIAS

MONTECILLO, TEXCOCO, EDO. DE MEXICO

2014

La presente tesis titulada: “**ANÁLISIS DIGITAL DE IMÁGENES COMO HERRAMIENTA EN EL ESTUDIO DE CAMBIO COLOR DE FRUTOS EN POSTCOSECHA**”, realizada por el alumno: **GERARDO LOERA ALVARADO** bajo la dirección del Consejo Particular indicado, ha sido aprobada por el mismo y aceptada como requisito parcial para obtener el grado de:

**MAESTRO EN CIENCIAS
RECURSOS GENÉTICOS Y PRODUCTIVIDAD
FRUTICULTURA**

CONSEJO PARTICULAR

CONSEJERO



DR. SERGIO HUMBERTO CHÁVEZ FRANCO

ASESOR



DR. JOSÉ ALFREDO CARRILLO SALAZAR

ASESOR



M.C. JORGE MANUEL VALDEZ CARRASCO

Montecillo, Texcoco, Estado de México, Junio de 2014

ANÁLISIS DIGITAL DE IMÁGENES COMO HERRAMIENTA EN EL ESTUDIO DE CAMBIO COLOR DE FRUTOS EN POSTCOSECHA

RESUMEN

Gerardo Loera Alvarado, M. C., Colegio de Postgraduados, 2014

Se desarrollaron dos técnicas basadas en procesamiento de imágenes digitales; una para generar un modelo geométrico tridimensional en CAD y otra para generar una proyección geométrica en tres especies frutales (mango, naranja y pera). Se tomaron cuatro imágenes; una de la cara más ancha (0°) y el resto cada 90° . Los modelos se generaron dividiendo cada imagen en 8, 16 y 32 divisiones. La proyección geométrica se generó con la corrección de curvatura vertical y horizontal mediante el cálculo de la longitud del arco cada uno o dos píxeles. Se evaluó el efecto del tamaño de las imágenes al 50%, 100% y 200%. Se retiró la cubierta de los frutos y digitalizó, posteriormente se calculó el área externa. Se midió el volumen por desplazamiento de agua y en el modelo geométrico. Se tomaron cuatro imágenes de un fruto de mango durante su maduración en postcosecha, se corrigió la curvatura y evaluó el color cualitativamente. Los datos se analizaron con un diseño de bloques al azar para cada especie por separado. En el volumen; sólo hubo diferencia significativa en los frutos de mango modelados con 8 divisiones. En área; los modelados geométricos no fueron significativos, en las tres especies. No se encontró significancia; en mango con las imágenes al 200% cada dos píxeles, en naranja con imágenes al 100% y 200% cada píxel y en pera con imágenes al 100% y 200% cada píxel y al 50% cada dos píxeles. En volumen el error fue $<3\%$ en las tres especies. En área externa el menor error se obtuvo en los modelos con 32 divisiones y fue de 1.4%, 0.6% y 1.3% (R^2 0.98, 0.99 y 0.88), mientras que en la proyección geométrica fue de 1.6%, 1.1% y 5.4% (R^2 0.97, 0.96 y 0.07) para mango, naranja y pera. Con la técnica de proyección geométrica fue posible detectar el cambio en el color global de fruto, la proporción de un color específico y la aparición de manchas oscuras.

Palabras clave: Área, volumen, imágenes digitales, CAD, solevación, elipse, elipsoidal, modelo geométrico, proyección geométrica.

DIGITAL IMAGE ANALYSIS AS SUPPORT IN THE STUDY OF POSTHARVESTED FRUIT COLOR CHANGING

SUMMARY

Gerardo Loera Alvarado, M. C., Colegio de Postgraduados, 2014

Two techniques based on digital image processing were developed; to generate a 3D geometric model in CAD and other one to generate a geometric projection in three fruit species (mango, orange and pear). Four images were taken; one of the widest side (0°) and the others rotating fruit 90° . The models were generated dividing each image in 8, 16 and 32 slices (sections). The geometric projection was generated by correcting its vertical and horizontal curvature by calculating their arc length pixel by pixel or each two pixels. The effect of using several sizes of the images (resolution) at 50%, 100% and 200% of its original size was evaluated. Fruit's skin was removed and scanned to calculate its area. Volume of fruit was measured by water displacement using the geometrical model. Four images of a mango fruit were taken during its ripening process, the images were processed by geometric projection, and color was qualitatively analyzed. Data were analyzed using a randomized block design for each kind of fruit separately. In relation to volume; there was only significant difference when modeled with 8 divisions (slices). Area showed that geometric modeling were not significant in all of them. Not significance was found; in mango, using fruit images at 200% every two pixels, in orange images at 100% and 200% per pixel and in pear images at 100% and 200% pixel by pixel and 50% every two pixels. Volume error was $<3\%$ in the three species. In relation to surface area the smallest error was obtained in models using 32 divisions (slices) with the following values, 1.4%, 0.6% and 1.3% (R^2 0.98, 0.99 and 0.88), while the geometric projection showed 1.6%, 1.1% and 5.4% (R^2 0.97, 0.96 and 0.07) for mango, orange and pear respectively. In images analyzed by geometric projection, color changes, and portions of the skin spots colored due to maturation or senescence were detected.

Keywords: Area, volume, digital image, CAD, lofting, ellipse, ellipsoidal, geometric model, geometric projection.

AGRADECIMIENTOS

A la **vida** por ponerme en el lugar correcto en el momento preciso.

Al **Colegio de Postgraduados** por darme la oportunidad de continuar con mi preparación.

Al **Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT)** por la beca otorgada para la realización de mis estudios.

A mi consejero el **Dr. Sergio Humberto Chávez Franco**, por el enfoque creativo, orientación, seguimiento y supervisión continúa durante la realización de este trabajo y gran calidad profesional y humana.

Al **Dr. José Alfredo Carrillo Salazar**, por su acertada visión crítica y científica, por sus valiosas aportaciones a la investigación, sus conocimientos compartidos y su gran calidad humana.

Al **M.C. Jorge Manuel Valdez Carrasco** por su gran instrucción en edición de imágenes, por su paciencia y motivación durante la asesoría y su gran calidad humana.

Al **M.C. David Jaén Contreras** por su participación como sinodal.

A mis amigos: Elena, Laura, Belem, Rocío, Fernando, Michel, Jérica, César, Alma Rosa, Memo, Reyes, Ángeles y Gerardo que contribuyeron a su manera durante mi investigación.

DEDICATORIA

A mis hijos Samantha y Sebastián que siempre han sido mi principal fuerza y motivación.

A mi esposa Cristal Natali Zenteno Cruz por tu apoyo constante, amistad y amor incondicional.

A mis padres Carmelo y Genoveva porque siempre me enseñaron a trabajar duro por mis sueños y por los valores que me inculcaron que ahora son el pilar de mi vida.

A mis Hermanos: Isidro, Esperanza, Felipe, Ignacio, Elena y Andrea que sus consejos me ayudaron a llegar hasta donde estoy.

A mis sobrinos Miriam, Brisa, Citlaly y Emiliano, siempre estaré con ustedes.

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1. Diseño de goniómetro y equipo real. 1(a, b, c y d).- Tornillos de estructura. 2.- Base de madera. 3.-cámara digital. 4.-Transportador. 5.-Tripie. 6.-Fruto. 7.-Difusor de luz. 8.-Fondo negro	13
Figura 2.2. Programa de apoyo para la medición de diámetros del fruto. 1.-Introducción de la altura del fruto. 2.-Número de divisiones y 3.-Factor de conversión entre pixeles y centímetros.	16
Figura 2.3. Ecuación general de la elipse con centro fuera del origen y constitución del fruto por elipses sobrepuestas verticalmente.	17
Figura 2.4. Procedimiento general para el cálculo de área total de los frutos. 1.-Extracción de cubierta externa. 2.-Digitalización. 3.-Eliminación del fondo. 4.-Cálculo de área total.	18
Figura 2.5. Área calculada en modelo con 8 divisiones y área medida por extracción en las tres especies evaluadas, donde “ y_m ” es regresión para mango, “ y_n ” regresión para naranja y “ y_p ” regresión para pera.	23
Figura 2.6. Área calculada en modelo con 16 divisiones y área medida por extracción en las tres especies evaluadas, donde “ y_m ” es regresión para mango, “ y_n ” regresión para naranja y “ y_p ” regresión para pera.	23
Figura 2.7. Área calculada en modelo con 32 divisiones y área medida por extracción en las tres especies evaluadas, donde “ y_m ” es regresión para mango, “ y_n ” regresión para naranja y “ y_p ” regresión para pera.	24
Figura 2.8. Volumen calculado en modelo con 8 divisiones y medido por desplazamiento de agua en las tres especies evaluadas, donde “ y_m ” es regresión para mango, “ y_n ” regresión para naranja y “ y_p ” regresión para pera.	24
Figura 2.9. Volumen calculado en modelo con 16 divisiones y medido por desplazamiento de agua en las tres especies evaluadas, donde “ y_m ” es regresión para mango, “ y_n ” regresión para naranja y “ y_p ” regresión para pera.	25
Figura 2.10. Volumen calculado en modelo con 32 divisiones y medido por desplazamiento de agua en las tres especies evaluadas, donde “ y_m ” es regresión para mango, “ y_n ” regresión para naranja y “ y_p ” regresión para pera.	25

Figura 3.1. Procedimiento general para la obtención de la proyección geométrica del fruto, donde: 1) Imagen tomada a 0°. 2) Imagen tomada a 90°. 3) Elipse formada por el diámetro máximo en ambas imágenes. 4) Corrección de curvatura vertical en imagen tomada a 0°. 5) Corrección de curvatura en imagen tomada a 90° y 6) Proyección geométrica obtenida por corrección de curvatura vertical y horizontal en imagen tomada a 0°.....	33
Figura 3.2. Comportamiento del tiempo de proceso de acuerdo a las dimensiones de la imagen, la línea continua representa la interpolación pixel por pixel y la línea punteada la interpolación cada dos pixeles.	35
Figura 3.3. Comportamiento del error relativo medio de acuerdo con las dimensiones de la imagen y método de interpolación en cada especie (mango: MNG, naranja: NRJ y pera: PER). La línea continua representa la interpolación pixel por pixel (1x1), la línea punteada la interpolación cada dos pixeles (2x2).	38
Figura 3.5. Forma transversal elíptica de los frutos en la imagen tomada a 0°y forma vertical elíptica de los frutos en la imagen tomada a 90°, en las tres especies evaluadas.	39
Figura 3.6. Relación de área estimada por la proyección geométrica de menor error y área calculada por extracción y digitalización, en cada especie. Donde “y _m ” es regresión para mango, “y _n ” regresión para naranja y “y _p ” regresión para pera.	40
Figura 4.1. Resumen del comportamiento del color global durante el periodo de monitoreo.	47
Figura 4.2. Ejemplo de estimación de área total o fracciones de diferente color.	47
Figura 4.3. Ejemplo de detección de oscurecimiento y/o aparición de manchas.	48

ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro 2.1. Comparación de medias por Tukey ($\alpha=0.05$) para el volumen calculado por desplazamiento de agua (MDA) y modelo geométrico tridimensional con 8, 16 y 32 divisiones (8DIV, 16DIV y 32DIV). Medias dentro de la misma fila con diferente letra son estadísticamente significativas.	20
Cuadro 2.2. Resumen de resultados de área externa calculados por extracción de cubierta y con modelos geométricos tridimensionales con 8, 16 y 32 divisiones: media, desviación estándar (D. E) y error relativo medio ($ \% $).	21
Cuadro 2.3. Resumen de resultados de volumen calculado por desplazamiento de agua (Directo) y con modelos geométricos tridimensionales con 8, 16 y 32 divisiones: media, desviación estándar (D. E) y error relativo medio ($ \% $).	21
Cuadro 2.4. Resumen de parámetros de regresión (β_0 : Intersección, β_1 : Pendiente y R^2 : Coeficiente de determinación) en los métodos de modelado con 8, 16 y 32 divisiones para el área externa y volumen.	22
Cuadro 3.1. Comparación de medias por Tukey (0.05) para los métodos de cálculo de área externa en cada especie por separado. Medias con la misma letra dentro de cada fila no son estadísticamente significativas.	36
Cuadro 3.2. Resumen del error relativo medio de acuerdo a las dimensiones de la imagen para cada especie y método de interpolación.	37
Cuadro 3.4. Resumen de los parámetros de regresión para cada especie, donde (β_0 : Intersección, β_1 : Pendiente y R^2 : Coeficiente de determinación), para las tres especies evaluadas.	39

ÍNDICE GENERAL

RESUMEN	ii
SUMMARY	iii
AGRADECIMIENTOS	iv
DEDICATORIA.....	v
ÍNDICE DE FIGURAS	vi
ÍNDICE DE CUADROS	viii
INTRODUCCIÓN GENERAL	1
1. REVISIÓN DE LITERATURA	2
1.1 Datos generales de las especies evaluadas	2
1.2 Importancia del color en los productos hortícolas	3
1.3 Métodos de medición de color	3
1.4 Superficie externa en frutos	4
1.5 Imágenes digitales como herramienta en el análisis de área superficial de frutos	5
2. MODELADO GEOMÉTRICO TRIDIMENSIONAL DE FRUTOS EN CAD	11
2.1 RESUMEN	11
2.2 INTRODUCCIÓN	12
2.3 MATERIALES Y MÉTODOS	13
2.3.1 Diseño del goniómetro y establecimiento de condiciones de iluminación .	13
2.3.2 Selección de material vegetal.....	14
2.3.3 Captura de imágenes y depuración.....	14
2.3.4 Obtención de parámetros para el modelado tridimensional.....	14
2.3.5 Modelado tridimensional de frutos por solevación	16
2.3.6 Área medida por extracción de cubierta externa	17

2.3.7	Volumen medido por desplazamiento de agua.....	18
2.3.8	Diseño experimental.....	18
2.3.9	Análisis de datos	19
2.4	RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	19
2.5	CONCLUSIÓN	26
2.6	RECOMENDACIONES	26
3.	CÁLCULO DEL ÁREA EXTERNA DE FRUTOS CON EL MÉTODO PROYECCIONES GEOMÉTRICAS OBTENIDAS DE IMÁGENES DIGITALES.....	29
3.1	RESUMEN	29
3.2	INTRODUCCIÓN	30
3.3	MATERIALES Y METODOS	31
3.3.1	Selección de material vegetal.....	31
3.3.2	Captura de imágenes, depuración y escalado.....	31
3.3.3	Diseño y escritura del programa para generar la proyección geométrica..	31
3.3.4	Procesamiento de las imágenes.....	33
3.3.4.1.1	Variables medidas.....	34
3.3.4.1.2	Diseño experimental.....	34
3.3.4.1.3	Análisis de datos	34
3.4	RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	35
3.5	CONCLUSIÓN	40
3.6	RECOMENDACIONES	41
4.	POTENCIAL DE LA TÉCNICA DE PROYECCIÓN GEOMÉTRICA PARA LA ESTUDIO DE DINÁMICA DE COLOR EN FRUTOS.....	44
4.1	RESUMEN	44
4.2	INTRODUCCIÓN	44

4.3	MATERIALES Y MÉTODOS	45
4.3.1	Selección de material vegetal	45
4.3.2	Captura de imágenes, depuración y proceso	45
4.4	RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	46
4.5	CONCLUSIÓN	48
4.6	RECOMENDACIONES	48

INTRODUCCIÓN GENERAL

La apariencia externa de los productos hortícolas constituye un factor importante en la aceptación por el consumidor; dentro de la apariencia el color es un parámetro de relevancia en la selección, clasificación, asignación de algún grado de calidad, índice de madurez e indicador del momento óptimo de cosecha, lo que determina el precio de compra. Así mismo la cubierta externa o pericarpio, dependiendo del producto, es la principal barrera al intercambio de masa y energía entre el interior del fruto y el ambiente externo, por tal motivo es importante calcular con exactitud sus dimensiones (Manresa y Vicente, 2007; Lee et al., 2008; Jha et al., 2007).

Considerando la gran cantidad de formas y la irregularidad de los productos hortícolas, es difícil estimar con precisión el área externa, aunque se han desarrollado métodos apoyados en imágenes digitales para su cálculo en frutos específicos. Las imágenes digitales constituyen una herramienta útil en el análisis de superficies planas; sin embargo, los frutos son cuerpos tridimensionales, por lo tanto el área representada en una imagen digital no se aproxima al área real. Considerando este factor, se han desarrollado técnicas que proporcionan parámetros geométricos a partir de una imagen digital y con ellos regenerar el fruto tridimensionalmente para calcular su área y volumen. Así mismo, otra técnica se enfoca en la manipulación de la imagen para corregir el efecto de la curvatura de los frutos. Otra alternativa es el uso de digitalizadores tridimensionales que generan modelos fieles de los objetos en tres dimensiones, sin embargo su costo es muy elevado debido a la condición tecnológica actual (Casierra y Aguilar, 2008; Gómez-Sanchis, et al., 2008; Goñi et al., 2007, Goñi et al., 2010; Soto-Rojas, 2010).

La presente investigación se realizó con el objetivo de desarrollar una técnica de reconstrucción tridimensional de frutos con sección transversal elíptica en software de diseño asistido por computadora con apoyo de imágenes digitales y evaluar la técnica de proyección geométrica con colores reales y el comportamiento del error de acuerdo con las dimensiones de la imagen. En la investigación se desarrollaron dos programas de apoyo para extracción de diámetros y la corrección de curvatura, ambos se escribieron en *Visual Basic 2010 express*.

CAPÍTULO 1

1. REVISIÓN DE LITERATURA

1.1 Datos generales de las especies evaluadas

El cultivo de mango (*Mangifera indica* L) se ubica en las zonas de clima tropical y sub tropical, la naranja (*Citrus sinensis* L) se produce en zonas tropicales mientras el cultivo de pera (*Pyrus communis* L) se localiza en zonas de clima templado. Es lógico que los mejores precios se ubiquen en las regiones donde no existe producción, por ésta razón es necesario acondicionar, manipular y transportar los productos de la zona de producción a la de consumo.

En 2012 se produjeron 42 millones de toneladas de mango a nivel mundial, de los cuales el 36% fue aportado por la india mientras que México se ubicó en el séptimo lugar con una participación del 4%. En ese mismo año se produjeron 68 millones de toneladas de naranja donde, Brasil aportó el 26%, Estado Unidos 12% y México se ubicó en el quinto lugar con una participación de 5%. Finalmente el fruto de pera participó con 23 millones de toneladas a nivel mundial, de las cuales el 68% fue aportado por china, y México se ubicó en el lugar 43 con una aportación menor al 0.1% (FAO, 2014).

Los principales productores de mango en México para el 2012 fueron Guerrero, Nayarit, Sinaloa, Chiapas, Oaxaca y Michoacán, con una aportación conjunta del 82%, esta actividad proporcionó alrededor de 4100 millones de pesos. Por su parte el cultivo de naranja generó 6000 millones de pesos; sus principales productores fueron Veracruz, Tamaulipas, San Luis Potosí, Puebla y Nuevo León, con una aportación conjunta del 83%. Finalmente, el cultivo de pera aportó 62 millones y sólo tres estados produjeron el 83% del total: Puebla, Michoacán y Morelos (SAGARPA-SIAP, 2014).

1.2 Importancia del color en los productos hortícolas

La apariencia de un fruto es uno de los parámetros de calidad más importantes; dentro de este atributo, el color juega un papel primordial, ya que los consumidores se inclinan fuertemente por un producto de apariencia atractiva (Manresa y Vicente, 2007). El color es una característica de gran importancia en la evaluación de calidad, grado de madurez, vida postcosecha y puede utilizarse como índice de cosecha en muchos productos hortícolas (Lee et al., 2008; Jha et al., 2007). En el análisis de color de los frutos deben ubicarse dos categorías: el color de fondo, que es el predominante en toda la superficie del fruto y el color de cobertura o secundario, el cual es el que presenta en ciertas zonas del fruto y es característico de cada variedad (Valero y Ruiz, 1998).

A nivel nutricional, el color está determinado por el contenido de pigmentos en el fruto, los cuales se sintetizan conforme avanza el proceso de maduración, como los carotenoides y antocianinas, mientras que otros se hidrolizan, como las clorofilas (Gonçalves et al., 2007; Taiz, y Zeiger, 2010). Se han agrupado grupos de carotenoides de acuerdo con su color en escala CIELAB (Meléndez-Martínez et al., 2007).

1.3 Métodos de medición de color

De forma práctica, en los productos hortícolas el color se mide mediante cartas de color, pero en este método interviene la experiencia de quien realiza la medición y es una escala subjetiva. Así mismo en las bandas de selección la percepción es subjetiva y está sujeta a las condiciones de iluminación (Santos-Gomes et al., 2014). En el laboratorio, el color se mide con la ayuda de instrumentos, como los colorímetros, sin embargo estos equipos sólo tienen una pequeña área de visión (Kang et al., 2008). En la actualidad se ha recurrido a una técnica que integra una cámara digital, una computadora y software gráfico, la cual constituyen una alternativa versátil y de menor costo para medir color en la superficie de los frutos (Lv et al., 2010).

La ventaja de las imágenes digitales, es que proporcionan medidas más precisas ya que miden el color en cada uno de los píxeles que la conforman. Afshari-Jouybari y Farahnaky

(2011) mencionan que existe una correlación del 98% entre los valores de L a y b leídos en el colorímetro Hunter y valores evaluados en imágenes digitales con el software “Photoshop”. Sin embargo, dada la gran cantidad de formas geométricas que existen en las frutas y hortalizas, es necesario desarrollar metodologías que permitan reconstruir un fruto tridimensionalmente a partir de imágenes planas, con el fin de estimar el área con cambio de color, ya sea provocado por el proceso de maduración natural y/o el provocado por daños de cualquier tipo.

Actualmente se ha investigado el uso de imágenes digitales para medir color a partir de la escala RGB. Allan (2008) propuso un método para estimar el espacio de color a partir de valores RGB mediante coordenadas cilíndricas y Lee et al. (2008) un método de conversión de valores RGB en un espacio de color simple de 1D.

1.4 Superficie externa en frutos

La cubierta externa de los frutos es la principal barrera al intercambio. Los fenómenos que implican transferencia de calor o masa son dependientes de la superficie de contacto entre el fruto y el medio circundante; además, determina la aceptación por los consumidores ya que en ella encontramos indicadores de la calidad, como el color y presencia de daños de cualquier tipo que generen una coloración anormal. El área externa de figuras regulares es relativamente fácil de calcular, pero para la forma real de los frutos no existen modelos de amplia aplicación; además, un modelo que proporcione el área total no permite el cálculo de zonas específicas (Pysmenny et al., 2007; Casierra y Aguilar, 2008; Gómez-Sanchis, et al., 2008; Goñi et al., 2007, Goñi et al., 2010).

Entre los fenómenos de intercambio de materia en los frutos, se encuentra el flujo de gas a través de la cáscara o envoltente, el cual depende de la permeabilidad del gas en el medio, el espesor de la cubierta, el cambio de la presión parcial del gas y el área de contacto (Valle-Guadarrama 2003). De manera muy similar, el flujo de calor depende del espesor de la barrera, la conductividad térmica, el cambio de temperatura y el área de contacto (Amigo, 2000; Sigalés, 2003).

1.5 Imágenes digitales como herramienta en el análisis de área superficial de frutos

Las imágenes digitales pueden ser obtenidas de un escáner o una cámara, las cuales usan la radiación reflejada por un objeto para crear imágenes, mediante un chip sensible a la luz, ya sea por el mecanismo de carga-acoplada (CCD) o por dispositivos de metal-óxido complementarios (COMS). Ambos chips emiten una carga al ser golpeados por la luz y son transformados en datos de imagen para ser almacenados en la memoria de la cámara (Adair, 2004; González y Woods, 2008; Lira, 2002).

Las imágenes digitales pueden ser procesadas de acuerdo con los fines de la investigación, ya que pueden utilizarse con los colores reales realizando una “*renderización*” es decir en este contexto particular entiéndase como la eliminación del fondo con el fin de seleccionar solo la imagen del fruto, puede realizarse una “*segmentación*” o clasificación de píxeles para separar objetos o una reducción del detalle de la información, es decir pasar un grupo de píxeles a uno solo; este proceso es conocido como “*quantización*” es decir el proceso de simplificar una imagen con muchos colores a una más compacta con menos colores conservando sus características principales, entre otros procesos pertinentes para cada tipo de investigación. Existen diversos procesadores y editores de imágenes tanto de distribución libre como *GIMP*, *ImageJ*, *Image Tool* entre otros, y de distribución comercial como *Corel Draw*, *Photoshop*, *Image Pro Plus* por mencionar algunos. (Rosenfeld y Avinash, 1982; Umbaugh, 1998).

Las imágenes digitales con combinación de colores RGB son útiles para evaluar diferentes atributos de calidad en productos hortícolas, como la detección de tallos y áreas de cáliz en manzanas (Uyar y Erdogan, 2009), medición de uniformidad de color, clasificación, selección automática, y monitoreo de oscurecimiento (Mhod Jusoh, et al., 2009; Ariana y Lu, 2010; Rocha et al., 2010).

Dada la gran cantidad de forma existentes en los productos hortícolas; las imágenes digitales juegan un papel primordial, ya que pueden ser utilizadas para monitorear crecimiento, estimación de masa, área y volumen, clasificación evaluación de zonas

afectadas y generación de modelos tridimensionales (Ali Bulent, 2007; Uyar y Erdogdu, 2009; Omid et al., 2010; Soto-Rojas, 2010; Spreer y Müller, 2011; Goñi et al., 2007,2010).

Las imágenes fotográficas típicas por si solas no proporcionan información precisa sobre la superficie externa real de un fruto, ya que son una proyección plana de un objeto tridimensional, por lo tanto deben recibir un tratamiento particular de acuerdo con el objetivo del investigador. Se han desarrollado investigaciones con el uso de diferentes tipos de proyecciones para estimar áreas de cuerpos tridimensionales, como proyección geométrica en el estudio de área dañada por antracnosis en frutos de mango (Soto-Rojas, 2010), elípticas en la estimación de volumen, peso y densidad de granos de cebada y volumen en frutos de sandía (Ali Bulent, 2007; Walker, 2012) y elipsoidal lambertiana en la generación de modelos tridimensionales de frutos de cítricos (Gómez-Sanchis, et al., 2008). Según Soto-Rojas (2010) la superficie de un cuerpo tridimensional puede representarse y corregirse por medio de una proyección, basándose en su curvatura.

LITERATURA CITADA

- Adair K. J.** 2004. Fotografía digital para Dummies. 4ta edición. Editorial ST. México. 350 p.
- Afshari-Jouybari, H. and A. Farahnaky.** 2011. Evaluation of Photoshop software potential for food colorimetry. *Journal of Food Engineering* 106(2): 170-175.
- Ali Bulent, K.** 2007. Determination of watermelon volume using ellipsoid approximation and image processing. *Postharvest Biology and Technology* 45(3): 366-371.
- Allan, H.** 2008. Constructing cylindrical coordinate colour spaces. *Pattern Recognition Letters* 29(4): 494-500.
- Amigo M. P.** 2000. Termotecnia: Aplicaciones agroindustriales. Ediciones Mundi-Prensa. España. 384 p.
- Ariana, D. P. and R. Lu.** 2010. Evaluation of internal defect and surface color of whole pickles using hyperspectral imaging. *Journal of Food Engineering* 96(4): 583-590.
- Casierra, P. F. Aguilar, A. O.** 2008. Calidad en frutos de tomate (*Solanum lycopersicum* L.) Cosechados en diferentes estados de madurez. *Agronomía Colombiana*, 26: 300-307.
- FAO.** 2014. FAOSTAT Database Results. Estadísticas anuales <http://faostat.fao.org/site/567/default.aspx>
- Gómez-Sanchis, J., E. Moltó, G. Camps-Valls, L. Gómez-Chova, N. Aleixos and J. Blasco.** 2008. Automatic correction of the effects of the light source on spherical objects. An application to the analysis of hyperspectral images of citrus fruits. *Journal of Food Engineering* 85(2): 191-200.
- Goncalves, B., A. P. Silva, J. Moutinho-Pereira, E. Bacela, E. Rosa. And A. S. Meyer.** 2007. Effect of ripeness and postharvest storage on the evolution of colour and anthocyanins in cherries (*Prunus avium* L.). *Food Chemistry* 103(3): 976-984.

- González C. R. and R. E. Woods.** 2008. Digital Image Processing. 3 Ed. Prentice Hall. USA. 954 p.
- Goñi, S. M., E. Purlis and V. O. Salvadori.** 2007. Three-dimensional reconstruction of irregular foodstuffs. *Journal of Food Engineering* 82(4): 536-547.
- Goñi, S. M. and E. Purlis.** 2010. Geometric modelling of heterogeneous and complex foods. *Journal of Food Engineering* 97(4): 547-554.
- Jha, S. N., S. Chopra and A. R. P. Kingsly.** 2007. Modeling of color values for nondestructive evaluation of maturity of mango. *Journal of Food Engineering* 78(1): 22-26.
- Kang, S. P., A. R. East and F. J. Trujillo.** 2008. Colour vision system evaluation of bicolour fruit: A case study with “B74” mango. *Postharvest Biology and Technology* 49(1): 77-85.
- Lee, D.-J., J. K. Archibald, Y.-C.Chang and C. R. Greco.** 2008. Robust color space conversion and color distribution analysis techniques for date maturity evaluation. *Journal of Food Engineering* 88(3): 364-372.
- Lira – Chávez. J.** 2002. Introducción al tratamiento digital de imágenes. Fondo de cultura económica. México. 448 p.
- Lv, B., B. Li, C. Sha, J. Chen and B. Zhu.** 2009. Comparison of color techniques to measure the color of parboiled rice. *Journal of Cereal Science* 50(2): 262-265.
- Manresa, A. G. y I. Vicente.** 2007. El color en la industria de los alimentos. Libro de texto electrónico. Disponible en intranet del Instituto de Farmacia y Alimentos de la Universidad de la Habana.
- Mhod Jusoh Y. M., N. L. Chin, Y. A. Yusof and R. Abdul Rahman.** 2009. Bread crust thickness measurement using digital imaging and L a b colour system. *Journal of Food Engineering*. 94(3-4): 366-371.

- Meléndez-Martínez, A. J., G. Britton, I. M. Vicario and F. J. Heredia.** 2007. Relationship between the colour and the chemical structure of carotenoid pigments. *Food Chemistry* 101(3): 1145-1150.
- Omid, M., M. Khojastehnazhand, A. Tabatabaeefar.** 2010. Estimating volume and mass of citrus fruits by image processing technique. *Journal of Food Engineering* 100(2): 315-321.
- Rocha, A., D. C. Hauagge, J. Wainera and S. Goldenstein.** 2010. Automatic fruit and vegetable classification from images. *Computers and Electronics in Agriculture* 70(1): 96-104.
- Rosenfeld A. and K.C Avinash.** 1982. *Digital picture processing Vol. 2.* Academic Press, Inc. USA. 350 p.
- SAGARPA-SIAP.** 2014. Sistema de información agrícola y pecuaria. <http://www.siap.gob.mx/cierre-de-la-produccion-agricola-por-estado/>
- Santos-Gomes J. F., R. V. Rezende, I. A. Azara de Oliveira and F. L. Rodrigues.** 2014. Influence of illumination on the characterization of banana ripening. *Journal of Food Engineering* 120(0): 215-222.
- Sigalés B.** 2003. *Transferencia de calor técnica vol 1.* Editorial Reverté. 926 p.
- Soto-Rojas, L.** 2010. Evaluación de la severidad de antracnosis en frutos de mango usando proyecciones geométricas obtenidas a partir de imágenes digitales. Tesis. Colegio de postgraduados. México.
- Spreer, W. and J. Müller.** 2011. Estimating the mass of mango fruit (*Mangifera indica*, cv. Chok Anan) from its geometric dimensions by optical measurement. *Computers and Electronics in Agriculture* 75(1): 125-131.
- Taiz, L. and Zeiger, E.** 2010. *Plant Physiology, Fifth Edition.* Sinauer Associates. USA. 782 p.

- Umbaugh E. S.** 1998. Computer Vision and Image Processing. Prentice Hall. USA 504 p.
- Uyar, R. and F. Erdogdu.** 2009. Potential use of 3-dimensional scanners for food process modeling. Journal of Food Engineering 93(3): 337-343.
- Valero Ubierna, C. and M. Ruiz Altisent.** 1998. Equipos de medida de calidad organoléptica en frutas. Fruticultura profesional (95): 38-45.
- Valle-Guadarrama S.** 2003. Factores de variación de la atmosfera interna en frutos de aguacate (*Persea americana Mill.*) Hass. Tesis. Colegio de postgraduados. México. 152 p.
- Walker, C. K. and J. F. Panozzo.** 2012. Measuring volume and density of a barley grain using ellipsoid approximation from a 2-D digital image. Journal of Cereal Science 55(1): 61-68.

CAPÍTULO 2

2. MODELADO GEOMÉTRICO TRIDIMENSIONAL DE FRUTOS EN CAD

2.1 RESUMEN

Se desarrolló una metodología para estimar el área y volumen de tres especies frutales (10 frutos de mango “*ataulfo*”, 10 de naranja “*valencia*” y 10 de pera “*D’anjou*”) con apoyo del análisis digital de imágenes y modelos geométricos tridimensionales. Se diseñó un goniómetro para colocar los frutos verticalmente y poder girarlos sobre su eje. Se tomaron dos imágenes; una de la cara más grande (0°) y otra del fruto con un giro de 90°. Se recortaron las imágenes y se eliminó el fondo. Se desarrolló una aplicación en Visual Basic 2010 *express* para tomar lecturas del diámetro en diferentes posiciones del eje vertical, hasta completar 8, 16 y 32 divisiones, en ambas imágenes, considerando al fruto como un conjunto de elipses independientes sobrepuestas verticalmente. Las lecturas se compilaron en un “*script*” para trazos masivos en AutoCAD 2010. Por solevación “*lofting*”; se generó el modelo tridimensional y se calculó el área externa y volumen de los frutos. Se compararon los resultados con los obtenidos por medición directa; el volumen por desplazamiento de agua y el área por extracción de cubierta y digitalización. En los frutos de mango se obtuvo un error relativo medio menor a 1.5% en el cálculo del área y menor al 3.0% en el cálculo de volumen, en los frutos de naranja el error fue de 0.6% para el área y 2.4% para el volumen y en los frutos de pera el error fue 1.4% y 2.4% para área y volumen respectivamente. Se realizó un análisis de regresión y se obtuvieron valores de R^2 entre 0.87 y 0.99 para el caso del área y entre 0.89 y 0.99 para el volumen. Se utilizó un diseño de bloques al azar para cada especie por separado, se realizó un análisis de varianza y no se encontró diferencia significativa entre los métodos de cálculo de área, pero si en volumen ya que sólo los frutos de mango modelados con 8 divisiones presentaron un valor inferior al medido por desplazamiento de agua, en los frutos de naranja y pera no hubo diferencia significativa.

2.2 INTRODUCCIÓN

Los productos hortícolas presentan una gran variedad de formas, colores y tamaño entre otras características físicas, en general estos atributos son importantes en clasificación y ubicación en algún grado de calidad, lo que influye directamente en el precio de los productos (Manresa y Vicente, 2007).

Elementos físicos, como el volumen, son necesarios para el diseño de envases y procesos, clasificación manual o mecánica. Sin embargo, las formas de los productos complican su estimación directa; por esta razón se han desarrollado modelos empíricos que relacionan la longitud o el diámetro con el volumen del fruto estudiado, así mismo se han realizado investigaciones que aproximan la forma a un elipsoide para aplicar cálculos matemáticos exactos. Recientemente se ha propuesto el uso imágenes digitales para estimar el volumen y masa de frutos con forma predominantemente regular, y se han realizado investigaciones en el uso de software de diseño mecánico que proporcionan la posibilidad de estimar volumen y área externa, y finalmente el empleo de un escáner tridimensional para productos hortícolas complejos. (Ali-Bulent, 2007; Goñi *et al.*, 2010; Uyar y Erdogan, 2009; Omid, *et al.*, 2010; Spreer y Müller, 2011).

La cubierta externa de los frutos es la principal barrera al intercambio, por lo tanto cobra relevancia en cualquier proceso que implique un fenómeno de transferencia entre el interior del fruto y medio circundante; además, determina la aceptación por los consumidores, ya que en ella encontramos indicadores de la calidad, como el color y presencia de daños de cualquier tipo que generen una coloración anormal. El área externa en figuras regulares es relativamente fácil de calcular, pero para la forma real de los frutos no existen modelos de amplia aplicación (Casierra y Aguilar, 2008; Gómez-Sanchis, *et al.*, 2008; Goñi *et al.*, 2007, Goñi *et al.*, 2010).

El objetivo de este trabajo fue desarrollar una metodología para la estimación de volumen y área externa de tres especies frutales (mango, naranja y pera) mediante la generación de modelos geométricos tridimensionales, en software de diseño asistido por computadora (CAD), con ayuda del análisis digital de imágenes.

2.3 MATERIALES Y MÉTODOS

2.3.1 Diseño del goniómetro y establecimiento de condiciones de iluminación

La estimación de volumen de frutos por procesamiento de imágenes se ve afectada por la orientación del fruto y el ángulo de captura de la imagen, por lo que es necesario adquirir las imágenes con una orientación controlada (Moreda et al., 2007); para ello se diseñó un goniómetro, que es un equipo que permite conocer ángulos de giro sobre un eje en particular.

El goniómetro consta de una placa de madera de 38.0x38.0 cm con forro de terciopelo negro, ocho tornillos de 0.9525 cm de diámetro (3/8 de pulgada); 6 de 30.0 cm de largo, uno de 10.0 y uno de 12.0, un sistema de tres ejes de diseño propio y opcionalmente un sistema de sujeción superior, un transportador circular y un fondo negro de terciopelo. Se colocó la cámara en el tornillo de 12.0 cm a 20.0 cm del fruto, colocado en el sistema de tres ejes sobre el tornillo de 10.0 cm.

La iluminación es un factor relevante en la adquisición de imágenes digitales, ya que la zona oscura cercana a la periferia de los objetos dificulta el análisis (Gómez-Sanchis et al., 2008). Se colocaron dos lámparas fluorescentes de 60 watts, a 70.0 cm de distancia al sistema de soporte del fruto, con un ángulo de 45° horizontalmente respecto al centro del fruto y difusores laterales perpendiculares al fruto (Figura 2.1).

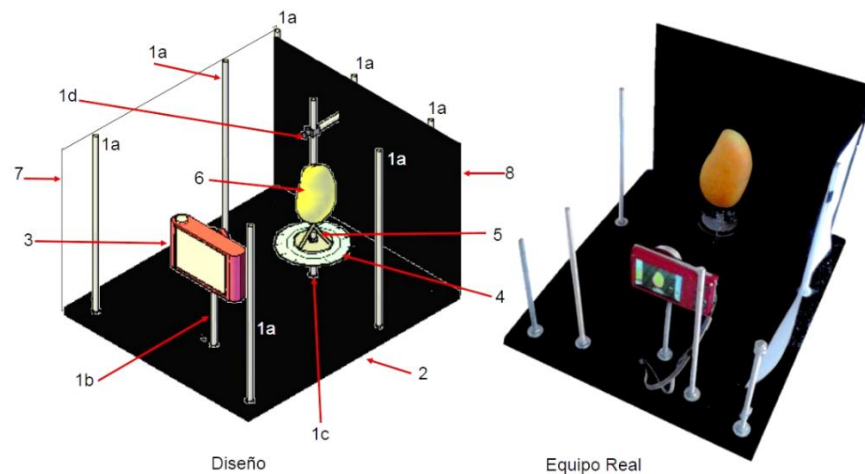


Figura 2.1. Diseño de goniómetro y equipo real. 1(a, b, c y d).- Tornillos de estructura. 2.-Base de madera. 3.-cámara digital. 4.-Transportador. 5.-Tripie. 6.-Fruto. 7.-Difusor de luz. 8.-Fondo negro

2.3.2 Selección de material vegetal

Para el experimento se utilizaron tres especies; mango (*Mangifera indica* L. cv “Ataulfo”), naranja (*Citrus sinensis* L. cv valencia) y pera (*Pyrus communis* L. cv D’anjou), se seleccionaron aleatoriamente 10 frutos de cada especie. Los frutos fueron adquiridos en el mercado de Texcoco estado de México; posteriormente fueron trasladados al laboratorio de Fisiología Postcosecha en el Colegio de Postgraduados. El experimento se realizó en etapas por especie, por lo tanto no fueron refrigerados.

2.3.3 Captura de imágenes y depuración

Los frutos fueron digitalizados con una cámara digital **Fujifilm Finepix JZ110**, Con ayuda del goniómetro se capturaron imágenes en la cara más ancha del fruto (0°) y 90° después, sobre el eje vertical del fruto, con una resolución de 3072x2304 pixeles en formato JPEG.

El fondo de las imágenes se pintó de color blanco y se recortaron a 100x1500 pixeles para seleccionar el área correspondiente al fruto de mango, estas dimensiones se conservaron en las otras dos especies. La operación se realizó en el software de manipulación de imágenes del proyecto GNU de distribución libre **GIMP 2.8.10**.

2.3.4 Obtención de parámetros para el modelado tridimensional

La longitud de los semiejes y la ubicación de centro pueden medirse manualmente en cualquier procesador de imágenes; existen algunos de distribución libre como **ImageJ 1.46r** (*Wayne Rasband National Institutes of Health, USA*) o de distribución comercial como **Image-Pro Plus 6.0** (*Media Cybernetics, Inc*), sin embargo el tiempo empleado en este método está determinado por la habilidad del investigador. Como alternativa es posible escribir pequeñas aplicaciones con la capacidad de contar pixeles de color específicos, por este método el tiempo empleado está determinado principalmente por las características de equipo en que ejecute la aplicación.

Por lo anterior, se desarrolló una aplicación en *Visual Basic 2010 express* denominada “**FrutMDL**”, que permite al usuario medir el diámetro del fruto en diferentes posiciones del eje vertical (z). La ubicación vertical de cada diámetro está determinada por el número de divisiones introducido; para el experimento se utilizaron 8, 16 y 32 divisiones, considerando que Goñi, et *al.*, (2007) encontraron que los frutos de manzana pueden reconstruirse tridimensionalmente con siete divisiones físicas como mínimo.

El programa discrimina el fondo de color blanco considerado como cualquier valor superior a 200 en la combinación RGB (Red, Green, Blue). Posteriormente mediante la introducción de la altura del fruto se genera una escala y se realiza la conversión del diámetro de pixeles a centímetros (opcionalmente es posible introducir la escala manualmente). Finalmente las lecturas son exportadas a una hoja de cálculo. En el experimento la longitud vertical o altura del fruto fue medida con un calibrador manual (vernier).

El programa acepta imágenes en formato en nueve formatos, entre ellos .jpg, .bmp y .tiff, y las convierte automáticamente a mapa de bits de Windows (.bmp). Se procesa el par de imágenes necesarias para la generación tridimensional del fruto. La figura 2.3 muestra un esquema general de la obtención de semiejes.

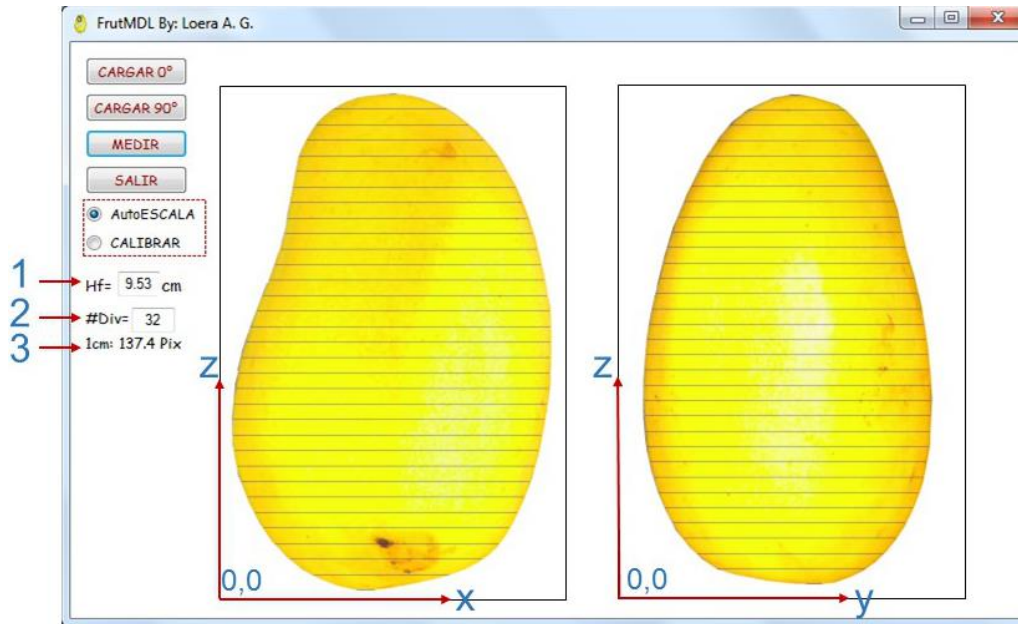


Figura 2.2. Programa de apoyo para la medición de diámetros del fruto. 1.-Introducción de la altura del fruto. 2.-Número de divisiones y 3.-Factor de conversión entre pixeles y centímetros.

2.3.5 Modelado tridimensional de frutos por solevación

En ámbito del diseño mecánico existen métodos de generación tridimensional de sólidos. El software CAD (Computer Aided Design) posee herramientas que permite construir modelos tridimensionales y calcular diversas propiedades geométricas, entre ellas área y volumen. La técnica de solevación o “**Lofing**” consiste en colocar una superficie en el exterior de secciones transversales para generar un objeto (Lin et *al.*, 1997; Piegl y Tiller, 1996). Está técnica es considerada como ingeniería inversa, ya que permite la estimación de parámetros geométricos a partir de trazos gráficos. La técnica de solevación permite obtener representaciones precisas de objetos tridimensionales a pesar de su baja simetría y/o esfericidad. (Goñi et *al.*, 2007).

Los frutos fueron modelados considerando que están constituidos por un conjunto de elipses sobrepuestas verticalmente, por lo tanto de la imagen tomada a 0° se obtuvo el semieje mayor de la elipse y el semieje menor fue obtenido de imagen tomada en un ángulo de giro de 90°. La ubicación del centro de la elipse (x, y, z) se obtuvo midiendo la

distancia del borde a la mitad del diámetro en cada imagen y la posición vertical de cada elipse, la figura 2.4 muestra la constitución vertical del fruto por elipses.

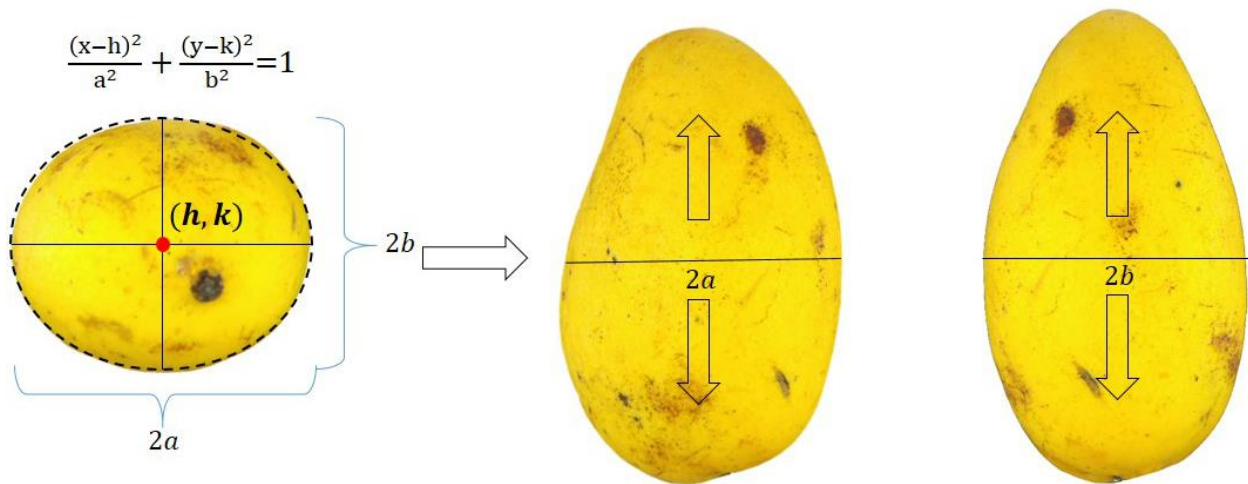


Figura 2.3. Ecuación general de la elipse con centro fuera del origen y constitución del fruto por elipses sobrepuestas verticalmente.

Los frutos se modelaron en el software comercial de diseño asistido por computadora de la compañía autodesk “AutoCAD 2010” versión de prueba. Los pares de semiejes medidos mediante “FrutMDL.exe” se compilaron en un “script” en el que especifica el centro y cada uno de los semiejes, para facilitar el trazado masivo de las elipses. Una vez realizado el trazo, se generó el modelo tridimensional por solevación (lofting) a través de la sección transversal. Posteriormente se midió el volumen mediante el comando “*massprop*” y área externa del fruto con el comando “*area-object*”.

2.3.6 Área medida por extracción de cubierta externa

El método de extracción de cubierta externa, fue considerado como método exacto; para ello se retiró la cubierta de los frutos (cáscara) cuidadosamente en forma de husos para los frutos de naranja y mango, en el caso de frutos de pera; la extracción se realizó en bandas circulares. La cubierta fue digitalizada en un escáner **Hp scanjet 4400c**. Posteriormente se eliminó el fondo de las imágenes con **GIMP 2.8.10**. Finalmente, el

área total de los frutos se calculó en el software **Image Tool 3.0** (*University of Texas Health Science Center at San Antonio*). En la figura 2.5 se presenta el procedimiento general para la estimación de área externa total por el método de extracción.



Figura 2.4. Procedimiento general para el cálculo de área total de los frutos. 1.-Extracción de cubierta externa. 2.-Digitalización. 3.-Eliminación del fondo. 4.-Cálculo de área total.

2.3.7 Volumen medido por desplazamiento de agua

El volumen de los frutos fue medido por el método de desplazamiento de agua, en una probeta de 1.0 L, con precisión de 10.0 mL. En otros reportes se ha empleado este método como medida real. (Ali-Bulent, 2007; Omid et al., 2010; Reza y Hosein, 2011).

2.3.8 Diseño experimental

El experimento se realizó con un diseño de bloques al azar para cada especie por separado, se tomó como criterio de bloqueo el área y volumen propios de cada fruto, por lo tanto se formaron 10 bloques con tres tratamientos constituidos por cada método de cálculo. La ecuación 1 muestra el modelo estadístico correspondiente a un diseño de bloques al azar (Lyman, 1977).

2.3.9 Análisis de datos

Se calculó el error relativo medio para cada método de modelado para cada especie (Ecuación 2). Se realizó un análisis de varianza y se generó una modelo por regresión lineal para el área y volumen en cada especie. El análisis se realizó en SAS 9.2.

$$y_{ij} = \mu + \alpha_i + \beta_j + \varepsilon_{ij} \dots \dots (1)$$

Donde:

y_{ij} : Variable medida por el i-ésimo método en el j-ésimo fruto.

μ : Constante que caracteriza a la población

α_i : Efecto del i-ésimo método de cálculo (Tratamiento)

β_j : Efecto del j-ésimo fruto (bloque)

ε_{ij} : Error experimental $\varepsilon_{ij} \sim IIN(0, \sigma^2)$

$$\bar{\varepsilon}_r = \frac{\sum_{i=0}^n \left(\frac{|X_r - X_c|}{X_r} \right) * 100}{n} \dots \dots \dots (2)$$

Donde:

$\bar{\varepsilon}_r$: Error relativo medio (|%|)

X_r : Valor real medido

X_c : Valor calculado

n : Número de comparaciones

2.4 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El análisis de varianza para el área externa no mostró diferencia significativa entre los métodos de cálculo, se obtuvieron valor de Pr>F de 0.17 para mango, 0.42 en naranja y 0.51 en los frutos de pera. Los frutos de naranja y pera no mostraron diferencia significativa entre los métodos de cálculo de volumen y lo valores de Pr>F fueron 0.54 para naranja y 0.34 para pera. En los frutos de mango se encontró diferencia significativa entre el volumen calculado por desplazamiento de agua y los tres métodos de modelado con un valor de Pr>F de 0.02, la comparación de medias ubicó a los frutos modelados con ocho divisiones con un volumen inferior al medido por desplazamiento de agua, este resultado indica que ocho divisiones no son suficientes para caracterizar la forma longitudinal del fruto de mango (Cuadro 2.1). Los resultado concuerdan con los

reportados por Ali-Bulent (2007) en la estimación de volumen de frutos de sandía, y los reportados por Omid et al. (2010) y Reza y Hosein (2011) en la estimación de volumen de cítricos por procesamiento de imágenes.

Cuadro 2.1. Comparación de medias por Tukey ($\alpha=0.05$) para el volumen calculado por desplazamiento de agua (MDA) y modelo geométrico tridimensional con 8, 16 y 32 divisiones (8DIV, 16DIV y 32DIV). Medias dentro de la misma fila con diferente letra son estadísticamente significativas.

	Volumen (cm ³)			
	MDA	8DIV	16DIV	32DIV
MANGO	224.5 ^A	219.5 ^B	221.2 ^{AB}	221.3 ^{AB}
NARANJA	214.0 ^A	210.7 ^A	211.3 ^A	211.2 ^A
PERA	262.0 ^A	258.8 ^A	259.9 ^A	259.9 ^A

La técnica de modelado geométrico tridimensional presentó un error relativo medio menor a 1.5% en el cálculo de área externa de frutos de mango y un error menor a 3% en el cálculo de volumen, en los frutos de naranja el error fue menor a 0.6% para el área y menor a 2.4% en el cálculo del volumen y en los frutos de pera se obtuvo un error inferior a 1.3% en cálculo de área y menor a 2.4% en el volumen (Cuadro 2.2 y 2.3). Uyar y Erdogan (2009) mencionan un error promedio menor al 1% en la estimación de área externa de frutos de manzana, plátano, fresa y pera mediante un modelo generado con un escáner tridimensional. Du y Sun (2006) reportaron un error de -1.79% en la estimación de volumen de jamón elipsoidal mediante particiones obtenidas de imágenes digitales. Igathinathane y Chattopadhyay (1998) encontraron errores cercanos a 0.7% en la estimación de área en objetos elipsoidales por técnicas numéricas. Goñi et al. (2006) reportaron error relativo entre -1.25% y 0.95% en el cálculo volumen de tres variedades de manzanas modeladas tridimensionalmente por método de elemento finito y procesamiento de imágenes digitales. Por otro lado, Ali-Bulent (2007) encontró un error

de 7.7% en la estimación volumen de sandías mediante procesamiento de imágenes digitales.

Cuadro 2.2. Resumen de resultados de área externa calculados por extracción de cubierta y con modelos geométricos tridimensionales con 8, 16 y 32 divisiones: media, desviación estándar (D. E) y error relativo medio (|%|).

	Directo		8 Divisiones			16 divisiones			32 Divisiones		
	Media	D. E.	Media	D. E.	$\bar{\varepsilon}_r(\%)$	Media	D. E.	$\bar{\varepsilon}_r(\%)$	Media	D. E.	$\bar{\varepsilon}_r(\%)$
MANGO	186.0	27.1	184.9	27.4	1.5	186.5	27.5	1.4	186.6	27.4	1.4
NARANJA	171.3	10.0	171.3	10.8	0.5	171.6	10.9	0.6	171.6	10.8	0.6
PERA	200.7	9.6	200.0	9.2	1.4	201.0	9.3	1.3	201.1	9.3	1.3

Cuadro 2.3. Resumen de resultados de volumen calculado por desplazamiento de agua (Directo) y con modelos geométricos tridimensionales con 8, 16 y 32 divisiones: media, desviación estándar (D. E) y error relativo medio (|%|).

	Directo		8 Divisiones			16 divisiones			32 Divisiones		
	Media	D. E.	Media	D. E.	$\bar{\varepsilon}_r(\%)$	Media	D. E.	$\bar{\varepsilon}_r(\%)$	Media	D. E.	$\bar{\varepsilon}_r(\%)$
MANGO	224.5	50.3	219.5	49.4	3.0	221.2	49.7	2.5	221.3	49.6	2.5
NARANJA	214.0	15.8	210.7	19.9	2.4	211.3	20.0	2.4	211.2	20.0	2.4
PERA	262.0	11.4	258.8	17.5	2.4	259.9	17.5	2.4	259.9	17.6	2.4

El método propuesto para el modelado geométrico tridimensional presentó un coeficiente de determinación entre 0.87 y 0.99 en el cálculo de área externa y entre 0.89 y 0.99 en el cálculo de volumen en los frutos de mango, naranja y pera (Cuadro 2.4). Soto-Rojas *et al.* (2010) encontraron un valor de R^2 de 0.987 en la estimación fracciones dañadas en frutos de mango mediante proyecciones geométricas obtenidas de imágenes digitales. Spreer y Müller (2011) reportaron un R^2 de 0.96 en la estimación de masa de frutos de mango mediante la obtención dimensiones reales a partir de imágenes digitales

ortogonales del fruto. Goñi, et al. (2006) encontraron un valor de R^2 de 0.93 para la estimación de volumen de tres variedades de manzana. Omid et al. (2010) obtuvieron un coeficiente de determinación de 0.92 en la estimación de volumen de naranjas mediante técnicas de procesamiento de imágenes. En las figuras 2.5, 2.6 y 2.7 se observa la distribución homogénea de datos alrededor de línea donde y es igual a x en las tres especies evaluadas. En las figuras 2.8, 2.9 y 2.10 se observa la relación entre el volumen calculado en los tres métodos de modelado y el volumen medido por desplazamiento de agua, en todos los casos se presentó subestimación del volumen. Así mismo se presentan los modelos de regresión generados para cada especie, donde y_m es la regresión para mango, y_n para naranja y y_p para pera.

Cuadro 2.4. Resumen de parámetros de regresión (β_0 : Intersección, β_1 : Pendiente y R^2 : Coeficiente de determinación) en los métodos de modelado con 8, 16 y 32 divisiones para el área externa y volumen.

Variable	Especie	Modelo	β_0	β_1	R^2
Área	Mango	8 Divisiones	3.1	0.98	0.98
		16 Divisiones	3.5	0.98	0.98
		32 Divisiones	3.1	0.98	0.98
	Naranja	8 Divisiones	13.2	0.92	0.99
		16 Divisiones	13.6	0.92	0.99
		32 Divisiones	13.2	0.92	0.99
	Pera	8 Divisiones	6.0	0.97	0.87
		16 Divisiones	7.5	0.96	0.87
		32 Divisiones	7.4	0.96	0.88
Volumen	Mango	8 Divisiones	7.2	0.99	0.99
		16 Divisiones	6.6	0.98	0.99
		32 Divisiones	6.1	0.98	0.99
	Naranja	8 Divisiones	50.6	0.77	0.96
		16 Divisiones	50.4	0.78	0.96
		32 Divisiones	50.6	0.77	0.96
	Pera	8 Divisiones	101.3	0.61	0.89
		16 Divisiones	103.5	0.61	0.89
		32 Divisiones	103.6	0.61	0.89

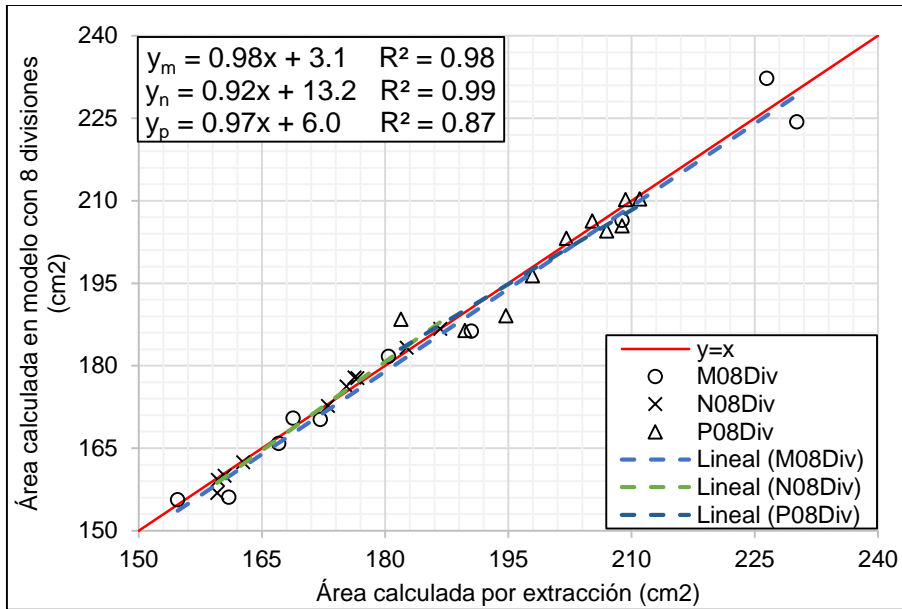


Figura 2.5. Área calculada en modelo con 8 divisiones y área medida por extracción en las tres especies evaluadas, donde “y_m” es regresión para mango, “y_n” regresión para naranja y “y_p” regresión para pera.

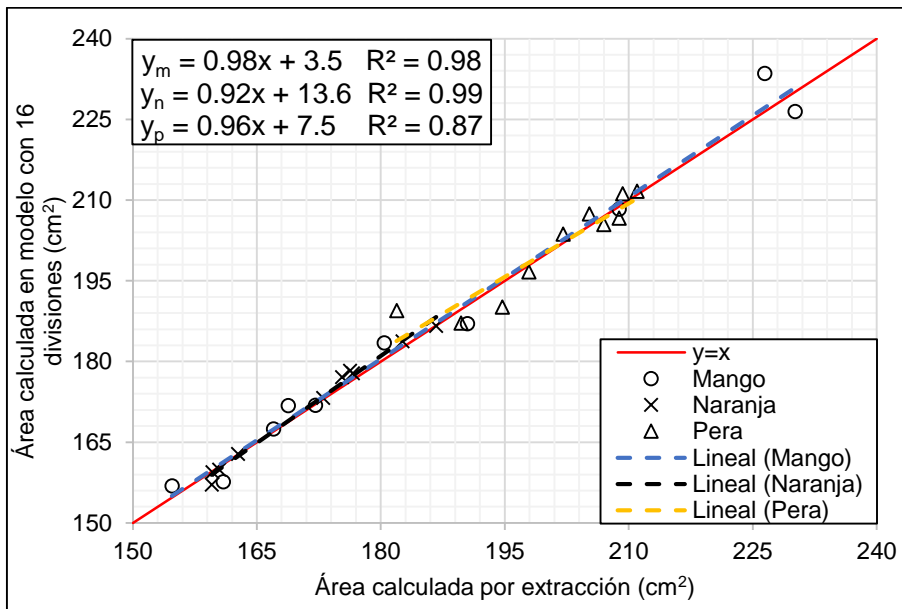


Figura 2.6. Área calculada en modelo con 16 divisiones y área medida por extracción en las tres especies evaluadas, donde “y_m” es regresión para mango, “y_n” regresión para naranja y “y_p” regresión para pera.

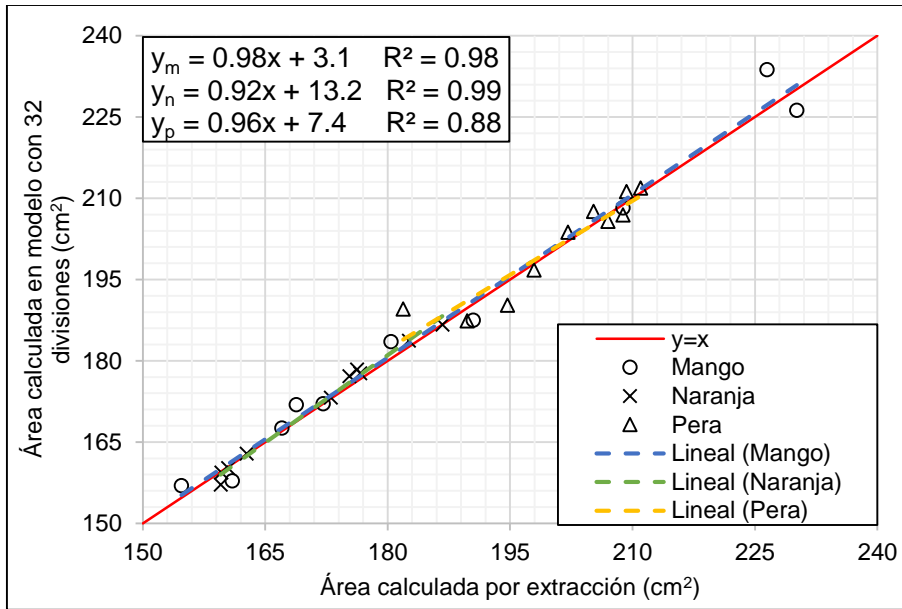


Figura 2.7. Área calculada en modelo con 32 divisiones y área medida por extracción en las tres especies evaluadas, donde “ y_m ” es regresión para mango, “ y_n ” regresión para naranja y “ y_p ” regresión para pera.

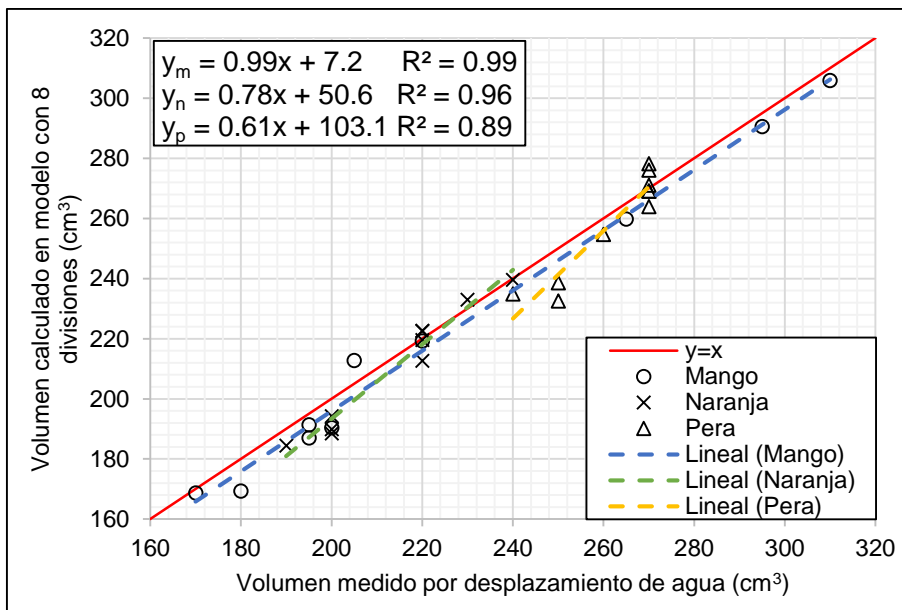


Figura 2.8. Volumen calculado en modelo con 8 divisiones y medido por desplazamiento de agua en las tres especies evaluadas, donde “ y_m ” es regresión para mango, “ y_n ” regresión para naranja y “ y_p ” regresión para pera.

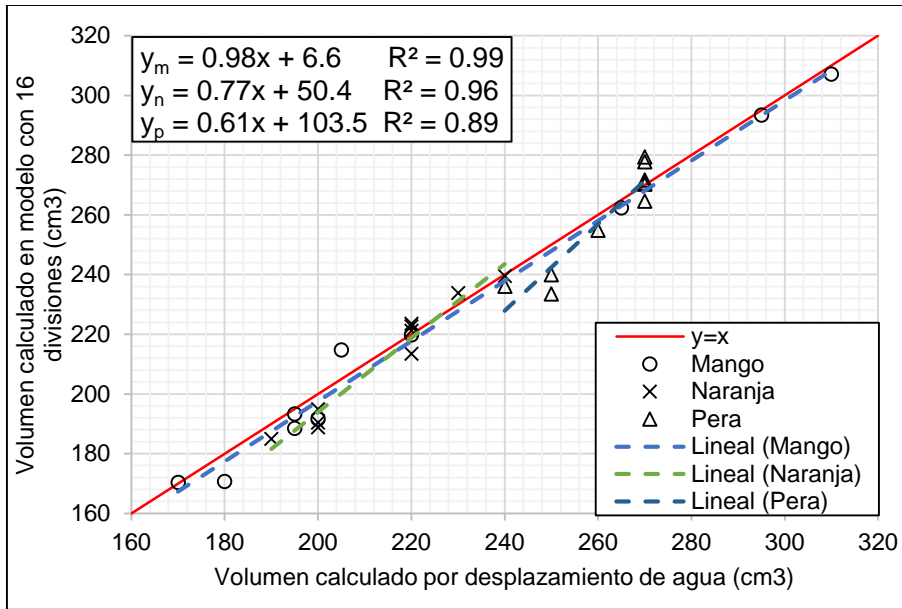


Figura 2.9. Volumen calculado en modelo con 16 divisiones y medido por desplazamiento de agua en las tres especies evaluadas, donde “ y_m ” es regresión para mango, “ y_n ” regresión para naranja y “ y_p ” regresión para pera.

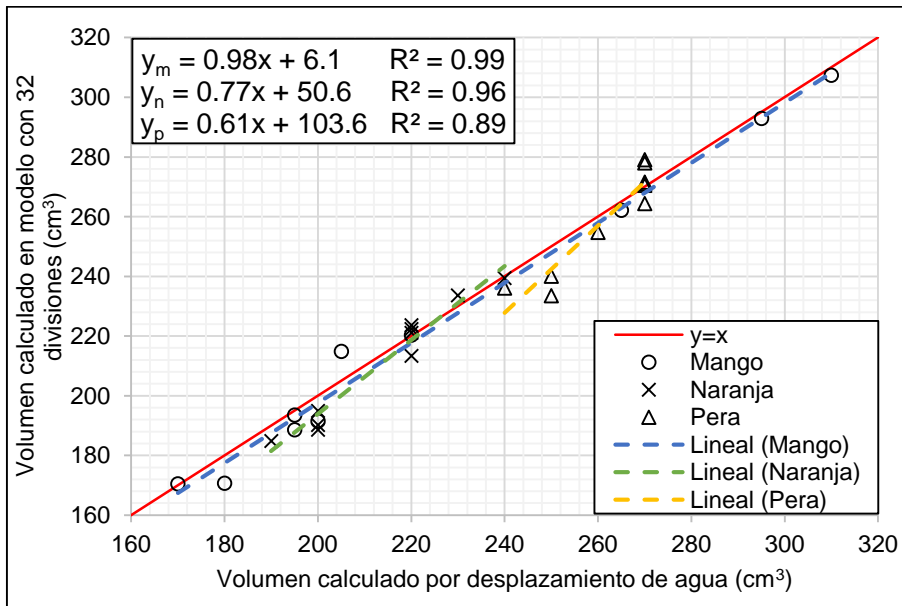


Figura 2.10. Volumen calculado en modelo con 32 divisiones y medido por desplazamiento de agua en las tres especies evaluadas, donde “ y_m ” es regresión para mango, “ y_n ” regresión para naranja y “ y_p ” regresión para pera.

2.5 CONCLUSIÓN

Se desarrolló una metodología basada en imágenes digitales que permite generar modelos geométricos tridimensionales de frutos con sección transversal elíptica y calcular su área externa y volumen. La metodología se aplicó en tres especies frutales (mango, naranja y pera) y el error relativo medio no superó el 3% en el cálculo de área y volumen. La técnica se adapta a frutos con sección transversal elíptica o circular con superficie predominantemente lisa, sin importar su forma vertical. El número de divisiones no afectó el cálculo final de área externa.

La obtención de semiejes a partir de imágenes digitales resultó ser un método preciso y relativamente fácil de programar, lo que se representa la posibilidad de incrementar el número divisiones y disminuir el tiempo empleado para reconstruir los frutos tridimensionalmente.

El uso de imágenes digitales para la obtención de parámetros geométricos es un método no destructivo que permite estimar con precisión el área y volumen de frutos específicos. Es importante recordar que la calidad de un modelo depende de la calidad de los datos con los que se alimenta; por lo tanto la calidad de la imagen original determinará calidad del resultado.

2.6 RECOMENDACIONES

- Adaptar la metodología para su uso en software de distribución libre, por ejemplo: la suite de animación 3D “Blender” o SketchUp Make de la compañía Trimble.
- Hacer las adecuaciones necesarias al método de desplazamiento de agua para aumentar la precisión de las lecturas en frutos grandes
- Determinar el grado de deformación de la cubierta en el método de extracción.
- Incorporar al programa un algoritmo de detección de bordes con el fin de permitir el análisis de imágenes con fondo de color diferente al blanco.

LITERATURA CITADA

- Ali Bulent, K.** 2007. Determination of watermelon volume using ellipsoid approximation and image processing. *Postharvest Biology and Technology* 45(3): 366-371.
- Casierra, P. F. Aguilar, A. O.** 2008. Calidad en frutos de tomate (*Solanum lycopersicum* L.) Cosechados en diferentes estados de madurez. *Agronomía Colombiana*, 26: 300-307.
- Du, C-J. And D.-W. Sun.** 2006. Estimating the surface area and volume of ellipsoidal ham using computer vision. *Journal of Food Engineering* 73(3): 260-268
- Gómez-Sanchis, J., E. Moltó, G. Camps-Valls, L. Gómez-Chova, N. Aleixos and J. Blasco.** 2008. Automatic correction of the effects of the light source on spherical objects. An application to the analysis of hyperspectral images of citrus fruits. *Journal of Food Engineering* 85(2): 191-200.
- Goñi, S. M., E. Purlis and V. O. Salvadori.** 2007. Three-dimensional reconstruction of irregular foodstuffs. *Journal of Food Engineering* 82(4): 536-547.
- Goñi, S. M. and E. Purlis.** 2010. Geometric modelling of heterogeneous and complex foods. *Journal of Food Engineering* 97(4): 547-554.
- Igathinathane, C. and P. K. Chattopadhyay.** 1998. On the development of a ready reckoner table for evaluating surface area of general ellipsoids based on numerical techniques. *Journal of Food Engineering* 36(2): 233-247.
- Lin, C.-Y., C.-S. Liou and J.-Y. Lai.** 1997. A surface-lofting approach for smooth-surface reconstruction from 3D measurement data. *Computers in Industry* 34(1): 73-85.
- Lyman ott.** 1977. An introduction to statistical methods and data analysis. Belmont, Cal. Wadsworth. 730 p.

- Manresa, A. G. y I. Vicente.** 2007. El color en la industria de los alimentos. Libro de texto electrónico. Disponible en intranet del Instituto de Farmacia y Alimentos de la Universidad de la Habana.
- Moreda, G. P., J. Ortiz-Cañavate, F. J. García-Ramos and M. Ruiz-Altisent.** 2007. Effect of orientation on the fruit on-line size determination performed by an optical ring sensor. *Journal of Food Engineering* 81(2): 388-398.
- Omid, M., M. Khojastehnazhand, A. Tabatabaeefar.** 2010. Estimating volume and mass of citrus fruits by image processing technique. *Journal of Food Engineering* 100(2): 315-321.
- Piegl, L. and W. Tiller.** 1996. Algorithm for approximate NURBS skinning. *Computer-Aided Design* 28(9): 699-706.
- Reza, F. and N. Hpsein.** 2011. Determining the orange volume using image processing. *International Conference on Food Engineering and Biotechnology. IPCBEE vol.9 (2011) © (2011) IACSIT Press, Singapore.*
- Soto-Rojas, L.** 2010. Evaluación de la severidad de antracnosis en frutos de mango usando proyecciones geométricas obtenidas a partir de imágenes digitales. Tesis. Colegio de postgraduados. México.
- Spreer, W. and J. Müller.** 2011. Estimating the mass of mango fruit (*Mangifera indica*, cv. Chok Anan) from its geometric dimensions by optical measurement. *Computers and Electronics in Agriculture* 75(1): 125-131.
- Uyar, R. and F. Erdogan.** 2009. Potential use of 3-dimensional scanners for food process modeling. *Journal of Food Engineering* 93(3): 337-343.

CAPÍTULO 3

3. CÁLCULO DEL ÁREA EXTERNA DE FRUTOS CON EL MÉTODO PROYECCIONES GEOMÉTRICAS OBTENIDAS DE IMÁGENES DIGITALES

3.1 RESUMEN

Se modificó la técnica de proyección geométrica, se evaluaron tres especies frutales (mango, naranja y pera) con 10 repeticiones cada uno. Se tomaron cuatro imágenes cada 90° alrededor de cada fruto, se eliminó el fondo y se redimensionaron al 50, 100 y 200%. Cada fruto fue considerado como un grupo de elipses individuales sobrepuestas de forma vertical y horizontal. Se desarrolló un programa en *Visual Basic 2010 express* que calcula la longitud del arco con incrementos de uno y dos píxeles; posteriormente se asigna el color correspondiente del píxel inicial a al arco calculado. Se procesaron las imágenes y registró el tiempo empleado y se midió el área en las imágenes procesadas. Se comparó el área calculada con el área externa de los frutos medida por extracción y digitalización. Hubo diferencia significativa entre los métodos de cálculo de área externa en las tres especies, en los frutos de mango sólo el área calculada en la imagen ampliada al 200% con interpolación cada dos píxeles fue igual a la calculada por extracción de cubierta. En los frutos de naranja, las imágenes sin redimensionar (100%) interpoladas por ambos métodos proporcionaron no presentaron significancia. En pera, las imágenes al 50% con interpolación cada dos píxeles y las imágenes sin redimensionar procesadas por ambos métodos no presentaron significancia. El menor error relativo medio que se obtuvo fue de 1.6%, 1.1% y 5.43% para los frutos de mango, naranja y pera respectivamente. El coeficiente de determinación obtenido para el método con error más bajo fue de 0.97, 0.96 y 0.07 para mango naranja y pera. La técnica de proyecciones geométricas es una herramienta útil en el análisis de superficie de frutos elipsoidales, pero su precisión depende de las dimensiones de la imagen, método de interpolación y obviamente de la forma del fruto.

3.2 INTRODUCCIÓN

Los productos hortícolas presentan una gran variedad de formas, colores y tamaño entre otras características físicas. En general estos atributos son importantes en clasificación y ubicación en algún grado de calidad, lo que influye directamente en el precio de los productos (Manresa y Vicente, 2007).

En gran número de investigaciones aproximando la forma a un elipsoide para aplicar cálculos matemáticos exactos, recientemente se ha propuesto el uso imágenes digitales para estimar el volumen y masa de frutos con forma predominantemente regular. Se han realizado investigaciones con el uso de software de diseño mecánico que ha proporcionado la posibilidad de estimar volumen y área externa, y finalmente el empleo de un escáner tridimensional para productos hortícolas complejos. (Ali-Bulent, 2007; Goñi *et al.*, 2010; Uyar y Erdogdu, 2009; Omid, *et al.*, 2010; Speer y Müller, 2011).

La cubierta externa de los frutos es la principal barrera al intercambio. Los fenómenos que implican transferencia de calor o masa son dependientes de la superficie de contacto entre el fruto y el medio circundante; además, determina la aceptación por los consumidores ya que en ella encontramos indicadores de la calidad, como el color y presencia de daños de cualquier tipo que generen una coloración anormal. El área externa de figuras regulares es relativamente fácil de calcular, pero para la forma real de los frutos no existen modelos de amplia aplicación (Amigo, 2000; Pysmenny et al., 2007; Casierra y Aguilar, 2008; Gómez-Sanchis, *et al.*, 2008; Goñi *et al.*, 2007, Goñi *et al.*, 2010).

El objetivo de esta investigación fue determinar la capacidad de la técnica de proyección geométrica para generar representaciones planas de diferentes frutos (mango, naranja y pera) y la precisión en el cálculo del área externa con imágenes de diferente tamaño.

3.3 MATERIALES Y METODOS

3.3.1 Selección de material vegetal

Para el experimento se utilizaron tres especies; mango (*Mangifera indica* L. cv Ataulfo), naranja (*Citrus sinensis* L. cv valencia) y pera (*Pyrus communis* L. cv D'anjou), se seleccionaron aleatoriamente 10 frutos de cada especie. Los frutos fueron adquiridos en el mercado de Texcoco estado de México; posteriormente fueron trasladados al laboratorio de Fisiología Postcosecha en el Colegio de Postgraduados. El experimento se realizó en etapas por especie, por lo tanto no fueron refrigerados.

3.3.2 Captura de imágenes, depuración y escalado

Los frutos fueron digitalizados con una cámara digital **Fujifilm Finepix JZ110**. Con ayuda del goniómetro se capturaron 4 imágenes cada 90° sobre el eje vertical del fruto, con enfoque y ajuste automático y resolución de 3072x2304 pixeles en formato JPEG.

El fondo de las imágenes se pintó de color blanco y se recortaron a 1000x1500 pixeles para seleccionar el área correspondiente al fruto de mango y se aplicó en las otras dos especies para fines de comparación del tiempo de proceso. Para el experimento se redimensionaron las imágenes al 50% (500x1000), 100% (1000x1500) y 200% (2000x3000), entiéndase que las imágenes al 100% no están redimensionadas, esta operación se realizó con un método de interpolación cúbica en **GIMP 2.8.10**.

3.3.3 Diseño y escritura del programa para generar la proyección geométrica

Para realizar la corrección de curvatura. Se retomó el método de aproximación por proyección geométrica propuesto por Soto-Rojas (2010), pero con la posibilidad de realizar integraciones cada uno y dos pixeles, además de procesar imágenes con colores originales. Los frutos fueron considerados como un conjunto de elipses sobrepuestas vertical y horizontalmente. De acuerdo con la ecuación (3), cada elipse es caracterizada por el semieje mayor (r) y el semieje menor (s). En la imagen tomada a 0° se midió el radio máximo (r_0) y posteriormente en la imagen tomada a 90° se midió el radio a la misma altura (s_0), con estas dos constantes se asigna el semieje menor (s) de acuerdo

con la ecuación (4) a la imagen tomada a 0° y el semieje mayor (r) vertical se mide directamente. Posteriormente se calcula la longitud del arco (ecuación 5) en cada elipse por regla de Simpson 1/3 (Campbell, 1978) y se corrige la curvatura vertical, lo operación se repitió para corregir la curvatura vertical de la imagen tomada a 90°. La corrección horizontal se realizó mediante la lectura directa del semieje mayor en la imagen corregida a 0° y el semieje menor en la imagen corregida a 90°, posteriormente se calcula la longitud del arco entre uno y dos pixeles (Figura 3.1). La operación se repitió en cada fila de pixeles que conforman la imagen del fruto tomada a 0°. Se diseñó un programa en *Visual Basic 2010 express* denominado “**FruTool**”, que obtiene las constantes de las elipses individuales y realiza la corrección de curvatura tanto vertical como horizontal.

Ecuación general de la elipse con centro en el origen y despeje en función de x (Apostol, 1967; Campbell, 1978; Lehmann, 1990).

$$\frac{x^2}{r^2} + \frac{y^2}{s^2} = 1 \quad (3)$$

$$s = y = f(x) = \frac{s_0}{r_0} \sqrt{r_0^2 - x^2} \quad (4)$$

- Donde:
- r: Semieje mayor de la elipse
 - s: Semieje menor de la elipse
 - r₀: Semieje máximo en imagen a 0°
 - s₀: Semieje máximo en imagen a 90°
 - x: Variable independiente
 - y: Variable dependiente

$$L = \int_{x_1}^{x_2} \sqrt{1 + \frac{s^2 x^2}{r^2 (r^2 - x^2)}} dx \quad (5)$$

- Donde:
- L: Longitud del arco entre x₁ y x₂.
 - r: Semieje mayor de la elipse
 - s: Semieje menor de la elipse

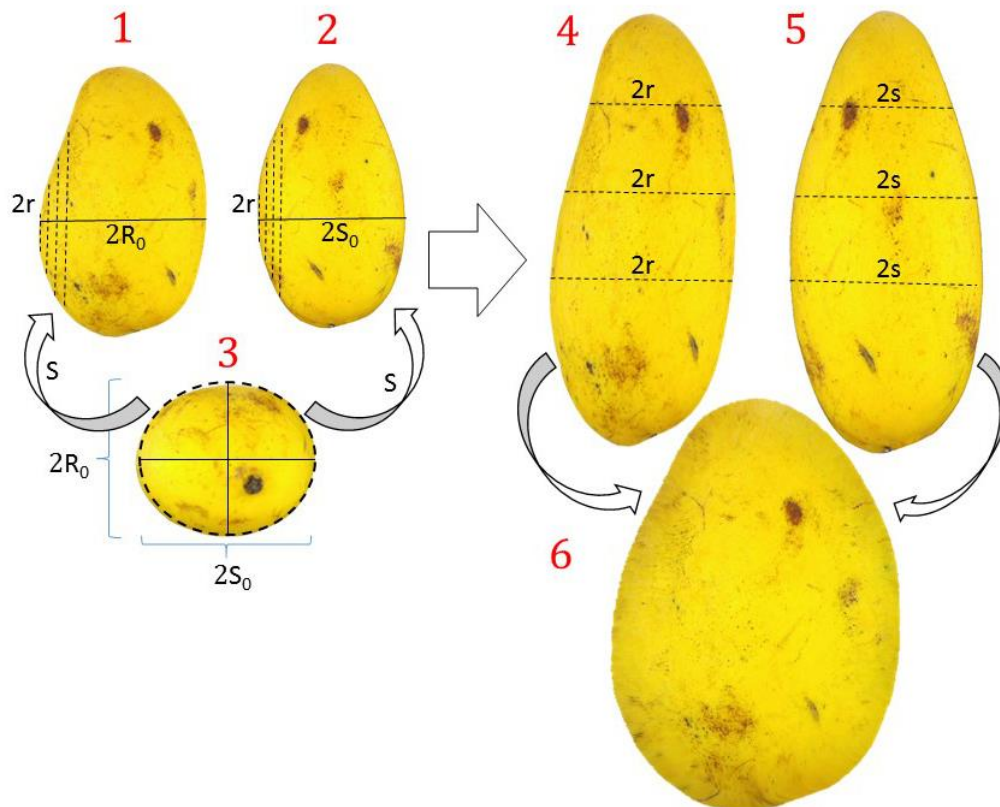


Figura 3.1. Procedimiento general para la obtención de la proyección geométrica del fruto, donde: 1) Imagen tomada a 0° . 2) Imagen tomada a 90° . 3) Elipse formada por el diámetro máximo en ambas imágenes. 4) Corrección de curvatura vertical en imagen tomada a 0° . 5) Corrección de curvatura en imagen tomada a 90° y 6) Proyección geométrica obtenida por corrección de curvatura vertical y horizontal en imagen tomada a 0° .

3.3.4 Procesamiento de las imágenes

Se procesaron las imágenes de cada fruto con colores originales, con las diferentes dimensiones seleccionadas y se registró el tiempo de proceso. Opcionalmente el programa puede procesar imágenes segmentadas en cualquier número de clases de color. Se probó la correcta ejecución del programa en computadoras con sistema operativo Windows Vista y Windows 7, ambos de 32 bits.

3.3.4.1.1 Variables medidas

Tiempo de proceso (s): El programa registra el tiempo de proceso y analiza un par de imágenes a la vez, por lo tanto el tiempo de evaluación es la suma de los dos pares de imágenes que conforman el fruto completo. El programa se ejecutó en una computadora con sistema operativo Windows 7 de 32 Bits y procesador Intel Celeron a 1.70 GHz y 4 GB de RAM.

Área total (cm²): El área total de cada fruto se calculó con las imágenes aplanadas horizontal y verticalmente, con el software *Image Tool* 3.0 (University of Texas Health Science Center at San Antonio). Se usó como calibración la longitud del fruto en la imagen tomada a 0° y 180°.

3.3.4.1.2 Diseño experimental

El experimento se realizó con un diseño de bloques al azar para cada especie por separado, se tomó como criterio de bloqueo el área propia de cada fruto, por lo tanto se formaron 10 bloques con siete tratamientos constituidos por la proyección geométrica obtenida en las tres dimensiones, cada método de interpolación y el método de extracción y digitalización.

3.3.4.1.3 Análisis de datos

Se realizó un análisis de varianza y se hizo una comparación de medias por Tukey (0.05), para el área externa. Se calculó el error relativo medio y finalmente generó una regresión lineal sólo para el método de menor error en cada especie.

3.4 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En la figura 3.2 se muestra el comportamiento del tiempo de proceso para cada especie de acuerdo con las dimensiones de la imagen y el método de interpolación donde MNG es mango, NRJ naranja, 1x1 es interpolación cada pixel y 2x2 es interpolación cada dos pixeles. La reducción del 50% disminuyó el tiempo de proceso a la mitad del utilizado en la imagen original y el incremento al 200% aumentó cuatro veces el tiempo de proceso respecto al empleado en las imágenes sin redimensionar. La integración cada dos pixeles reduce un 20% aproximadamente el tiempo necesario para procesar las imágenes; Soto-Rojas (2010) reportó un tiempo de proceso alrededor de 2 minutos en imágenes de 2816x2112 pixeles tomadas a 0.45 m en frutos de mango. Los frutos de menor tamaño presentaron menor tiempo de proceso, por lo tanto el principal factor que afecta el tiempo de proceso es la proporción de fruto respecto al fondo, de acuerdo con López-García et al., (2010), un incremento en la resolución de las imágenes implica un incremento considerable en el costo computacional de la técnica.

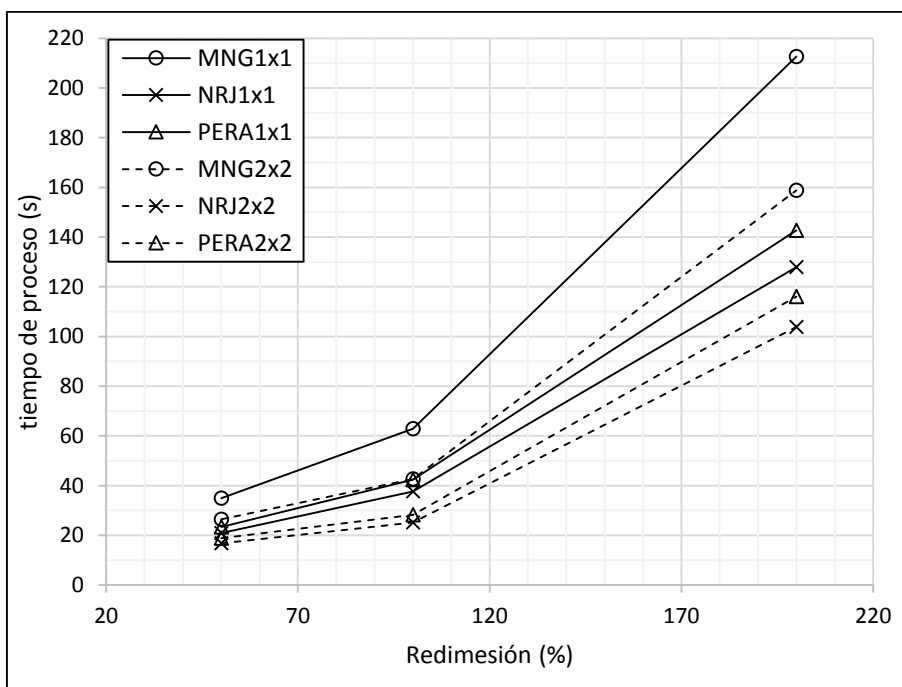


Figura 3.2. Comportamiento del tiempo de proceso de acuerdo a las dimensiones de la imagen, la línea continua representa la interpolación pixel por pixel y la línea punteada la interpolación cada dos pixeles.

El análisis de varianza mostró diferencia significativa entre los tratamientos ($P > F: < 0.001$) en todas las especies. La comparación de medias en los frutos de mango demostró que sólo las imágenes al 200% interpoladas cada 2 pixeles proporcionan un área igual a la calculada por extracción y digitalización de cubierta (EDC), el resto de los tratamientos subestima el área externa, en el caso de los frutos de naranja, las imágenes al 100% (sin redimensionar) y 200% interpoladas cada pixel proporcionaron un área igual a la calculada por extracción. Finalmente en los frutos de pera, las imágenes al 100% (sin redimensionar) y 200% interpoladas cada pixel y las imágenes reducidas un 50% interpoladas cada 2 pixeles proporcionaron un área igual a la calculada por extracción (Cuadro 3.1).

Cuadro 3.1. Comparación de medias por Tukey (0.05) para los métodos de cálculo de área externa en cada especie por separado. Medias con la misma letra dentro de cada fila no son estadísticamente significativas.

	EDC	50 %		100 %		200 %	
		1x1	2x2	1x1	2x2	1x1	2x2
MANGO	185.98 ^A	161.01 ^D	170.29 ^C	171.56 ^C	181.19 ^B	172.93 ^C	185.88 ^A
NARANJA	171.28 ^{CD}	158.85 ^F	168.08 ^E	172.36 ^C	185.62 ^A	169.81 ^{DE}	179.41 ^B
PERA	200.75 ^C	184.43 ^D	195.00 ^C	202.41 ^{CB}	218.26 ^A	199.75 ^C	209.42 ^B

El menor error encontrado en los frutos de mango se obtuvo en las imágenes de mayor tamaño interpoladas cada dos pixeles y fue de 1.6 %, Soto-Rojas (2010) reportó un error de 1.28% en la estimación de porcentaje de área dañada en frutos de mango por el mismo método, pero sin cuantificar área total. En los frutos de naranja fue de 1.1% en las imágenes de mayor dimensión interpoladas cada pixel y en los frutos de pera fue de 5.4% en imágenes sin redimensionar con interpolación cada pixel (Cuadro 3.2). Wang y Nguang (2007) encontraron un error entre 3 y 3.6 % en la estimación de área externa por

procesamiento de imágenes en frutos de limón considerados como elipsoides. Uyar y Erdogan (2009) encontraron un error promedio menor al 1% en la estimación de área externa de frutos de manzana, plátano, fresa y pera mediante un modelo generado con un escáner tridimensional.

La diferencia entre interpolación cada uno y dos pixeles se debe a que el arco calculado es un valor continuo y su representación en la imagen es un valor discreto, por lo tanto es necesario redondear el valor obtenido esto puede generar sub o sobreestimaciones.

El efecto generado por el tamaño de la imagen se debe que la ecuación utilizada no puede ser integrada hasta el valor del semieje (r), ya que en este punto la longitud del arco tiende a infinito. Considerar que los semiejes medidos en la imagen son valores discretos, de tal manera que la ecuación se integró hasta el penúltimo pixel en todos los casos, por lo tanto la participación de un pixel es cambia conforme se modifica el tamaño de la imagen.

Cuadro 3.2. Resumen del error relativo medio de acuerdo a las dimensiones de la imagen para cada especie y método de interpolación.

Interpolación	Mango		Naranja		Pera	
	1x1	2x2	1x1	2x2	1x1	2x2
Redimensión (%)	Error relativo medio (%)					
50	13.33	8.34	7.25	2.12	8.22	6.00
100	7.64	3.53	1.59	4.73	5.43	6.88
200	7.00	1.58	1.09	8.39	5.68	9.99

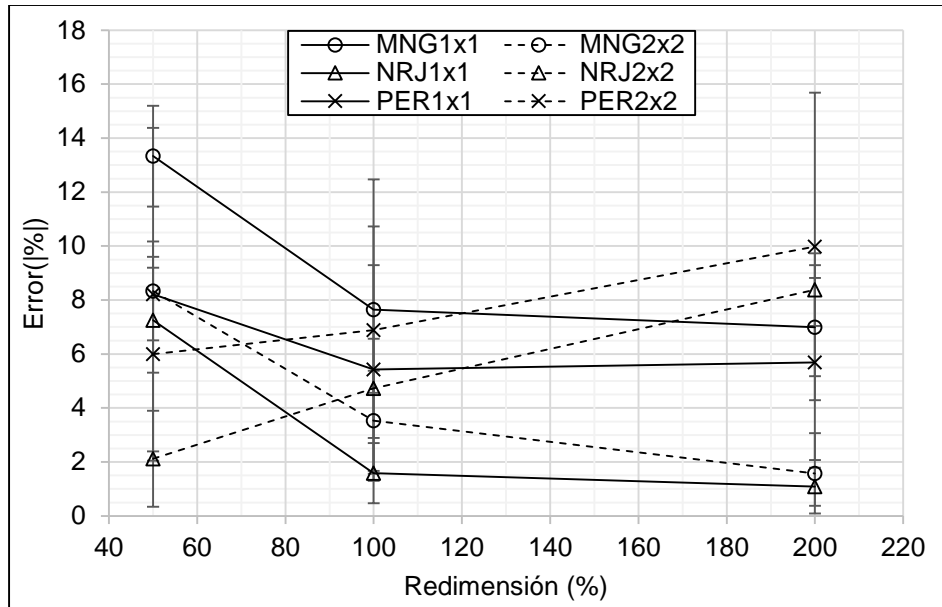


Figura 3.3. Comportamiento del error relativo medio de acuerdo con las dimensiones de la imagen y método de interpolación en cada especie (mango: MNG, naranja: NRJ y pera: PER). La línea continua representa la interpolación pixel por pixel (1x1), la línea punteada la interpolación cada dos pixeles (2x2).

Se realizó un análisis de regresión que relaciona el método de menor error y el área calculada por el método de extracción, para cada especie. Los frutos de mango presentaron un coeficiente de determinación de 0.97. Soto-Rojas (2010) reportó una precisión de 0.987 en estimación de proporción de área dañada por el mismo método, sin embargo no se hace referencia al cálculo del área total. Los frutos de naranja presentaron un valor de R^2 de 0.96. López-García et al. (2010) reportaron una precisión de 0.92 en la detección de porcentaje de defectos individuales en cítricos mediante un detector automático, sin reportar cálculo de área externa. Finalmente los frutos de pera presentaron una precisión de 0.07. Igathinathane y Chattopadhyay (2000) encontraron coeficientes de correlación de 0.99 para modelos lineales en la estimación de área externa de elipsoides comparados con cálculos directos, sin embargo no fueron probados en productos reales. Goñi et al., (2007) reportaron un R^2 entre 0.96 y 0.99 en la estimación de superficie de manzanas por método de elemento finito apoyado por procesamiento de imágenes. Es importante recordar que el programa fue diseñado para figuras elipsoidales, por lo tanto se esperaba que la precisión en frutos de pera fuera baja ya que su forma vertical no se aproxima a una elipse. En la figura 3.4 se muestra el ajuste

a forma elíptica en la sección transversal y longitudinal de los frutos. En la figura 3.5 se presenta la relación entre el área superficial calculada por extracción y la calculada por la proyección geométrica de menor error (cuadro 3.4, Figura 3.5 y 3.6).

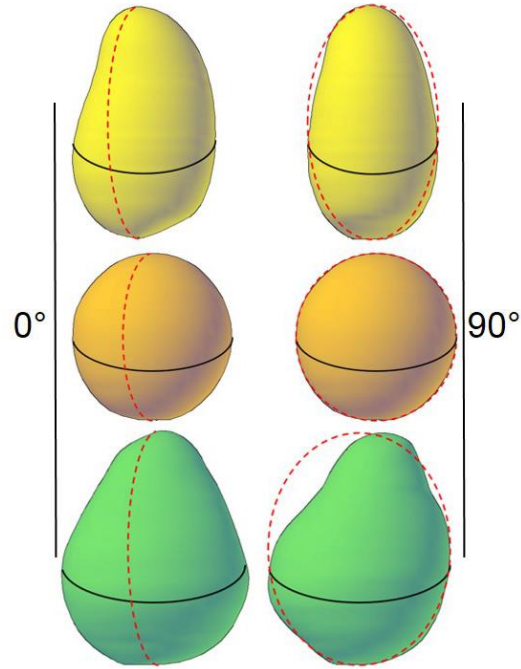


Figura 3.4. Forma transversal elíptica de los frutos en la imagen tomada a 0° y forma vertical elíptica de los frutos en la imagen tomada a 90°, en las tres especies evaluadas.

Cuadro 3.3. Resumen de los parámetros de regresión para cada especie, donde (β_0 : Intersección, β_1 : Pendiente y R^2 : Coeficiente de determinación), para las tres especies evaluadas.

	β_0	β_1	R^2
Mango	-2.8	1.0	0.97
Naranja	3.5	0.97	0.96
Pera	162.2	0.02	0.07

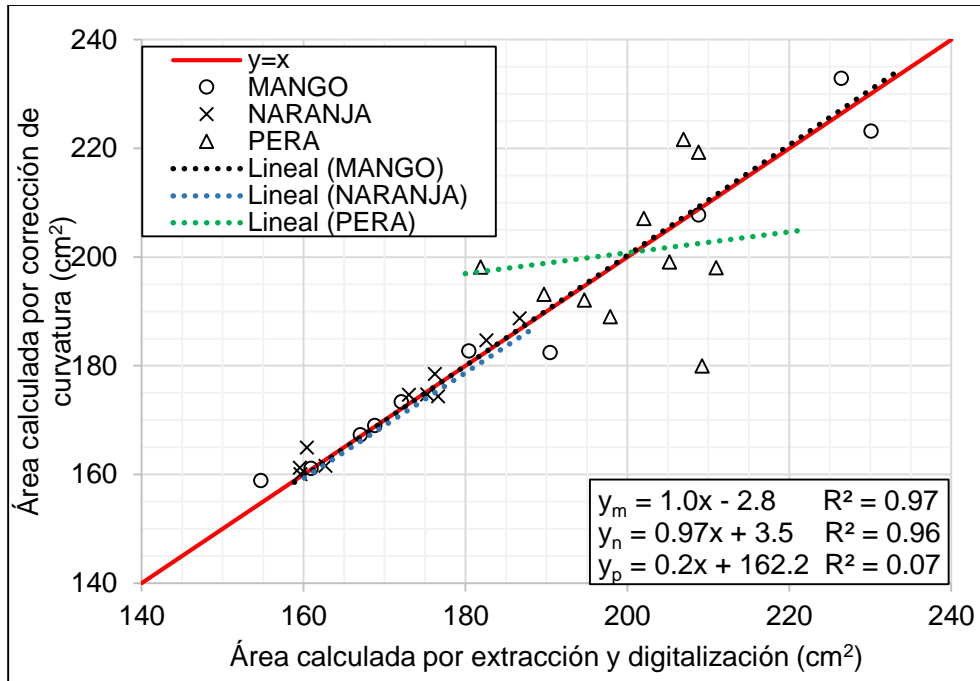


Figura 3.5. Relación de área estimada por la proyección geométrica de menor error y área calculada por extracción y digitalización, en cada especie. Donde “ y_m ” es regresión para mango, “ y_n ” regresión para naranja y “ y_p ” regresión para pera.

3.5 CONCLUSIÓN

La técnica de proyecciones geométricas presentó mejoras en la precisión conforme se incrementó el tamaño de las imágenes con interpolación cada pixel, en las tres especies. Pero en la integración cada dos sólo en los frutos de mango se observó un incremento en la precisión, mientras que en las otras dos especies se presentó una disminución.

Las dimensiones de la imagen tiene un efecto directo en el tiempo necesario para el procesamiento, sin embargo la modificación en los incrementos durante la integración tiene la capacidad de reducir el costo computacional. La calidad de la imagen resultante depende de la calidad de la imagen original. Es posible editar las fotografías y adecuarlas al fenómeno de estudio con el fin de mejorar la definición final.

El método de proyección geométrica, es un herramienta útil en el análisis de superficies provenientes de objetos tridimensionales con forma elipsoidal, ya que es una técnica no destructiva por lo tanto puede aplicarse sobre el mismo fruto más una vez.

La posibilidad de realizar interpolaciones con incrementos pequeños proporciona el potencial de procesar imágenes con cualquier número de clases de color, y de esta manera monitorear la dinámica de color en los frutos de interés.

3.6 RECOMENDACIONES

- Explorar otras fuentes de iluminación como la luz “OLED” que proviene de una superficie para eliminar puntos de brillo.
- Aislar el equipo de la iluminación externa y utilizar sensores con ajuste manual.
- Exportar el método de aproximación elipsoidal a otro lenguaje de programación para disminuir el tiempo de proceso y agregar la posibilidad generar archivos en diferentes formatos.
- Explorar otro método de interpolación para incrementar el área de aplicación, por ejemplo integración de parábolas u otras figuras geométricas.

LITERATURA CITADA

- Ali Bulent, K.** 2007. Determination of watermelon volume using ellipsoid approximation and image processing. *Postharvest Biology and Technology* 45(3): 366-371.
- Apostol T. M.** 1967. *Calculus* 2 ed. John Wiley and sons. USA. 666 p.
- Campbell, D. and E. Howard.** 1978. *Calculus with analytic geometry* 2 Ed. Prindle Webber and Schmidt inc. USA. 878 p.
- Gómez-Sanchis, J., E. Moltó, G. Camps-Valls, L. Gómez-Chova, N. Aleixos and J. Blasco.** 2008. Automatic correction of the effects of the light source on spherical objects. An application to the analysis of hyperspectral images of citrus fruits. *Journal of Food Engineering* 85(2): 191-200.
- Goñi, S. M., E. Purlis and V. O. Salvadori.** 2007. Three-dimensional reconstruction of irregular foodstuffs. *Journal of Food Engineering* 82(4): 536-547.
- Goñi, S. M. and E. Purlis.** 2010. Geometric modelling of heterogeneous and complex foods. *Journal of Food Engineering* 97(4): 547-554.
- Igathinathane, C. and P. K. Chattopadhyay.** 2000. Surface area of general ellipsoid shaped food material by simplified regression equation method. *Journal of Food Engineering* 46(1): 257-266.
- Lehmann, C. H.** 1990. *Geometría Analítica*. Noriega Editores. 536 p.
- Leithold, L.** 1999. *El cálculo* 7 ed. Oxford University Press. 1360 p.
- López-García F., G. Andreu-García, J. Blasco and J-M. Valiente.** 2010. Automatic detection of skin defects in citrus fruits using multivariate image analysis approach. *Computers and Electronics in Agriculture* 71(1) 189-197.
- Manresa, A. G. y I. Vicente.** 2007. *El color en la industria de los alimentos*. Libro de texto electrónico. Disponible en intranet del Instituto de Farmacia y Alimentos de la Universidad de la Habana.

- Omid, M., M. Khojastehnazhand, A. Tabatabaeefar.** 2010. Estimating volume and mass of citrus fruits by image processing technique. *Journal of Food Engineering* 100(2): 315-321.
- Soto-Rojas, L.** 2010. Evaluación de la severidad de antracnosis en frutos de mango usando proyecciones geométricas obtenidas a partir de imágenes digitales. Tesis. Colegio de postgraduados. México.
- Spreer, W. and J. Müller.** 2011. Estimating the mass of mango fruit (*Mangifera indica*, cv. Chok Anan) from its geometric dimensions by optical measurement. *Computers and Electronics in Agriculture* 75(1): 125-131.
- Uyar, R. and F. Erdogdu.** 2009. Potential use of 3-dimensional scanners for food process modeling. *Journal of Food Engineering* 93(3): 337-343.

CAPÍTULO 4

4. POTENCIAL DE LA TÉCNICA DE PROYECCIÓN GEOMÉTRICA PARA LA ESTUDIO DE DINÁMICA DE COLOR EN FRUTOS

4.1 RESUMEN

Se capturaron imágenes de 1 fruto de mango cada 48 horas, se recortaron a 100x1500 pixeles, se eliminó el fondo y pintó de color blanco. Se corrigió la curvatura por el procedimiento descrito en el capítulo anterior. Se determinó el potencial de la técnica para la evaluación de dinámica en cambio de color global, estimación de fracciones y evolución de oscurecimiento. Con la técnica fue posible detectar cambios generales en la coloración externa, porcentaje de cobertura de colores específicos e incremento en área de cobertura de puntos oscuros.

4.2 INTRODUCCIÓN

La apariencia de un fruto es uno de los parámetros de calidad más importantes; dentro de este atributo, el color juega un papel primordial, ya que los consumidores se inclinan fuertemente por un producto de apariencia atractiva (Manresa y Vicente, 2007). Además el color constituye un atributo en la evaluación de calidad, grado de madurez y puede utilizarse como índice de cosecha en diversos frutos, ya que se relaciona con el contenido de sólidos solubles totales (Jha et al., 2007; Lee et al., 2008).

De forma práctica, en los productos hortícolas el color se mide mediante cartas de color, pero en este método interviene la experiencia del quien realiza la medición. En laboratorio, el color se mide con la ayuda de instrumentos, como los colorímetros; sin embargo, estos equipos sólo tienen una pequeña área de visión (Kang, et al., 2008). En la actualidad se ha recurrido a una técnica que integra una cámara digital, una computadora y software gráfico, lo cual constituye una alternativa versátil y de menor costo para medir color en la superficie de los frutos, con la posibilidad de medir el color en cada uno de los pixeles que componen la imagen (Lv, et al., 2010). El software comercial “PhotoShop” presentó una correlación del 98% entre los valores de L, a y b

medidos en colorímetro “Hunter” y los medidos en imágenes digitales (Afshari-Jouybari y Farahnaky, 2011). Sin embargo, dada la gran cantidad de formas geométricas que existen en las frutas y hortalizas, es necesario desarrollar metodología que permitan reconstruir un fruto tridimensionalmente a partir de imágenes planas, con el fin de estimar el área con cambio de color, ya sea provocado por el proceso de maduración normal y/o el provocado por daños.

El objetivo de este experimento fue evaluar la capacidad de la técnica de proyección geométrica en la detección de cambios de color en frutos de mango provocados por el proceso natural de maduración.

4.3 MATERIALES Y MÉTODOS

4.3.1 Selección de material vegetal

Se seleccionó aleatoriamente 1 fruto de mango “*ataulfo*” adquiridos en el mercado local de Texcoco estado de México, posteriormente fueron trasladados al laboratorio de Fisiología Postcosecha en el Colegio de Postgraduados. Se realizaron capturas de imágenes cada 48 horas y una en senescencia.

4.3.2 Captura de imágenes, depuración y proceso

El fruto fue digitalizado con una cámara digital **Fujifilm Finepix JZ110**. Con ayuda del goniómetro se capturaron 4 imágenes cada 90° sobre el eje vertical del fruto, con enfoque y ajuste automático y resolución de 3072x2304 pixeles en formato JPEG.

Las imágenes se recortaron a 1000x1500 pixeles para seleccionar el área correspondiente al fruto y disminuir la proporción de fondo, posteriormente se redimensionaron un 200%, se pintó el fondo de color blanco utilizando el programa de manipulación de imágenes GIMP 2.8.10 de distribución libre. Las imágenes se procesaron con colores reales, en el programa descrito en el capítulo anterior con interpolación cada dos pixeles. Finalmente se comparó cualitativamente el histograma de colores para cada fruto, en software *Image Tool 3.0* (University of Texas Health Science Center at San Antonio).

4.4 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El uso de imágenes con colores reales proporciona la posibilidad de medir cambios en la coloración global del fruto; sin embargo, es posible agrupar los píxeles en colores cercanos y así reducir la gama de colores, con esto se disminuye la variación y el número de clases de color para un análisis particular, y para lograr un análisis más específico existe la posibilidad de segmentar las imágenes, de esta manera se facilita la clasificación o ubicación de clases de color. Finalmente las características de las imágenes a procesar dependen del objetivo que persiga el investigador.

Una vez obtenida la representación plana del fruto, fue posible detectar cambios en su coloración global y se observó un desplazamiento hacia colores claros con un retroceso a colores oscuros finalizando en el color característico de un fruto de mango en senescencia (Figura 4.1). Para la medición exacta del color o la conversión a un espacio estándar es necesario realizar una calibración ya que la iluminación afecta directamente la percepción del color, principalmente la cromaticidad (Santos-Gomes et al. 2014). Existen modelos cuadráticos y redes neuronales artificiales que proporcionan errores cercanos al 1% en la conversión a otras escalas de color (León et al., 2006).

En las imágenes aplanadas es posible ubicar zonas con diferente color y medir su porcentaje de cobertura (Figura 4.2). Así mismo existe el potencial de evaluación de cinética de oscurecimiento provocado factores diversos a través del proceso de maduración (Figura 4.3). En reportes anteriores se obtuvo una precisión de 0.987 en la estimación fracciones afectadas por hongos en un punto específico de madurez (Soto-Rojas, 2010).

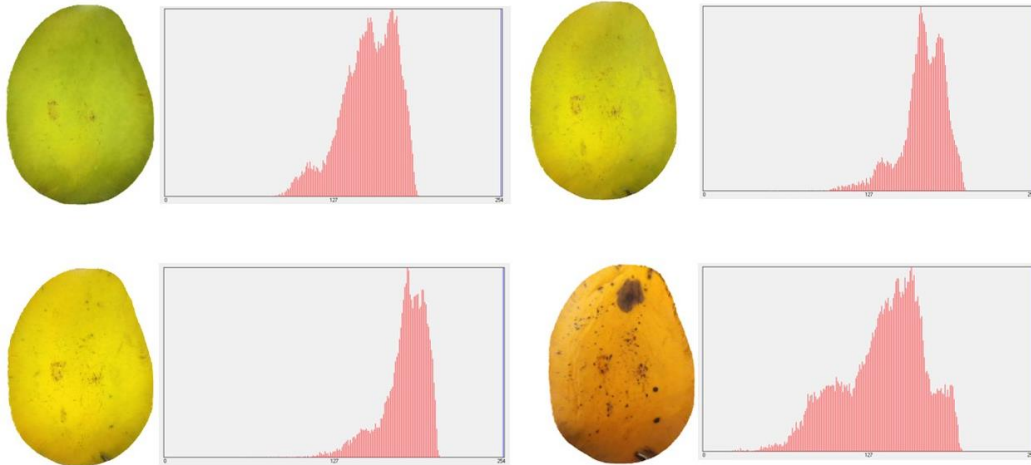


Figura 4.1. Resumen del comportamiento del color global durante el periodo de monitoreo.

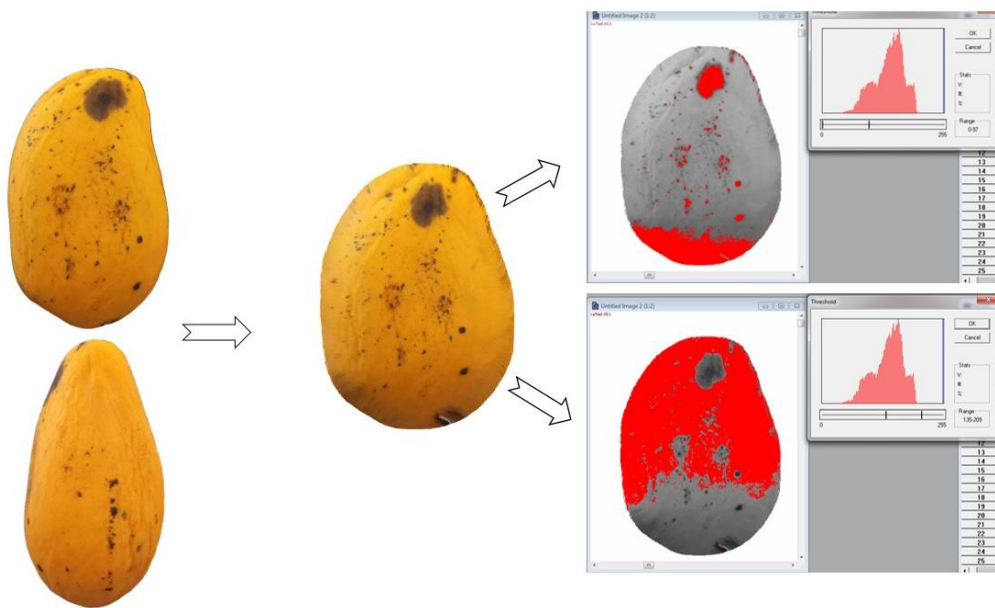


Figura 4.2. Ejemplo de estimación de área total o fracciones de diferente color.

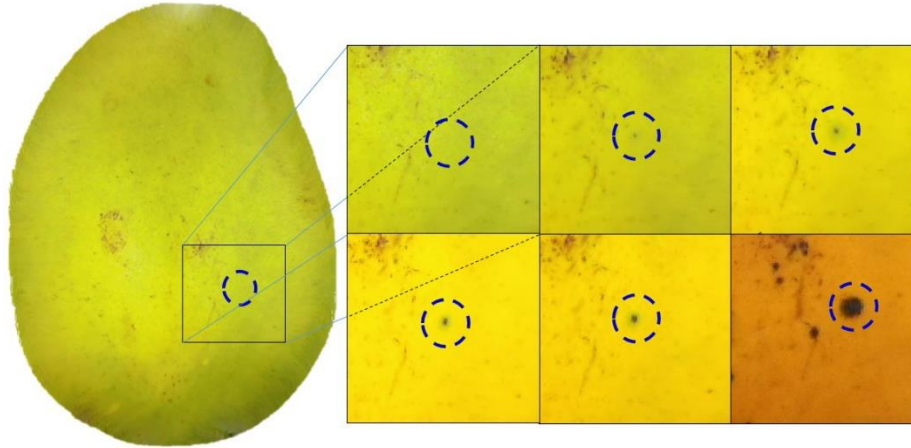


Figura 4.3. Ejemplo de detección de oscurecimiento y/o aparición de manchas.

4.5 CONCLUSIÓN

La técnica de corrección de curvatura por proyección geométrica proporciona la posibilidad de realizar mediciones de color en diferentes puntos del proceso de maduración sobre el mismo fruto y con esto es posible medir la dinámica en el cambio de color por el proceso natural o el provocado por factores externos de cualquier tipo.

Esta técnica también puede utilizarse para evaluar la evolución de tratamientos que alteren el patrón natural de cambio de color, como la aplicación de fungicidas para el control de patógenos o la aplicación de etileno en los procesos de manipulación de maduración o desverdizado, entre otros.

4.6 RECOMENDACIONES

- Explorar otras fuentes de iluminación como la luz “OLED” que proviene de una superficie para eliminar puntos de brillo.
- Aislar el equipo de la iluminación externa, ya que pequeñas variaciones en el flujo luminoso pueden ocasionar diferencia en la información detectada por el sensor.
- Utilizar sensores con ajuste manual para reducir las condiciones no constantes del experimento.

LITERATURA CITADA

- Afshari-Jouybari, H. and A. Farahnaky.** 2011. Evaluation of Photoshop software potential for food colorimetry. *Journal of Food Engineering* 106(2): 170-175.
- Jha, S. N., S. Chopra and A. R. P. Kingsly.** 2007. Modeling of color values for nondestructive evaluation of maturity of mango. *Journal of Food Engineering* 78(1): 22-26.
- Kang, S. P., A. R. East and F. J. Trujillo.** 2008. Colour vision system evaluation of bicolour fruit: A case study with "B74" mango. *Postharvest Biology and Technology* 49(1): 77-85.
- Lee, D.-J., J. K. Archibald, Y. C. Chang and C. R. Greco.** 2008. Robust color space conversion and color distribution analysis techniques for date maturity evaluation. *Journal of Food Engineering* 88(3): 364-372.
- León, K., M. Domingo and F. Pedreschi.** 2006. Color measurement in L*a*b* units from RGB digital images. *Food Research International* 39(10): 1084-1091.
- Lv, B., B. Li, C. Sha, J. Chen and B. Zhu.** 2009. Comparison of color techniques to measure the color of parboiled rice. *Journal of Cereal Science* 50(2): 262-265.
- Manresa, A. G. e I. Vicente.** 2007. El color en la industria de los alimentos. Libro de texto electrónico. Disponible en intranet del Instituto de Farmacia y Alimentos de la Universidad de la Habana.
- Santos-Gomes J. F., R. V. Rezende, I. A. Azara de Oliveira and F. L. Rodrigues.** 2014. Influence of illumination on the characterization of banana ripening. *Journal of Food Engineering* 120(0): 215-222.
- Soto-Rojas, L.** 2010. Evaluación de la severidad de antracnosis en frutos de mango usando proyecciones geométricas obtenidas a partir de imágenes digitales. Tesis. Colegio de postgraduados. México.
- Valero Ubierna, C. and M. Ruiz Altisent.** 1998. Equipos de medida de calidad organoléptica en frutas. *Fruticultura profesional* (95): 38-45.