



INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL
CENTRO INTERDISCIPLINARIO DE INVESTIGACIÓN PARA EL
DESARROLLO INTEGRAL REGIONAL.

Unidad Oaxaca

MAESTRIA EN CIENCIAS EN CONSERVACION Y APROVECHAMIENTO DE
RECURSOS NATURALES

**Encogimiento durante el secado convectivo de
Papaya (*Carica papaya L.*)**

**TESIS QUE PARA OBTENER EL GRADO DE
MAESTRO EN CIENCIAS**

PRESENTA:

ANA GABRIEL RAMÍREZ LAVARIEGA

BAJO LA DIRECCIÓN DE:

DR. JUAN RODRÍGUEZ RAMÍREZ

Oaxaca, Oax. 2015



INSTITUTO POLITECNICO NACIONAL
SECRETARIA DE INVESTIGACION Y POSGRADO

ACTA DE REVISION DE TESIS

En la Ciudad de Oaxaca de Juárez siendo las 13:00 horas del día 03 del mes de diciembre del 2015 se reunieron los miembros de la Comisión Revisora de Tesis designada por el Colegio de Profesores de Estudios de Posgrado e Investigación del **Centro Interdisciplinario de Investigación para el Desarrollo Integral Regional, Unidad Oaxaca** (CIIDIR-OAXACA) para examinar la tesis de grado titulada: "Encogimiento durante el secado convectivo de Papaya (*Carica papaya* L.)"

Presentado por la alumna:

Ramírez	Lavariega	Ana Gabriel
Apellido paterno	materno	nombre(s)

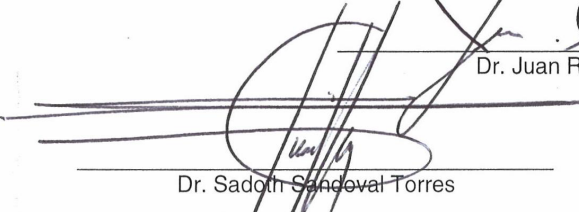


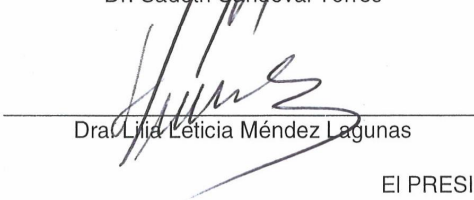
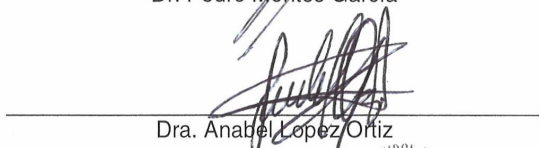
Con registro:

B	1	3	0	0	5	9
---	---	---	---	---	---	---


aspirante al grado de: **MAESTRÍA EN CIENCIAS EN CONSERVACIÓN Y APROVECHAMIENTO DE RECURSOS NATURALES**

Después de intercambiar opiniones los miembros de la Comisión manifestaron **SU APROBACION DE LA TESIS**, en virtud de que satisface los requisitos señalados por las disposiciones reglamentarias vigentes.

LA COMISION REVISORA
Director de tesis

 _____ Dr. Sadoth Sandoval Torres	 _____ Dr. Juan Rodríguez Ramírez	 _____ Dr. Pedro Montes García
 _____ Dra. Lilia Leticia Méndez Lagunas	 _____ Dra. Anabel López Ortiz	

EI PRESIDENTE DEL COLEGIO



Dr. José Rodolfo Martínez y Cárdenas
Encargado de la Dirección





INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL
SECRETARÍA DE INVESTIGACIÓN Y POSGRADO

CARTA CESION DE DERECHOS

En la Ciudad de Oaxaca de Juárez el día 03 del mes diciembre del año 2015, el (la) que suscribe Ana Gabriel Ramírez Lavariega alumno (a) del Programa de **MAESTRÍA EN CIENCIAS EN CONSERVACIÓN Y APROVECHAMIENTO DE RECURSOS NATURALES** con número de registro B130059, adscrito al Centro Interdisciplinario de Investigación para el Desarrollo Integral Regional, Unidad Oaxaca, manifiesta que es autor (a) intelectual del presente trabajo de Tesis bajo la dirección del Dr. Juan Rodríguez Ramírez, y cede los derechos del trabajo titulado: **“Encogimiento durante el secado convectivo de Papaya (*Carica papaya* L.)”** y cede los derechos al Instituto Politécnico Nacional para su difusión, con fines académicos y de investigación.

Los usuarios de la información no deben reproducir el contenido textual, gráficas o datos del trabajo sin el permiso expreso del autor y/o director del trabajo. Este puede ser obtenido escribiendo a la siguiente dirección **Calle Hornos 1003, Santa Cruz Xoxocotlán, Oaxaca**, e-mail: posgradoox@ipn.mx ó anag.lavariega@gmail.com, Si el permiso se otorga, el usuario deberá dar el agradecimiento correspondiente y citar la fuente del mismo.

Ana Gabriel Ramírez Lavariega



CENTRO INTERDISCIPLINARIO
DE INVESTIGACIÓN PARA EL
DESARROLLO INTEGRAL REGIONAL
C.I.D.I.R.
UNIDAD OAXACA
I.P.N.

RESUMEN

Durante el secado de alimentos unos de los principales cambios físicos que ocurren en los alimentos es la deformación y el encogimiento. Los componentes y las características estructurales de la papaya dificultan la predicción del encogimiento durante el secado convectivo.

El objetivo de este trabajo es estudiar el efecto de la temperatura en el encogimiento de cilindros de papaya; además de los cambios estructurales (Densidad aparente, densidad real, porosidad) a lo largo de todo el proceso de deshidratación.

Se realizaron pruebas de secado a 40° y 70°C de cilindros de papaya (2cm de diámetro, 2 cm de altura); se evaluarón los cambios estructurales, la densidad aparente con el método de desplazamiento volumétrico, la densidad real con el uso del método de picnómetro de gas, la porosidad se calculó con la relación entre la densidad aparente y la real. Los cambios de volumen se estimaron por 2 métodos, mediante el análisis de imágenes digitales obtenidas con una cámara con un sistema óptico mejorado (lente Ulbrich) y con la densidad aparente se calculó el volumen aparente (V_p).

Para el análisis de imágenes digitales se utilizó la umbralización en el espacio de color HSB; mediante cambios en la brillantez se cálculo el área de las bases de los cilindros y se midió la altura de los cilindros para determinar el volumen de las piezas a lo largo de todo el proceso.

El encogimiento calculado mediante el análisis de imágenes fue relacionado linealmente con el encogimiento calculado por V_p , se encontró que a 70°C el método por imágenes obtuvo buena correlación con el encogimiento estimado por V_p , se obtuvo un coeficiente de determinación (R^2) de 0.9776. Sin embargo esta relación lineal a 40°C fue debil; el coeficiente R^2 fue de 0.3831

Se encontraron cambios en el comportamiento de la porosidad durante el secado los cuales fueron causados por la temperatura de secado. Ya que mientras a 70°C permaneció aproximadamente constante la porosidad, a 40°C permaneció constante hasta llegar aun contenido de humedad reducido (X/X_0) menor a 0.2 e incrementó drásticamente; donde se se observó la formación de cuerpo de aire en el interior de la piezas estudiadas.

ABSTRACT

During the drying of food one of the main physical changes that occur in food is the deformation and shrinkage. Components and structural characteristics in papaya difficult to predict the shrinkage during convective drying.

The aim of this work is to study the effect of temperature on shrinkage papaya cylinder; besides structural changes (Bulk density, particle density, porosity) throughout the entire drying process.

Drying tests at 40°C and 70°C papaya cylinder (2cm in diameter, 2 cm in height) were performed; structural changes were evaluated, the apparent density to the method of volumetric displacement, the particle density with the use of gas pycnometer method, the porosity was calculated from the relationship between the bulk and the particle density. Volume changes were estimated by 2 methods, by analyzing images taken with a digital camera with an improved optical system (lens Ulbrich) and with the bulk density apparent volume (V_p) was calculated.

Digital image analysis was for thresholding used in the HSB color space; through changes in brightness area bases were calculated and height of the cylinders was measured to determine the volume of the pieces throughout the process.

Shrinkage calculated by image analysis was linearly related to the shrinkage calculated by V_p , it was found that at 70°C the imaging method obtained correlated well with estimated V_p shrinkage, a coefficient of determination (R^2) of 0.9776 was obtained. However this linear relation was weak at 40°C; R^2 coefficient was 0.3831

Changes in porosity behavior were found during drying which were caused by the drying temperature. As at 70°C while the porosity remained approximately constant at 40°C remained constant until even reduced moisture content (X/X_0) of less than 0.2 and increased dramatically; formation air body where inside the pieces studied was observed.

AGRADECIMIENTOS

A mi asesor Dr. Juan Rodríguez, por su paciencia, comprensión, apoyo para poder llevar a cabo este proyecto

A la Dra. Lilia Méndez, por todo el apoyo brindado para el trabajo experimental y sus valiosas observaciones.

A la Dra. Irasema Anaya (†), que me brindó muy valiosas observaciones para mejorar este trabajo.

A la comisión revisora por su valioso tiempo y observaciones para enriquecer este trabajo.

A CONACYT por el apoyo económico brindado para la realización de la maestría.

Al CIIDIR- IPN- Oaxaca por todo el apoyo brindado para el desarrollo del trabajo de tesis.

A mi mamá Enriqueta Lavariega, por todo tu apoyo durante toda la maestría, siempre me has impulsado a mejorar, y nunca has dudado de mí.

No habría podido hacerlo sin ti

A Naomi, mi hija, porque cada día me haces tan feliz. Eres el motor de mi vida y siempre me levantas el ánimo cuando más cansada me siento. Te agradezco tu comprensión por que a veces no te presté todo el tiempo que necesitas pero sabes que trato de hacer lo mejor que pudo.

A mi hermano Carlos, por que me brindas toda tu comprensión y apoyo, me haces reír cuando me siento tan agobiada por el trabajo y también por tu tiempo para escucharme

A mi compañeros y amigos de la maestría, Lau, David, Josué, Checa, Rosy, Fa y Ale, por todos sus consejos y tiempo que me han dedicado.

Tabla de contenido

TEMA	PÁG
ÍNDICE DE TABLAS	iii
ÍNDICE DE FIGURAS	IV
NOMENCLATURA	V
CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN	1
1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	2
1.2 OBJETIVO GENERAL	3
1.2.1 OBJETIVOS PARTICULARES	3
1.3 JUSTIFICACIÓN	4
1.4 HIPÓTESIS.....	5
CAPÍTULO 2. MARCO TEÓRICO	6
2.1 SECADO	6
2.1.1 <i>Secado por convección</i>	7
2.1.2 <i>Condiciones de secado</i>	8
2.2 MECANISMOS DE TRANSFERENCIA DE MASA Y ENERGÍA DURANTE EL SECADO.....	9
2.3 CAMBIOS ESTRUCTURALES PRODUCIDOS POR EL SECADO.....	10
2.3.1 <i>Densidad</i>	11
2.3.2 <i>Porosidad</i>	13
2.4 MECANISMO DE ENCOGIMIENTO	14
2.5 PROCESAMIENTO DE IMÁGENES	15
CAPÍTULO 3. MARCO REFERENCIAL	17
3.1 SECADO	17
3.1.1 <i>Secado convectivo</i>	17
3.2 CAMBIOS ESTRUCTURALES DURANTE EL SECADO	17
3.2.1 <i>Densidad aparente</i>	18
3.2.2 <i>Densidad real</i>	18
3.2.3 <i>Porosidad</i>	19
3.2.4 <i>Encogimiento</i>	19
3.3 PROCESAMIENTO DE IMÁGENES EN ALIMENTOS	20
3.4 PAPAYA.....	24
3.4.1 <i>Secado de papaya</i>	24
CAPÍTULO 4. METODOLOGÍA.....	26
4.1 MUESTRA	26
4.2 SECADO	27
4.2.1 <i>Túnel de secado</i>	27
4.2.2 <i>Condiciones de secado</i>	28
4.2.3 <i>Construcción de las curvas de secado</i>	30

4.3 DETERMINACIÓN DE DENSIDAD REAL	30
4.4 DETERMINACIÓN DE DENSIDAD APARENTE.....	31
4.5 DETERMINACIÓN DEL VOLUMEN DE LA MUESTRA.....	32
4.6 DETERMINACIÓN DEL ENCOGIMIENTO	35
4.6.1 Encogimiento mediante el cálculo de densidad aparente	35
4.6.2 Encogimiento mediante imágenes	35
4.7 DETERMINACIÓN DE LA POROSIDAD	36
CAPÍTULO 5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	37
5.1 SECADO DE PAPAYA.....	37
5.2 PROPIEDADES ESTRUCTURALES DE PAPAYA DURANTE EL SECADO.....	38
5.3 ENCOGIMIENTO.....	42
CAPÍTULO 6. CONCLUSIONES.....	49
REFERENCIAS.....	50
ANEXOS.....	57
ANEXO A. CINÉTICAS DE SECADO CON IMÁGENES	57
ANEXO B. ANÁLISIS DE VARIANZA DE LAS PROPIEDADES ESTRUCTURALES DURANTE EL SECADO DE PAPAYA.....	65
ANEXO C. DATOS EXPERIMENTALES DURANTE EL SECADO DE CILINDROS DE PAPAYA A 70° Y 40°C	67

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Comparación de volumen calculado por imágenes y su error con respecto al método de desplazamiento de agua (Xu <i>et al.</i> 2013).....	21
Tabla 2. Factores y niveles a analizar en los experimentos	28
Tabla 3. Diseño experimental.....	29
Tabla 4. Coeficientes de correlación del encogimiento aparente y encogimiento estimado por imágenes a 70°C	46
Tabla 5. Coeficientes de correlación del encogimiento aparente y encogimiento estimado por imágenes a 40°C	47
Tabla A. 1 Cinética de secado en fotografías a 70°C	57
Tabla A. 2 Cinética de secado en fotografías a 40°C	59
Tabla B.1 Análisis de varianza para datos de densidad aparente a 40 y 70°C.....	65
Tabla B.2 Análisis de varianza para datos de densidad real a 40 y 70°C.....	65
Tabla B.3 Análisis de varianza para datos de porosidad a 40 y 70°C.....	66
Tabla C. 1 Datos experimentales a 70°C	67
Tabla C. 2 Datos experimentales a 40°C	69

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Diferentes mecanismos de eliminación de agua que actúan a nivel microestructural. (Aguilera y Stanley, 1999)	9
Figura 2. Gráfica de $\text{Log}(A/A_0)$ vs $\text{Log}(1/t)$. Fuente: Santacruz <i>et al.</i> (2008)	22
Figura 3. a) Cilindros de papaya en la bandeja de secado, b) Descorazonador de manzana usado para cortar los cilindros de papaya	26
Figura 4. Disposición de los cilindros en el secador	33
Figura 5. Calibración de las imágenes en ImageJ	33
Figura 6. a) Fotografía original, b) fotografía con la umbralización de color sin modificación de la brillantez, c) fotografía con la umbralización de color con modificación en la brillantez	34
Figura 7. Curvas de secado adimensionales de papaya.....	37
Figura 8. Velocidad de secado.....	38
Figura 9. Densidad aparente de papaya durante el secado	39
Figura 10. Densidad real de papaya durante el secado.....	40
Figura 11. Porosidad durante el secado de papaya	41
Figura 12. a) Cara A, b) Cara B, c) Corte transversal del cilindro a los 1600 min	41
Figura 13. Encogimiento aparente durante el secado	42
Figura 14. Encogimiento de área a 70°C.....	43
Figura 15. a) Cilindro fresco de papaya, b) cilindro secado durante 360 min, c) cilindro secado durante 1500 min	44
Figura 16. Encogimiento de área a 40°C.....	44
Figura 17. Encogimiento volumétrico por imágenes a 70°C	45
Figura 18. Correlación del encogimiento por imágenes con el encogimiento aparente a 70°C.....	45
Figura 19. Encogimiento volumétrico por imágenes a 40°C	46
Figura 20. Correlación del encogimiento por imágenes con el encogimiento aparente a 40°C.....	47

NOMENCLATURA

A	Área (cm ²)
A ₀	Área inicial (cm ²)
HR	Humedad Relativa (%)
h	Altura (cm)
m	Masa (kg)
m _{s-a}	Masa del sólido en el aire (g)
m _{s-li}	Masa del sólido en el líquido de inmersión (g)
P ₁	Presión antes de V _A (kg/cm ²)
P ₂	Presión después de V _A (kg/cm ²)
S	Encogimiento
SI	Sistema Internacional
T	Temperatura (°C)
t	Tiempo (min)
T _a	Temperatura del aire de secado (°C)
T _i	Temperatura en el interior (°C)
T _s	Temperatura en la superficie (°C)
V	Volumen (m ³)
v	Velocidad de secado (m/s)
V ₀	Volumen inicial (m ³)
X	Contenido de humedad (kg _w /kg _{ss})

Letras griegas

ρ	Densidad (kg/m ³)
ε	Porosidad
Ω	Resistencia eléctrica

Subíndices

0	Inicial
a	Aire
A	Gas agregado
b	Aparente
bs	Base seca
li	Líquido de inmersión
c	Celda contenedora
p	Partícula (real)
s	Sólido
s-a	Sólido en el aire
ss	Sólido seco
s-li	Sólido en el líquido de inmersión
t	En el tiempo
w	Agua

Capítulo 1. Introducción

El secado es una operación que se ha empleado para aumentar la estabilidad de productos durante su manejo, distribución y almacenamiento (Mclaughlin y Magee, 1998). En los alimentos este método se ha utilizado debido que al disminuir la cantidad de agua presente en el alimento las reacciones de maduración y deterioro se retardan; asimismo el crecimiento bacteriano se ve afectado por la baja disponibilidad de agua.

La demanda de productos de alta calidad en la industria alimentaria requiere productos deshidratados que mantengan sus niveles nutricionales y características sensoriales del producto fresco. Sin embargo se ha determinado que algunos factores son responsables de la disminución de la calidad de los productos durante el proceso deshidratación; uno de esos factores son los cambios físicos que sufre el alimento durante el secado, dentro de ellos está la reducción del volumen.

La pérdida de agua y el calentamiento causa estrés en la estructura celular del alimento dando como resultado cambios en la forma y la disminución en tamaño. Esa disminución de tamaño se le denomina *encogimiento*. El encogimiento de materiales alimentarios tiene consecuencias negativas en la deshidratación de los productos. El cambio de forma, pérdida de volumen y el aumento de la dureza, causa una impresión negativa en el consumidor (Mayor y Sereno, 2004). Lo cual es uno de los principales problemas que presentan los productos finales después del secado, lo que trae consigo una baja calidad sensorial de algunos alimentos (Debaste, et al. 2008, Yuzgec, Turker and Becerikli 2004);

1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

El estudio del encogimiento de los alimentos durante el secado se ha abordado de diferentes perspectivas, como su estudio en los cambios estructurales ocurridos en el alimentos durante el secado (Nieto *et al.*, 2004; Ramos, 2003; Lozano *et al.* 1983); el modelamiento matemático del secado tomando en cuenta el encogimiento (Koç., *et al.* 2008; Krokida, M.K., *et al.* 1997). Actualmente se ha iniciado el estudio del encogimiento através del empleo del procesamiento de imágenes como herramienta para ayudar a explicar los cambios de estructura debidos a la pérdida de humedad (Fernández *et al.*, 2005; Yadollahinia *et al.*, 2009; Sampson *et al.*, 2014).

Para el análisis de imágenes es importante la adquisición de imágenes nítidas que permiten delimitar los bordes de los contornos de los cuerpos de interés para mejor la precisión de las mediciones obtenidas por imágenes. Por ello en este trabajo se incorporó un adaptador óptico a la cámara fotográfica que permite delimitar los bordes de los cuerpos. También cabe mencionar que un sistema de iluminación adecuado favorece a la adquisición de imágenes nítidas y usar técnicas de umbralización basadas en la brillantez por pixeles.

Con estas imágenes nítidas y mediante procesamiento de imágenes se logró medir el cambio de área del alimento durante el proceso de secado. Por otro lado también se analizaron los cambios estructurales de Papaya Maradol durante todo el proceso de secado: densidad real, aparente y porosidad; para determinar el encogimiento en función del contenido de humedad.

1.2 OBJETIVO GENERAL

Estudiar el encogimiento durante el secado convectivo de papaya (*Carica papaya* L.) mediante el procesamiento de imágenes fotográficas digitales y mediciones de densidad real (ρ_p), densidad aparente (ρ_b), y estimación de la porosidad (ϵ) a lo largo del proceso.

1.2.1 OBJETIVOS PARTICULARES

- Determinar el volumen de las muestras durante el secado convectivo mediante el procesamiento de imágenes
- Determinar el volumen real y aparente de las muestras durante el secado convectivo mediante el esteropicnómetro y desplazamiento volumétrico respectivamente
- Determinar si existe correlación entre el encogimiento determinado por imágenes y el encogimiento aparente medido
- Estimar la porosidad durante el secado convectivo mediante la relación de la densidad real y aparente.
- Determinar el coeficiente de encogimiento para el proceso de secado mediante el cambio de volumen.

1.3 JUSTIFICACIÓN

Diseñar secadores que manejen alimentos con alto contenido de humedad es un problema muy complejo debido a las características de las frutas. Una gran cantidad de factores están involucrados en el diseño de secadores, es muy importante poder hacer predicciones apropiadas de las velocidades de secado en partículas encogibles así mismo de los tiempo de secado, que son requeridos para el manejo de un secador (Ochoa *et al.*, 2007)

Es importante el estudio del secado considerando el encogimiento, ya que la simulación y diseño de operaciones de secado requieren la descripción matemática de la evolución de la humedad del alimentos durante el proceso, conocido como cinéticas de secado (Hernández *et al.*, 2000)

Sin embargo estas cinéticas de secado se ven afectadas por cambios que sufren los alimentos durante este proceso, uno de los cambios físicos más importantes que sufren los alimentos durante el secado es la reducción de su volumen. La pérdida de agua y el calentamiento causa estrés en la estructura celular del alimento, cambiando principalmente la forma y disminuyendo las dimensiones (Mayor and Sereno, 2004).

El fenómeno de encogimiento está relacionado con otros cambios en las propiedades físicas del alimento, aún no es bien comprendido, por ello se requiere estudiar los cambios en dichas propiedades física durante el secado de los alimentos. La densidad es una propiedad estructural importante en materiales secos. Como parámetro de calidad, es importante en la caracterización y predicción de calidad de los productos deshidratados, además este parámetro es útil para el cálculo del encogimiento.

Un método que se ha sido utilizado para las determinaciones de volumen, en los últimos años, es el uso de imágenes, el cuál es un método rápido, y que permite evaluar el volumen en tiempo real durante el proceso de secado. Lo que ayudará al estudio del encogimiento sufrido durante el proceso de secado en productos agroalimentarios.

1.4 HIPÓTESIS

El encogimiento durante el secado convectivo de cilindros de papaya, medido mediante el análisis de imágenes fotográficas se ajusta linealmente ($R^2 > 0.90$) con el encogimiento calculado mediante método de desplazamiento volumétrico.

La temperatura de secado influye en los cambios estructurales (ρ_b , ρ_p , ϵ , S) durante la deshidratación de cilindros de papaya, una mayor temperatura de secado da como resultado cilindros de papaya más densos, menos porosos y con un coeficiente de encogimiento mayor

CAPÍTULO 2. MARCO TEÓRICO

2.1 SECADO

Secado significa la remoción de cantidades de agua relativamente pequeñas de cierto material. La evaporación se refiere a la eliminación de cantidades grandes de agua; el agua es eliminada en forma de vapor a su punto de ebullición. En el secado, el agua casi siempre se elimina en forma de vapor con aire. El secado suele ser la etapa final de los procesos antes del empaque y permite que muchos materiales, sean adecuados para su manejo (Geankoplis, 2002).

El objetivo fundamental del secado de alimentos es la extracción de agua de los sólidos hasta un cierto nivel, en que las reacciones de descomposición químicas y microbiológicas se reducen al mínimo (Krokida *et al.*, 2003)

Los procesos de secado pueden clasificarse de acuerdo con las condiciones físicas usadas para adicionar calor y extraer vapor de agua:

1. El calor se añade por contacto directo con aire caliente a presión atmosférica, y el vapor de agua formado se elimina por medio del mismo aire.
2. Secado al vacío, la evaporación del agua se da con mayor rapidez a presiones bajas y el calor se añade indirectamente por contacto con una pared metálica o por radiación, o el uso de bajas temperaturas a vacío
3. La liofilización, el agua se sublima directamente del material congelado (Geankoplis, 2002).

El interés de este trabajo se centró en el tipo de secado donde el calor se añade por contacto directo, o también conocido como secado por convección.

2.1.1 Secado por convección.

Durante el proceso de secado por convección ocurren mecanismos acoplados de transferencia de masa y calor. Para mayor estabilidad del alimento, el contenido de agua debe disminuir hasta alcanzar un valor de humedad final menor de $0.12 \text{ kg}_w/\text{kg}_{ss}$, donde los microorganismos que provocan la descomposición no pueden crecer y multiplicarse por la ausencia de agua.

El secado convectivo está definido en 2 períodos, el primero de velocidad constante y el segundo período donde hay una caída de velocidad. En el primer período la principal evaporación se lleva a cabo en la superficie del cuerpo donde la humedad es transportada del interior del cuerpo debido a la capilaridad y la velocidad de evaporación en este período es independiente del tiempo. La temperatura del cuerpo es constante y muy similar a la temperatura de bulbo húmedo. Este primer periodo termina en el momento que la humedad de la superficie llega a un valor crítico.

Cuando el secado continúa el líquido dentro del cuerpo llega hasta cierto límite, primero en los capilares largos y después en los más pequeños. La velocidad de secado disminuye en esta etapa y la temperatura del cuerpo aumenta por encima de la temperatura de bulbo húmedo, aproximándose a la del aire. En esta segunda etapa denominada de velocidad decreciente, la interfase vapor- líquido retrocede hacia el interior del cuerpo (Kowalski & Rybicki, 2007)

De manera general, el secado por aire es considerado como un proceso simultáneo de transferencia de masa y calor, donde la transferencia de agua se da en el alimento por difusión dentro del material del alimento hacia la interface aire-alimento, y de la interface al flujo de aire por convección. El calor es transferido por convección del aire a la interface aire-alimento, y por conducción al interior del alimento (Zogzas & Maroulis, 1996). Es importante conocer que la cinética de secado depende de la velocidad de transferencia de calor y de la velocidad de evaporación (Huerta, 2008)

2.1.2 Condiciones de secado

2.1.2.1 Temperatura del aire durante el secado.

Se ha demostrado que la variable que tiene mayor influencia en la calidad del producto alimenticio es la temperatura del aire de secado. Altas temperaturas y tiempos largos de secado pueden causar serios daños en el sabor, color, nutrientes y pueden reducir la densidad aparente y la capacidad de rehidratación de productos secos (López- Ortiz, 2011)

2.1.2.2 Velocidad del aire de secado

En la primera etapa del secado se ha observado un influencia significativa de la velocidad del aire que intensifica la transferencia de calor y masa (Piotrowski & Lenart, 1998). Al inicio del secado se encuentra la mayor cantidad de agua dentro del material para ser removida. Al hacer pasar rápidamente aire (1.5 - 4 m/s), el agua es eliminada velozmente. En la segunda etapa del secado la humedad del sólido disminuye considerablemente y la rapidez con que la humedad pueda migrar del interior del alimento hacia la superficie es muy pequeña (Velić *et al.*, 2004). Aunque la velocidad del aire sea elevada no se puede eliminar más agua que la que se encuentre en la superficie.

2.2 MECANISMOS DE TRANSFERENCIA DE MASA Y ENERGÍA DURANTE EL SECADO

El movimiento de la humedad dentro del alimento depende de dos elementos: la porosidad y estructura del alimento y la interacción entre la humedad y la matriz del alimento. El movimiento del agua dentro del sólido se puede observar de manera gráfica en la Figura 1, donde se muestran los diferentes mecanismos de eliminación de agua que actúan a nivel microestructural.

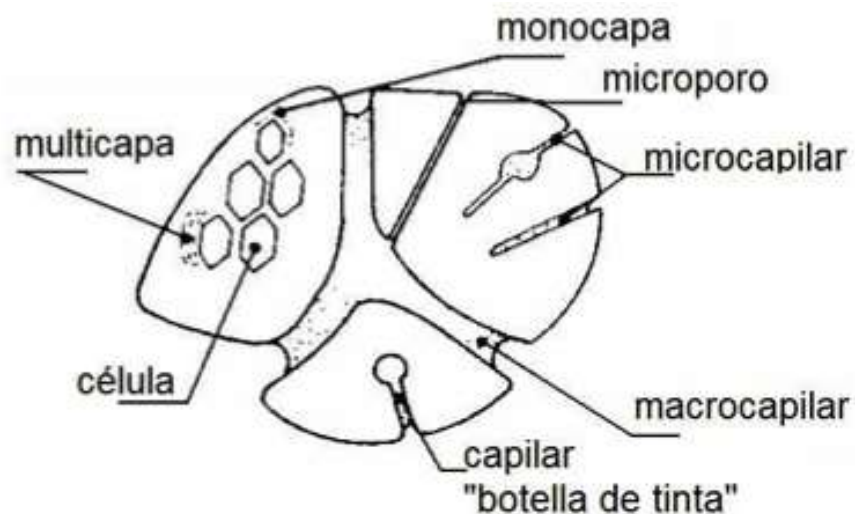


Figura 1. Diferentes mecanismos de eliminación de agua que actúan a nivel microestructural. (Aguilera y Stanley, 1999)

Teoría de la capilaridad. El flujo de un líquido a través de espacios y sobre la superficie de un sólido por causa de la atracción molecular, que genera fuerza de presión, entre el líquido y el sólido es conocido como la capilaridad; es decir el movimiento del líquido se origina por una fuerza neta debida a la carga hidrostática y a los efectos de la tensión superficial (Barbosa y Vegas, 1996).

Teoría de la difusión. El principal mecanismo de flujo en el secado de un sólido es la difusión del fluido a través del sólido (Geakoplis, 2002). Esta toma lugar dentro de las finas estructuras del sólido y en los capilares, poros y pequeños espacios llenos con el fluido, éste difunde hasta llegar al final del capilar. Sin embargo en la teoría de la difusión no se considera el encogimiento, siendo el flujo del fluido afectado fuertemente por el tamaño y la cantidad de poros, la consistencia y la geometría de la matriz del sólido (Barbosa & Vegas, 1996).

La difusividad de agua del alimento, depende fuertemente la humedad, temperatura y estructura del alimento. En materiales porosos, la porosidad y la distribución de la estructura del poro afectan significativamente la difusividad (Saravacos & Maroulis, 2001)

2.3 CAMBIOS ESTRUCTURALES PRODUCIDOS POR EL SECADO

La tecnología de alimentos se puede definir como una forma controlada de intentar conservar, transformar o destruir una *estructura* (Aguilera, 2005). La mayoría de los productos alimenticios se componen de una variedad de elementos estructurales, tales como gotas, células de aire, gránulos, cristales, hebras, micelas y las interfaces. Para la comprensión adecuada del comportamiento de un producto alimenticio se requiere el conocimiento de su estructura, es decir, la disposición espacial de los elementos estructurales y sus interacciones. Las fuerzas de interacción determinan la consistencia y la estabilidad física de los productos alimenticios (Heertje, 2014).

Los cambios en las características micro-estructurales son indicadores de los cambios en las características macro-estructurales, tales como: densidad, porosidad, encogimiento y agrietamiento (Aguilera y Stanley, 1999). La densidad y la porosidad son propiedades físicas importantes que caracterizan la textura y la calidad de alimentos secos y de humedad intermedia (Wang y Brennan, 1995)

2.3.1. Densidad

La densidad de alimentos secos es esencial en el diseño de procesos de alimentos y el equipo de procesamiento. En esos procesos se encuentra el secado; y en el proceso de modelado, la densidad es utilizada para el estudio del fenómeno de transporte durante el secado o procesos donde se involucren cambios de volumen de la fase sólida y la concentración de las fases móviles (Rodríguez- Ramírez et al. 2012)

La densidad se define como masa por unidad de volumen (su unidad en SI es kg/m^3). Sin embargo, existen diferentes formas de densidad tales como: real, de materiales, de partículas, aparente y mayor. El método de medición de volumen determina las diferencias entre ellas. Las densidades real y de materiales se calculan sin tomar en cuenta el volumen ocupado por los poros internos y externos; mientras que las densidades de partículas y la aparente se determinan por procesos menos precisos que incluyen el volumen de los poros (Barbosa- Cánovas *et al.* 2004).

2.3.1.1 Mediciones de volumen

Para determinar el volumen existen diferentes formas de medición, que son:

El **volumen real** se puede determinar mediante una medición en un esteropnómetro (utilizando helio o nitrógeno); en esta medición se excluye el volumen interparticular; y tiene la ventaja de ser exacto, sin embargo depende del tipo de muestra y considera los efectos de la presión de gas en la estructura de materiales porosos. La desventaja es que necesita una calibración muy precisa, ya que pequeñas variaciones en la presión del gas dentro de la cámara incrementa significativamente el error (Rodríguez- Ramírez *et al.* 2012).

El **volumen aparente** puede medirse mediante los siguientes métodos:

1. Desplazamiento volumétrico. Es empleado para materiales sólidos que no absorben el líquido fácilmente. Hay dos formas de medirlo:
 - a. Usando una bureta o un cilindro graduado. El sólido se sumerge en el líquido y se mide el volumen desplazado del líquido (Zogzas *et al*, 1994).
 - b. Usando el método de fuerza boyante. La muestra es pesada dentro y fuera de un líquido de inmersión de densidad conocida. La muestra debe permanecer suspendida en el líquido y no tocar el fondo o las paredes del contenedor.
 - i. Las ventajas de este método es su facilidad de medición, el tiempo de medición es pequeño, se aplica a muestras con cualquier forma
 - ii. Las desventajas es que los líquidos de inmersión usados generalmente son tóxicos, el líquido en teoría no es absorbido por la muestra, además la presencia de burbujas en la muestra o en el líquido de inmersión puede causar errores de medición y por último el método no es automático, es decir durante el secado las muestras deben ser extraídas periódicamente (Rodríguez- Ramírez *et al*. 2012)

2.3.1.2 Densidad real

Está definida como el cociente de la masa sobre el volumen de una muestra, sin considerar los poros en el material (volumen real).

$$\rho_p = \frac{m_s + m_w}{V_s + V_w} \quad \text{Ecuación 1}$$

Donde: m_s y m_w son la masa del sólido seco, y la masa del agua, respectivamente. V_s y V_w , son volumen del sólido y volumen del agua (Rodríguez-Ramírez *et al.* 2012).

2.3.1.3 Densidad aparente

La densidad aparente se define como la relación entre la masa y el volumen del material, incluyendo poros y agua (volumen aparente).

$$\rho_b = \frac{m_s + m_w}{V_s + V_w + V_a} \quad \text{Ecuación 2}$$

Donde: m_s y m_w son la masa del sólido seco, y la masa del agua, respectivamente. V_s , V_w , y V_a son volumen del sólido, volumen del agua y volumen del aire respectivamente (Rodríguez-Ramírez *et al.* 2012)

2.3.2 Porosidad

En el secado de materiales porosos, la porosidad es una variable que depende del contenido de humedad y el encogimiento (Martynenko, 2008). La porosidad indica la fracción de volumen de espacio vacío o de aire dentro de un material. La determinación de volumen es relativo a los poros internos (cerrados) o externos (abiertos) presentes en la estructura de los alimentos. La porosidad puede ser medida por métodos directos y microscópicos o puede ser estimado a partir de datos de densidad (Barbosa- Cánovas *et al.* 2004). La porosidad se puede calcular con la ecuación 3:

$$\varepsilon = 1 - \frac{\rho_b}{\rho_p} \quad \text{Ecuación 3}$$

Donde: ρ_b y ρ_p son la densidad aparente y densidad real respectivamente.

El desarrollo de los poros y el encogimiento dependen de la variación en el mecanismo de transporte de la humedad y la presión externa. Así que el método y condiciones de secado tienen un efecto significativo en las características del producto final afectados por la porosidad, el encogimiento y la densidad aparente (Koç *et al.*, 2008).

2.4 MECANISMO DE ENCOGIMIENTO

Los sistemas alimentarios sólidos y semi- sólidos son materiales altamente heterogéneos, y pueden ser considerados como una red en 3 dimensiones o una matriz sujeta, con altas cantidades de fase líquida, y en muchos casos en solución acuosa.

La estructura particular del material y las características mecánicas de sus elementos en equilibrio, definen la forma, el volumen y determina su tamaño y forma. Cuando el agua es removida del material, se produce un desbalance entre las presiones interna del material y la externa, lo que genera fuerzas de tensión y contracción que conducen al encogimiento del material o el colapso estructural; cambios de geometría y en ocasiones, agrietamiento.

El encogimiento durante el secado de alimentos se produce cuando la matriz viscoelástica se contrae en el espacio ocupado anteriormente por el agua extraída. El encogimiento de alimentos será mayor, entre mayor sea el agua removida y por lo tanto mayor será la presión de contracción generada en el material (Mayor y Sereno, 2004).

La aproximación teórica del encogimiento considera las fuerzas mecánicas, y toma en cuenta el estrés del material y la deformación durante la deshidratación. Esta aproximación puede ser complicada cuando es aplicada a alimentos, dado que estos son tejidos de naturaleza celular y multifase (Ochoa *et al.*, 2007)

El estrés total que actúa en el fluido saturado en un medio poroso consiste en general en el estrés efectivo en la matriz sólida y el estrés del fluido del poro. El estrés del fluido es considerado mucho menor que el de la matriz sólida, por lo que el estrés en el fluido generalmente se toma como la presión del poro y en el secado convectivo el gradiente de la presión del poro se asume como insignificante (Kowalski y Rybicki, 2007)

2.5 PROCESAMIENTO DE IMÁGENES

Una imagen puede ser definida como una representación espacial de un objeto o una escena. Una imagen monocromática digital es una función bidimensional (2-D) de la intensidad luminosa, denotada por $I(x,y)$, donde el valor o amplitud de intensidad I con coordenadas espaciales (x,y) es directamente proporcional de energía radiante (Gunasekaran, S., 1996)

En una fotografía puede observarse cada punto en el espacio de un impulso de luz, el cual está asociado a la información de color a ese punto. Por lo tanto, un modelo matemático para describir una imagen es una función definida en una superficie de dos dimensiones y tomando valores en un espacio de color.

Sin embargo cuando se habla de imágenes en 3 dimensiones, pueden ser incluidas también la fotografías: ya que dentro de estas hay elementos que crean dicho efecto de tres dimensiones, como: las sombras (cambios de brillo), los tonos, las perspectivas, esto es en una sola imagen. En dos o más imágenes del mismo objeto el efecto de 3 dimensiones se observa al cambiar el ángulo de visión de dicho objeto; también están las imágenes con movimiento. Este conjunto de imágenes acarrear información de una imagen en 2 dimensiones para dar un efecto en 3 dimensiones (Toriwaki y Yoshida, 2009).

En las últimas décadas, la necesidad de contar con herramientas más precisas de análisis de las características físicas de los objetos ha ido en aumento. En el área de los alimentos la búsqueda de técnicas favorezcan a la estandarización de la calidad de éstos ha impulsado al desarrollo de Sistemas de Procesamiento y Análisis de Imágenes Digitales (SPAID). (Barceló, *et al.* 2012)

Dentro de estos sistemas está: la visión por computadora(CV); cuyo objetivo es que dada una imagen, se pueda obtener información sobre las propiedades físicas, geométricas o topológicas de los objetos que aparecen en ella. (Velho, L. *et. al.* 2009)

Los sistemas de visión por computadora han incrementado su uso en la industria de alimentos, esencialmente como sistemas de inspección que reemplace al humano. Estos sistemas ofrecen la posibilidad de automatizar el análisis, estandarizando las técnicas y eliminando la inspección manual (Brosnan & Sun, 2004).

La CV consiste en la adquisición, clasificación y reconocimiento de imágenes digitales. La cuál es definida como un arreglo bidimensional de píxeles con diferente intensidad luminosa (escala de gris).

Una operación importante en el procesamiento de imágenes es la segmentación, en esta etapa se subdivide una imagen en un número de regiones homogéneas. Cada región homogénea está constituida en partes u objetos en el escena entera; de estas regiones se extraen los objetos de interés y se puede hacer en un proceso continuo. De estas extracciones se puede analizar características significativas como textura, color y forma. Estas características son medibles.

Los descriptores de forma que pueden ser medibles en una imagen son: longitud, anchura, relación aspecto, área, localización, perímetro y compactación (Acharya y Ray, 2005).

CAPÍTULO 3. MARCO REFERENCIAL

3.1 SECADO

El secado de alimentos es una de las operaciones que ha sido ampliamente estudiada, dado que es un método de conservación de alimentos que ayuda a preservarlos por largos períodos de tiempo sin adición de conservadores químicos.

En el secado se han estudiado cambios en la estructura (ρ_b , ρ_p , ϵ) durante el proceso (Lozano *et al.* 1983; Wang y Brennan, 1995; Krokida *et al.* 1997), cinéticas de secado de diferentes materiales en diferentes condiciones de secado (Vengaiah & Pandey, 2007; Krokida *et al.* 2003, Velić *et al.* 2004), modelamiento matemático del fenómeno (Wang y Brennan, 1995; Krokida *et al.* 1997; Yuzgec *et al.* 2004) y se ha observado que ocurre un fenómeno llamado encogimiento, el cual también ha sido estudiado de diversas formas (Zogzas *et al.* 1994; Krokida *et al.* 1997; Madiouli *et al.* 2012; Yadollahinia *et al.* 2009).

3.1.1 Secado convectivo

Durante el secado convectivo diversos autores (Lozano *et al.* 1983; Zogzas *et al.* 1994; Wang y Brennan, 1995) han observado que la estructura del alimento se modifica durante el proceso, por lo que han enfocado sus investigaciones a analizar estos cambios.

3.2 CAMBIOS ESTRUCTURALES DURANTE EL SECADO

MacMinn y Magee (1997) encontraron que el grado de deshidratación depende de las condiciones de secado, preparación de la muestra, composición de la muestra, pero sobre todo de los cambios estructurales (ρ_b , ρ_p , ϵ) que ocurren durante el secado.

3.2.1 Densidad aparente

Zogzas *et al.* (1994) consideran que la densidad aparente depende del coeficiente de encogimiento de volumen y el contenido de humedad. El incremento de la densidad se produce como resultado de la evaporación del agua durante el secado, como en pera, papa y ajo (Lozano *et al.* 1983), manzana, papa y zanahoria (Zogzas *et al.*, 1994). Sin embargo el incremento en la temperatura de secado produce una disminución de la densidad aparente como lo reportado por Wang y Brennan (1995) donde explican que en las primeras etapas del secado, la densidad disminuye conforme disminuye el contenido de humedad, pero conforme avanza la reducción del contenido de humedad, la densidad aumenta.

3.2.2 Densidad real

Se ha considerado que la densidad real de los alimentos aumenta linealmente con la disminución del contenido de humedad, según lo encontrado por Lozano *et al.* (1983); sin embargo encontraron que esta tendencia lineal no se cumple en el caso de zanahoria, pera, papa y papa dulce (Lozano *et al.* 1983; Zogzas *et al.* 1994; Wang y Brennan, 1995)

Diversos autores han propuesto una correlación mediante de una regresión no lineal para predecir la densidad real y aparente como función del contenido de humedad. Sin embargo los resultados no son generalizados, sólo son válidos para materiales, geometrías y condiciones de secado usadas en dichos trabajos (Lozano *et al.* 1983; Zogzas *et al.* 1994; Koç *et al.* 2008; Krokida y Maroulis, 1999),

López- Ortiz *et al.* (2011) encontraron un comportamiento no lineal para la densidad del sólido con respecto al contenido de humedad y la temperatura en ajo; esto lo atribuyeron a la contracción o expansión del volumen del material sólido.

3.2.3 Porosidad

La estructura de poros de biomateriales es el factor clave que afecta el transporte de masa y calor en biomateriales capilar-porosos (Luikov, 1975) El proceso de la formación de poros es muy complejo en la naturaleza y depende de las condiciones de secado (Krokida & Maroulis 1997) y las propiedades viscoelásticas (Rahman, 2001)

Rahman (2001) agrupó el desarrollo de la porosidad en 2 tipos:

- a) Un incremento o disminución constante de porosidad con el contenido de humedad
- b) Con puntos de inversión en el contenido crítico de humedad. Este comportamiento es típico de biomateriales; esto puede ser explicado por el cambio en las propiedades viscoelásticas en algún punto de la humedad crítica (Lozano et al. 1983)

Estos casos pueden ser observados en los resultados obtenidos en investigaciones anteriores, por ejemplo la porosidad disminuyó durante todo el proceso de secado en papa dulce (Lozano et al. 1983, Krokida & Maroulis 1997); en otros casos como en la manzana y el plátano, la porosidad durante todo el proceso de secado incrementó (Mayor *et al.* 2011), mientras que en la pera la porosidad disminuyó en un principio; sin embargo terminó incrementándose.

3.2.4. Encogimiento

En sistemas alimentarios no es posible despreciar el encogimiento, dado que se ha observado su influencia en el pronóstico del contenido de humedad mediante modelos matemáticos (Krokida *et al.* 1997; Hernández *et al.* 2000; Koç *et al.* 2008)

Martynenko (2011) observó que al inicio el secado de raíces de ginseng, el encogimiento siguió un comportamiento lineal; sin embargo, después de un contenido de humedad reducido (X/X_0) de 0.8 el encogimiento fue más lento que los cambios de humedad, y al final cuando X/X_0 fue menor a 0.1, el encogimiento fue más rápido que los cambios de humedad. Esta desviación de la linealidad fue atribuida como resultado de los cambios de densidad y porosidad.

El encogimiento de alimentos inicialmente era considerado homogéneo, sin embargo, Ratti (1994) encontró que el encogimiento de alimentos no lo es. En etapas tempranas del secado, las partículas mantienen su geometría original; sin embargo, cuando el encogimiento ya es considerable, no es posible determinar el volumen y el área de las partículas a través de mediciones directas de sus dimensiones. Dado que durante el secado se da la deformación del material y que a bajos contenidos de humedad las formas son muy irregulares, lo que dificulta el cálculo de volumen de dichos cuerpos deformados.

Diversas técnicas se han utilizado para la determinación de volumen de los cuerpos deformados, actualmente se ha incorporado el procesamiento de imágenes para la estimación de volumen en alimentos.

3.3 PROCESAMIENTO DE IMÁGENES EN ALIMENTOS

El procesamiento de imágenes computarizado ha aumentado su uso en la industria alimentaria para el control de procesos. Es la herramienta más eficaz para la medición de características externas como intensidad de color, homogeneidad de color, magulladuras, tamaño, forma y la identificación del tallo (Omid *et al.* 2010).

Estos sistemas de inspección con cámaras con tecnologías computacionales se han utilizado también en el análisis sensorial de productos agrícolas y alimentarios (Brosnan y Sun, 2004). En alimentos la visión computarizada en alimentos ha tenido aplicaciones tales como: análisis de color para determinar grado de maduración (Pereira, C. 2009, Barceló, *et al.* 2013), predicción y caracterización de propiedades físicas y químicas (Huang *et al.* 1997, Thybo *et al.* 2004, Omid *et al.* 2010), evaluación y determinación de características sensoriales (Du y Sun, 2005).

El uso de imágenes también permite determinar áreas de productos irregulares (Sampson, D. *et al.* 2014) y el volumen de productos esféricos y elipsoidales (Omid *et al.* 2010; Walker y Panozzo, 2012), además, estimar el volumen en alimentos de formas irregulares (Xu *et al.* 2013).

La técnica de Xu *et al.* (2003) es un algoritmo llamado “*Shape from Silhouettes*” modificado, en el cual mediante el uso de 15- 20 imágenes en diferentes ángulos establecidos, y el reconocimiento de contornos dentro de las imágenes les permitió reconstruir el cuerpo en 3 dimensiones mediante un modelo matemático. Con esta reconstrucción lograron estimar el volumen del alimento mostrado en las imágenes; correlacionaron el método con la determinación del volumen por el método físico de desplazamiento de agua y obtuvieron lo siguiente:

Tabla 1. Comparación de volumen calculado por imágenes y su error con respecto al método de desplazamiento de agua (Xu *et al.* 2013)

Alimento	Volumen estimado por multi-view (mL)	Error con respecto al método de desplazamiento de agua (%)
Plátano	180.8	5.0
Bagel	161.2	7.3
Jugo de naranja	179.9	10
Arroz crujiente	82.8	18.2

Como se observa el error mayor fue encontrado en el arroz crujiente, probablemente debido a la dificultad del reconocimiento de contornos de este material.

Por otro lado para productos sometidos al proceso de secado Santacruz *et al.* (2008) utiliza el procesamiento de imágenes fractales para describir el encogimiento-deformación en placas de manzana secadas bajo diferentes condiciones. Utilizaron el factor (A/A_0) (A , es el área proyectada superior en cualquier tiempo; A_0 , área inicial) para describir el encogimiento.

Con respecto al tiempo de secado encontraron que este cambio no corresponde a un cambio lineal, sigue un patrón irregular típico de funciones no lineales. Y describieron el comportamiento mediante la gráfica de $\log(A/A_0)$ vs $\log(1/t)$, lo que les permitió encontrar 3 etapas que corresponden a diferentes niveles de encogimiento. Las mayores irregularidades las dieron las condiciones de secado más altas 60° y 70°C, y flujos de aire de 2 y 3 m/s.

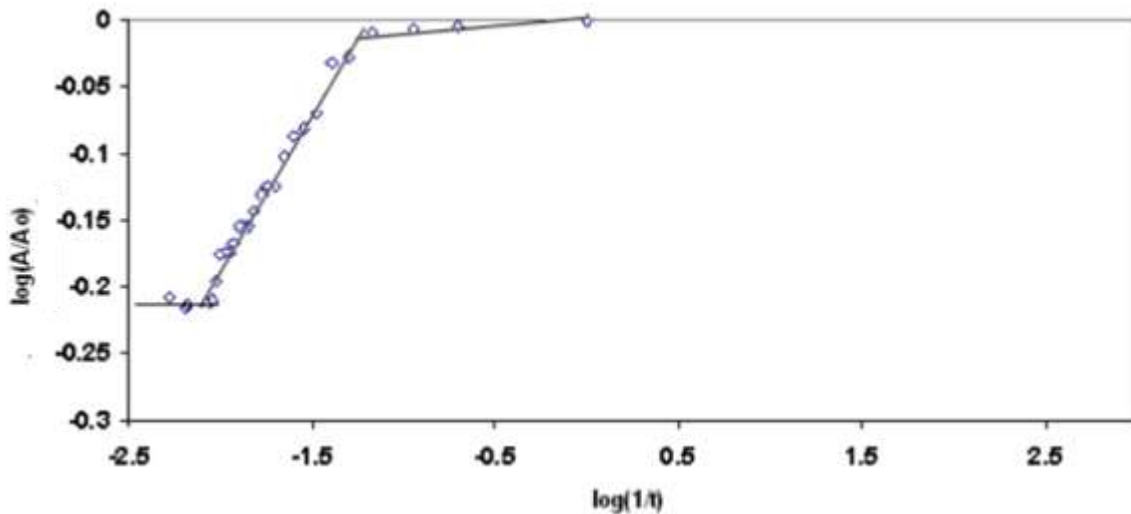


Figura 2. Gráfica de $\log(A/A_0)$ vs $\log(1/t)$. Fuente: Santacruz *et al.* (2008)

En 2008 Yan *et al.* estudiaron el encogimiento de rebanadas de mango, piña y plátano durante el secado convectivo, mediante el análisis de imágenes, en este trabajo con ImageJ® y su herramienta de umbralización binaria (Cambio de la imagen al umbral binario) analizaron área (contenida en un contorno), perímetro, radio y calcularon el factor de forma. Posteriormente, compararon las mediciones realizadas mediante imágenes y un vernier, encontrando que las mediciones eran muy cercanas entre ellas y que la forma circular de las piezas se mantuvo durante el secado; además, relacionaron estos cambios con los cambios de humedad con un polinomio de segundo grado. A pesar de que realizaron la medición de volumen aparente por 4 métodos, no realizaron ninguna comparación entre el volumen aparente de las piezas y algún cálculo de volumen por imágenes. En el trabajo mencionan que debido a la naturaleza del material estudiado no

les fue posible medir las alturas de las rebanadas con fotografía, y tampoco mencionan que las hayan realizado con el vernier.

En 2009 Yadollahinia *et al.* lograron medir el cambio de área, perímetro, diámetro de equilibrio y el factor forma de rebanadas de papa mediante el análisis de imágenes y correlacionarlos con los cambios en el contenido de humedad con una tendencia de un polinomio de segundo orden; además, utilizaron un sistema de visión por computadora para analizar el efecto del secado en el encogimiento, color e imagen de la textura en la papa. En este mismo trabajo (Yadollahinia *et al.* 2009), observaron con el análisis de imagen los cambios en la rebanadas de papa durante el procesos se secado. El cambio de tamaño de la rebanada (encogimiento), forma (gradualmente conducido a una forma irregular) y el encogimiento diferencial entre los diámetros paralelo y perpendicular a la dirección del flujo de aire en el secador.

Posteriormente, en 2014 Agudelo-Laverde *et al.* estudiaron el encogimiento de frutas liofilizadas, utilizaron cilindros de 1.5 cm de diámetro por 0.7mm de altura, las muestras las liofilizaron y almacenaron a diferentes humedades relativas para analizar su cambio de volumen, con un sistema de Visión por Computadora, que consiste en un sistema de iluminación, cámara fotográfica y computadora; tomaron fotografías de frente y de lado de los cilindros, y mediante un modelo mecánico estimaron el volumen en 3D SolidWorks 2011 y lo compararon con las mediciones de volumen por desplazamiento de agua, encontrando un coeficiente de correlación lineal entre el volumen encontrado con imágenes y el desplazamiento de agua de 0.9481. Sin embargo, en este estudio no mencionan los parámetros, variables o condiciones utilizados en el modelo ni tampoco mencionan el modelo utilizado. Además sólo midieron volumen al inicio y al final del proceso.

3.4 PAPAYA

La papaya es un cultivo altamente distribuido en el mundo. En 2013, la producción de papaya, según estadísticas de la FAO, fue de más de 11 millones de toneladas producidas en todo el mundo.

Dentro de todas las variedades producidas en el mundo, la Papaya (*Carica Papaya L.*) variedad Maradol es uno de los frutos tropicales con mayor demanda nacional. A nivel mundial México es el principal exportador de Papaya (*Carica Papaya L.*) Maradol (INEGI 2011).

Esta fruta es rica en nutrientes, minerales (calcio, hierro, potasio y sodio), ácido ascórbico y carotenos. (Wall, 2006). Sin embargo debido a su alto contenido de humedad, es un alimento altamente perecedero y su deterioro empieza en cuanto es cosechada (Kurozawa *et al.* 2012). Actualmente se utilizan diversos métodos para su conservación, uno de ellos es el secado (El-Aouar *et al.* 2003; Kurozawa *et al.* 2012, Udomkun *et al.* 2015)

3.4.1. Secado de papaya

En 2003 El-Aouar *et al.* realizaron cinéticas de secado de cubos de papaya a 40 y 60°C, con y sin pre tratamiento osmótico, buscando la influencia del tratamiento en el comportamiento de las cinéticas. Encontraron que a temperaturas bajas (40°C) no existía influencia de la velocidad de aire en las cinéticas de la fruta fresca y con pre tratamiento; sin embargo a 60°C observaron cambios significativos en las curvas a diferentes velocidades de aire sobre todo en la fruta fresca. Los autores pudieron ajustar las curvas de secado experimentales al modelo de Page con errores menores al 9%. Suponen que las diferencias pueden atribuirse a cambios en la difusividad, ya que incrementa la resistencia al flujo de agua causado por el encogimiento.

En 2012 Kurozawa *et al.* evaluaron la relación entre la transición vítrea y el encogimiento en cubos de papaya. Para el análisis de encogimiento utilizaron imágenes, y determinaron los cambios de áreas transversales (A/A_0), los cambios de área los correlacionaron con el modelo de Suzuki (Suzuki, *et al.* 1976) (el cual considera los cambios con respecto al área superficial). Los datos experimentales fueron ajustados a este modelo con un error menor al 5%, además demostraron que existe influencia de la transición vítrea en el encogimiento. Encontraron un efecto significativo de la temperatura del aire en el encogimiento, observando un mayor encogimiento a mayor temperatura.

En 2014 Kurozawa *et al.* analizaron el efecto de las condiciones de secado en la degradación del ácido ascórbico durante el secado de papaya y su relación con la transición vítrea. Encontraron influencia a bajas temperaturas de la velocidad de aire en las curvas de secado, sin embargo a altas temperaturas no se observa esta influencia. Por otro lado aunque el tiempo de secado disminuye a altas temperaturas, el producto final sufre una degradación indeseable, ya que a altas temperaturas encontraron una mayor pérdida de ácido ascórbico.

CAPÍTULO 4. METODOLOGÍA

4.1 MUESTRA

Las muestras fueron cortadas directamente de los árboles de papaya, y enviadas al laboratorio de Tecnología Agroalimentaria del CIIDIR-IPN-Oaxaca, para su uso inmediato, ya que las papaya llegaron en etapa de madurez 4; respecto a las etapas de madurez establecidas por la FAO(2000) para papaya.

Las papayas fueron cultivadas en el municipio de Villa de Tututepec, Oaxaca. Para el análisis se buscaron papayas de forma alargada con pesos entre 1,500 – 2,500 g.

La fruta fue cortada de forma longitudinal con un descorazonador de manzana adaptado para obtener cilindros de 2 cm de radio y 2 cm de altura.



a)



b)

Figura 3. a) Cilindros de papaya en la bandeja de secado, b) Descorazonador de manzana usado para cortar los cilindros de papaya

4.2 Secado

4.2.1 Túnel de secado

Se utilizó un túnel de secado con controladores de temperatura y velocidad de aire (Rodríguez *et al.*, 2001), el cual se calienta mediante dos resistencias de $20\ \Omega$ (2.4 kW) cada una, y que son conectadas en paralelo. El flujo de aire se produce por un ventilador centrífugo (A-SQ, Armee Chicago).

La velocidad de aire fue controlada mediante un variador de frecuencia (SAMI MINISTAR SNKU-501A, ABB), y la temperatura de secado se reguló con un controlador PID (Programado por Labview, con señal de salida analógica 110VAC, sistema FieldPoint). La humedad relativa (HR) se monitorió con los sensores Humicap[®] Vaisala; la velocidad de aire (v) se midió por un termoanemómetro tipo tri-sense (ColeParmer[®]). Las temperaturas de secado (T_{secado}), de la superficie (T_s) y en el interior (T_i) se registraron con termopares tipo J.

En el secado se encuentran dos bandejas para la extracción de muestras durante el proceso y dos charolas para monitorear la pérdida de peso en tiempo real, usando un sistema de adquisición de datos FieldPOINT[®]. El almacenamiento de datos se realizó cada minuto usando el software LabVIEW[®] de National Instruments[®]. Las temperaturas T_i y T_s se midieron con termopares tipo J.

Para las mediciones de T_i el termopar se colocó en el centro del cilindron de papaya, mientras que para las mediciones de T_s el termopar se ubicó en la parte superior del cilindro.

4.2.2 Condiciones de secado

Se estudió como factor la temperatura y su influencia en las variables respuesta

Para el secado de papaya estudios previos muestran un intervalo de temperatura de secado entre 40-80°C, por lo que se analizó la influencia de la temperatura como factor. Para cada temperatura se realizaron 3 experimentos de secado. El diseño de experimentos se muestra en la tabla 3.

Tabla 2. Factores y niveles a analizar en los experimentos

Factor	Niveles
Temperatura	40 y 70 °C
Tiempo	0, 30, 60, 90, 120, 180, 240, 300, 360, 420 y 480 min

Se realizó un ANOVA para los resultados con $\alpha=0.05$ usando el software SPSS 21[®]

Tabla 3. Diseño experimental

Tiempo de secado (min)	Temperatura de secado (°C)	
	40	70
0	P _{11a}	P _{12a}
	P _{11b}	P _{12b}
	P _{11c}	P _{12c}
30	P _{21a}	P _{22a}
	P _{21b}	P _{22b}
	P _{21c}	P _{22c}
60	P _{31a}	P _{32a}
	P _{31b}	P _{22b}
	P _{31c}	P _{22c}
90	P _{41a}	P _{42a}
	P _{41b}	P _{42b}
	P _{41c}	P _{42c}
120	P _{51a}	P _{52a}
	P _{51b}	P _{52b}
	P _{51c}	P _{52c}
180	P _{61a}	P _{62a}
	P _{61b}	P _{62b}
	P _{61c}	P _{62c}
240	P _{71a}	P _{72a}
	P _{71b}	P _{72b}
	P _{71c}	P _{72c}
300	P _{81a}	P _{82a}
	P _{81b}	P _{82b}
	P _{81c}	P _{82c}
360	P _{91a}	P _{92a}
	P _{91b}	P _{92b}
	P _{91c}	P _{92c}
420	P _{101a}	P _{102a}
	P _{101b}	P _{102b}
	P _{101c}	P _{102c}
480	P _{111a}	P _{112a}
	P _{111b}	P _{112b}
	P _{111c}	P _{112c}

En cada experimento de secado se tomaron lecturas en los siguientes tiempos, cada 30 minutos durante los primeros 120 minutos del proceso, posteriormente las determinaciones se realizaron en un intervalos de 60 min hasta llegar a un porcentaje de

humedad del 15%; en dichos intervalos de tiempo se tomaron las fotografías; se determinó, la densidad real, la densidad aparente, contenido de humedad y se calculó la porosidad. Cada determinación se hizo por triplicado en cada corrida de secado.

4.2.3 Construcción de las curvas de secado

Con los registros de pérdida de peso de cada una de las corridas de secado se construyó la curva de secado utilizando la siguiente fórmula, para determinar la humedad del sólido.

$$X_{bs} = \frac{P(t) - P_{ss}}{P_{ss}} \quad \text{Ecuación 4}$$

Donde:

X_{bs} = humedad del sólido, base seca

$P(t)$ = peso de la muestra en un tiempo t

P_{ss} = peso de los sólidos secos de la muestra

El peso se monitoreo cada minuto.

4.3 DETERMINACIÓN DE DENSIDAD REAL

Se utilizó un estereopícnómetro modelo SPY – 5DC marca Quantachrome. Se utilizó en los primeros 90 minutos un cilindro de papaya; después se utilizaron 3 cilindros hasta el último tiempo de determinación; con una presión de 1.195 kg/cm², en este punto el gas para presurizar (Nitrógeno) (VA) entra con una presión de 0.050kg/cm² ± 0.00014. El volumen de la muestra se calculó con la ecuación 5.

$$V_p = V_c + \frac{V_A}{1 - \frac{P_1}{P_2}} \quad \text{Ecuación 5}$$

Donde:

V_p = Volumen de la muestra (m^3)

V_c = Volumen de celda contenedora de la muestra (m^3)

V_A = Volumen agregado de gas (He, $P=0.050 \text{ kg/cm}^2$) (m^3)

P_1 Presión antes de V_A (kg/cm^2)

P_2 Presión después de V_A (kg/cm^2)

Posteriormente se calculó la densidad real mediante la ecuación 6.

$$\rho_p = \frac{m_p}{V_p} \quad \text{Ecuación 6}$$

4.4 DETERMINACIÓN DE DENSIDAD APARENTE

La densidad aparente (ρ_b) se determinó empleando 1 cilindro de la muestra, que fue retirada del secador en los tiempos señalados; usando el método de desplazamiento por hexano y un kit para medición de densidad (YDK 01-OD, Denver Instrument, Alemania), cada determinación se realizó por triplicado. La densidad aparente se calculó con la ecuación 7:

$$\rho_b = \frac{m_{s-a} \cdot \rho_{li}}{(m_{s-a} - m_{s-li})} \quad \text{Ecuación 7}$$

Donde:

ρ_b = Densidad aparente de la muestra

ρ_{li} = Densidad del líquido de inmersión

m_{s-a} = masa del sólido en el aire

m_{s-li} = masa del sólido en el líquido de inmersión

4.5 DETERMINACIÓN DEL VOLUMEN DE LA MUESTRA

- **Cálculo a partir de los datos experimentales de ρ_b**

Los resultados de ρ_b y el peso se usaron para determinar el volumen de las muestras durante el proceso de secado. Se calcularon mediante la siguiente fórmula:

$$V = \frac{m}{\rho_b} \quad \text{Ecuación 8}$$

- **Cálculo de volumen a partir las imágenes**

Las imágenes se obtuvieron sobre un fondo negro utilizando una cámara digital Panasonic Lumix DMC-FZ30EG que opera con un enfoque AF macro, con un adaptador óptico (lente Ulbrich 3D optical Macro- Microscope, Grayfiel Optical Inc.). La cámara se encuentra instalada sobre un sistema de iluminación que consta de dos lámparas laterales LED fluorescentes y una frontal.

La cámara fue operada de forma manual, y la captura de las imágenes se realizó a una distancia focal y condiciones de iluminación constante, las imágenes fueron almacenadas en formato JPG y RAW.

Los cilindros se colocaron en el secador con la siguiente disposición como se muestra en la figura:

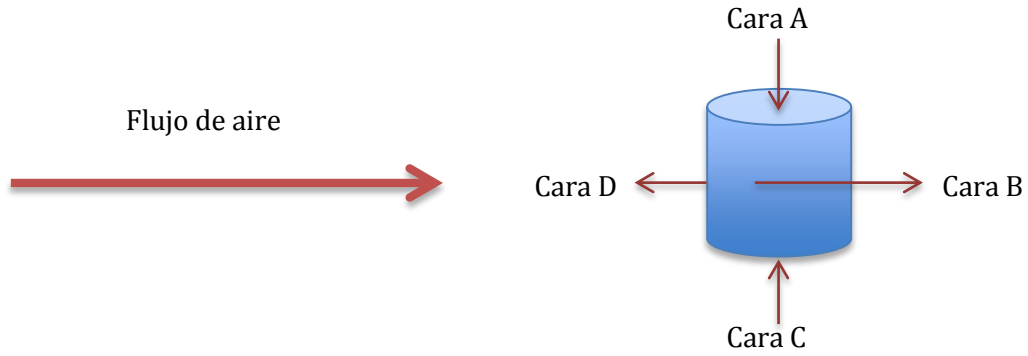


Figura 4. Disposición de los cilindros en el secador

Se tomaron fotografías de las 4 caras cada 30 min por 120 min, después cada 60 min hasta el fin del secado; cada fotografía se realizó con una referencia métrica.

3 piezas fueron retiradas del secador en cada tiempo de análisis para poder ser fotografiadas.

Utilizando el software *ImageJ*® se realizó una calibración para la conversión de píxeles a cm; con la referencia métrica colocada en cada fotografía se midió los píxeles contenidos en un centímetro y con la herramienta Set Scale se calibra el programa para convertir los píxeles medidos en un centímetro (Figura 5).

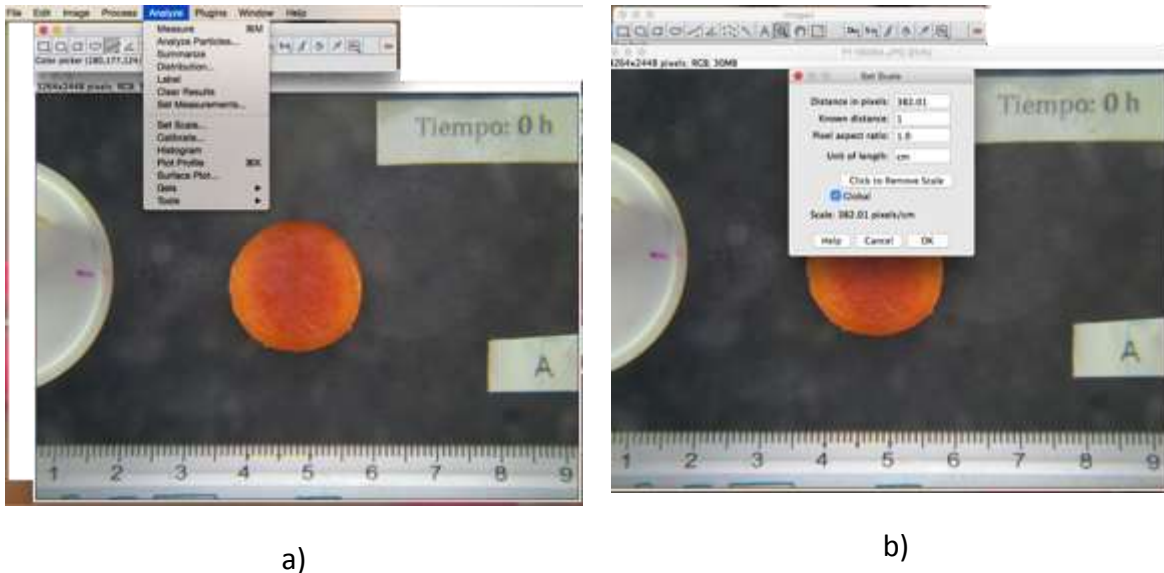


Figura 5. Calibración de las imágenes en ImageJ

Se empleó el método de *Umbralización* multibanda aplicada para imágenes fotográficas de color, se seleccionó el modelo de espacio de color HSB (Hue, Saturation and Brightness) dado que el espacio de color que mejor resultado presentó para la umbralización de las imágenes fue mediante los cambios de brillantez. En la umbralización fue posible establecer el borde de las caras del resto de los elementos de la fotografía; con la herramienta de selección de área (*Wand Tool*) fue posible la selección automática del contorno de la figura para medir el área de este contorno, aún considerando la deformación de las piezas.

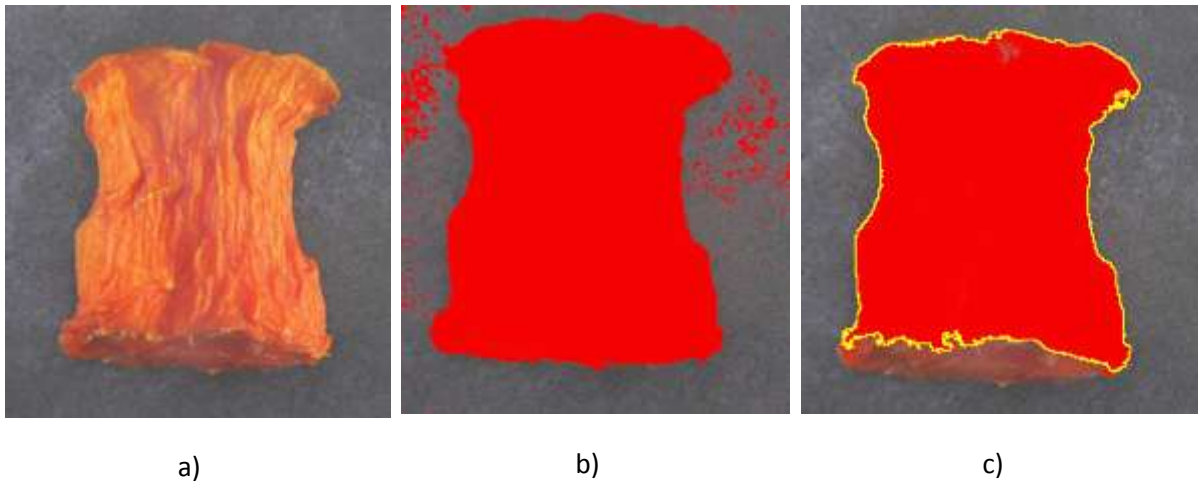


Figura 6. a) Fotografía original, b) fotografía con la umbralización de color sin modificación de la brillantez, c) fotografía con la umbralización de color con modificación en la brillantez

Además, en las caras B y D se midió la altura de los cilindros en 3 puntos para cada cara, en las orillas y al centro de la pieza.

Se calculó el promedio de las áreas de las caras A y C, y de las alturas de las caras B y D. El volumen fue calculado con estas determinaciones como muestra la siguiente ecuación:

$$V = A \times h$$

Ecuación 9

4.6 Determinación del encogimiento

4.6.1 Encogimiento mediante el cálculo de densidad aparente

El encogimiento se determinó mediante la técnica usada por Lozano *et al.* (1983), como el coeficiente de encogimiento aparente (S_b), a partir del volumen promedio al inicio y en cualquier punto durante cualquier proceso del secado y se calculó con la ecuación 10:

$$S_b = \frac{V(t)}{V_0} \quad \text{Ecuación 10}$$

Donde:

$V(t)$ Volumen a un tiempo dado

V_0 Volumen inicial de la muestra

4.6.2 Encogimiento mediante imágenes

Se determinó el encogimiento de área (ecuación 11).

$$S_{imág} = \frac{A(t)}{A_0} \quad \text{Ecuación 11}$$

También se estimó el encogimiento volumétrico con 2 métodos:

- i) Con el volumen calculado con las imágenes

$$S = \frac{V(t)}{V_0} \quad \text{Ecuación 12}$$

- ii) Con la relación de Suzuki (1976)

$$S = \frac{V(t)}{V_0} = \left(\frac{A(t)}{A_0}\right)^{3/2}$$

Ecuación 13

4.7 Determinación de la porosidad

La porosidad fue calculada usando la relación entre densidad aparente y densidad real usada por Madamba *et al.* (1994), aparece en la siguiente ecuación:

$$\varepsilon = 1 - \frac{\rho_b}{\rho_p}$$

Ecuación 14

CAPÍTULO 5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Para cada temperatura se realizaron 3 corridas de secado, y en cada corrida cada análisis fue realizado por triplicado. Los resultados que se muestran a continuación son el promedio de todas las mediciones realizadas.

5.1 Secado de papaya

En la figura 7 se puede observar las curvas de secado adimensional obtenidas a 40 y 70°C. Se observa que en la primera hora de secado a 70°C ya ha perdido casi el 40% de agua contenida, mientras que a 40°C la pérdida es menos del 30%; este tipo de comportamiento es típico de las curvas de secado convectivo. En esta misma figura 7 podemos observar la influencia de la temperatura en las cinéticas de secado

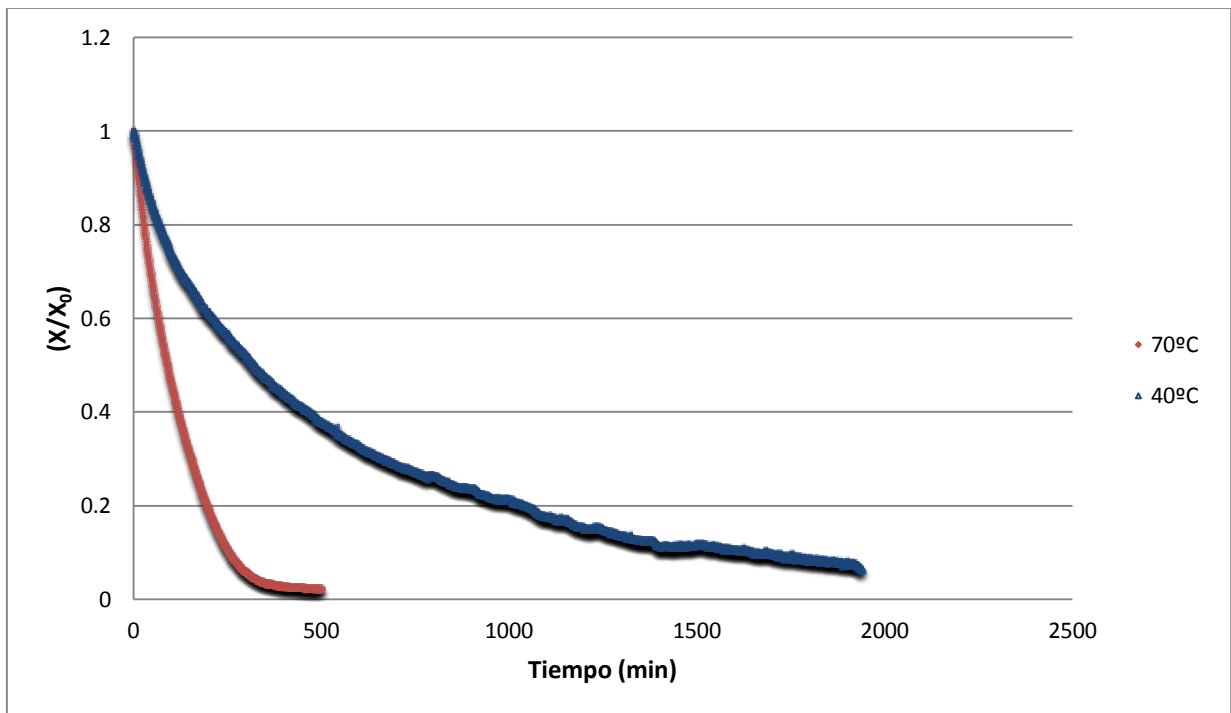


Figura 7. Curvas de secado adimensionales de papaya

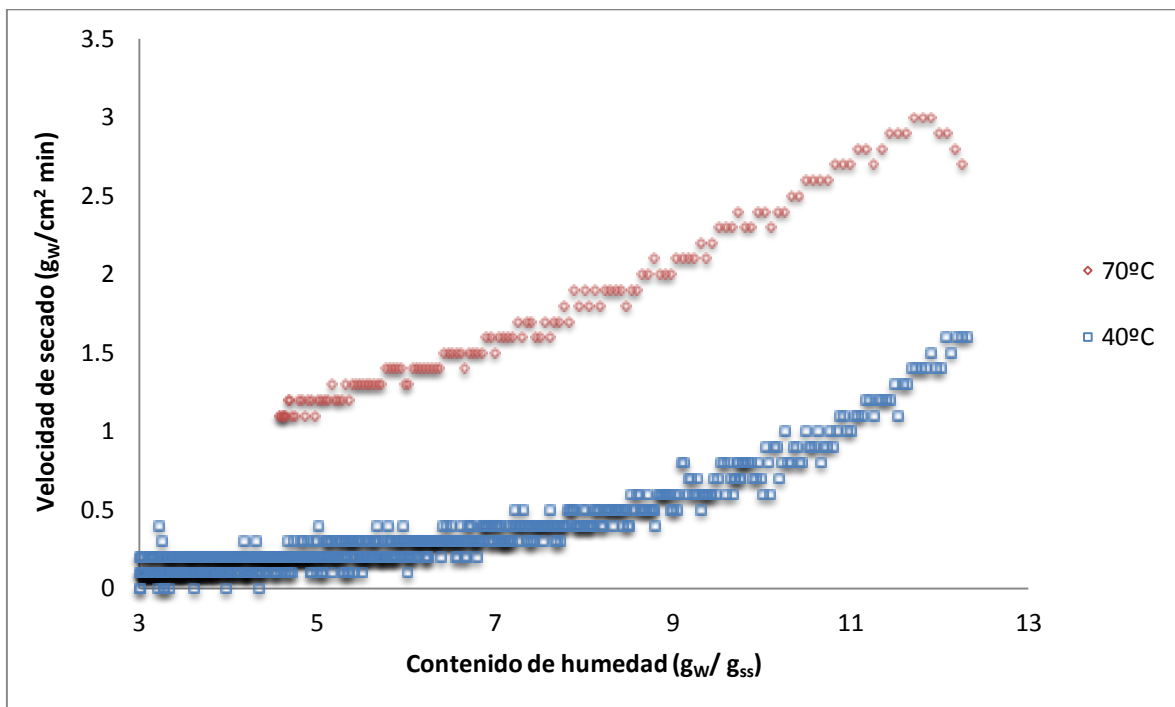


Figura 8. Velocidad de secado

Como era de esperarse la velocidad de secado a 40°C es menor que la velocidad de secado a 70°C, como puede observarse en la figura 8, estos cambios de velocidad pueden ser apreciados también en los tiempos de secado requeridos para las 2 temperaturas, mientras a 70°C el secado se lleva a cabo en 480 min, a 40°C el secado requiere de 1800 min.

5.2 Propiedades estructurales de papaya durante el secado

En la figura 9 podemos observar los cambios en densidad aparente en papaya durante el secado a 70 y 40°C; en ambas temperatura observamos que hay un leve incremento conforme se va deshidratando, sin embargo llegando a un contenido de humedad, ambas gráficas empiezan a descender, dicho comportamiento también fue observado por Lozano *et al.* (1983) para papa, papa dulce y ajo entero. Cabe mencionar que a 40°C a partir de los 1380 min las piezas empezaron a flotar en el disolvente, por lo que fue necesario cambiar el accesorio incluido en el KIT de densidad aparente diseñado para piezas que flotan en el disolvente.

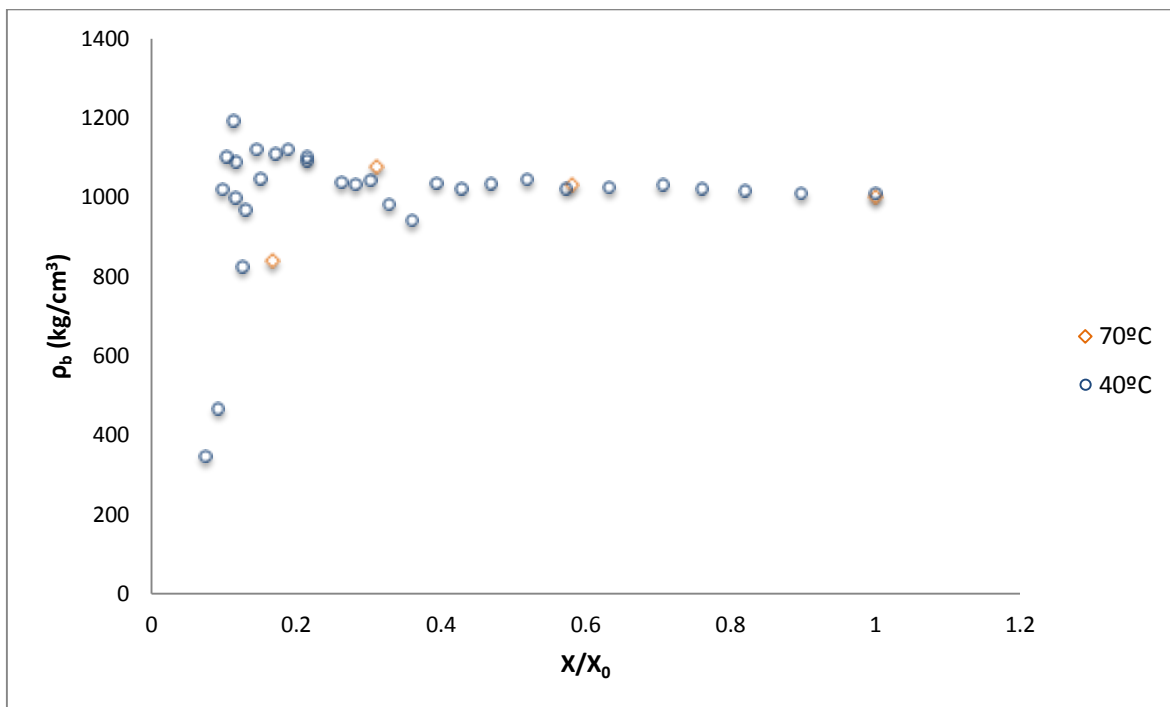


Figura 9. Densidad aparente de papaya durante el secado

En la figura 10 se observa que la densidad real va aumentando conforme disminuye X/X_0 , sin embargo llega a un punto donde la densidad real empezó a descender. Este comportamiento fue encontrado también por Lozano *et al.* (1983) para zanahoria, donde la densidad real va disminuyendo en la última etapa de secado, esta tendencia la atribuye probablemente por que al final del secado el poro va cerrando

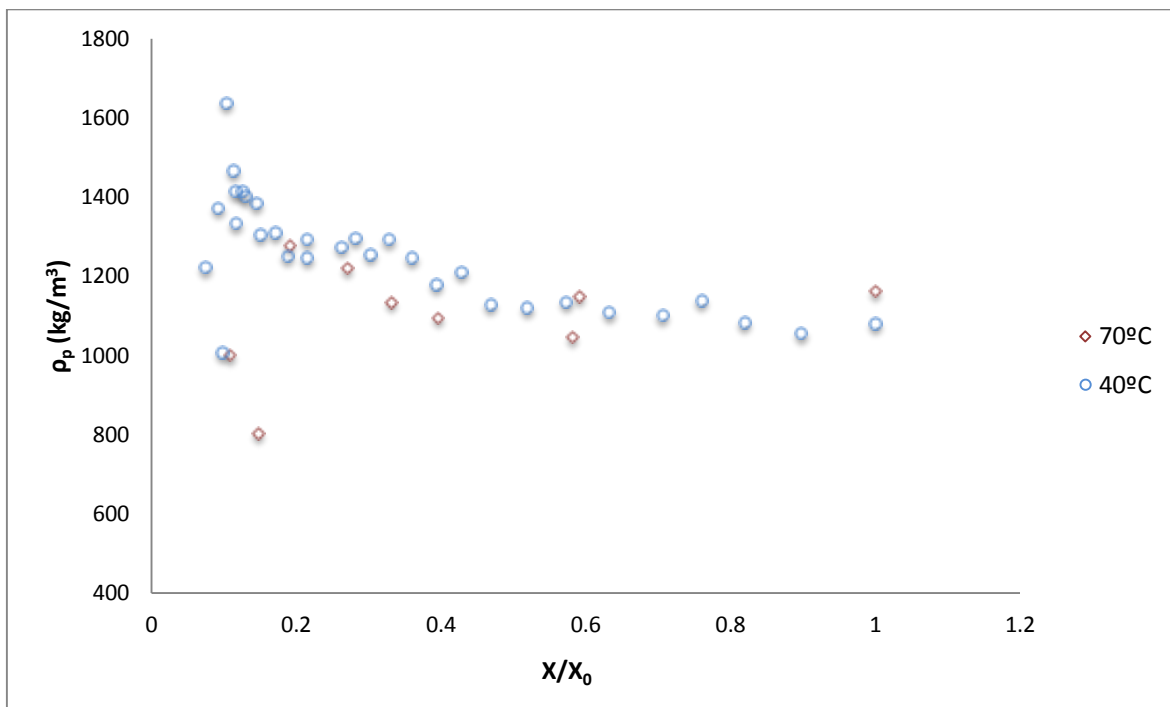


Figura 10. Densidad real de papaya durante el secado

En la figura 11 se presentan los cambios de porosidad durante el secado convectivo, a 70°C la porosidad muestra una gran variabilidad, sin embargo se observa que se mantiene aproximadamente constante, este comportamiento fue observado por Koç *et al.* (2008) en el secado convectivo de membrillo; sin embargo a 40°C se observa que conforme disminuye X/X_0 la porosidad aumenta, este tipo de comportamiento fue reportado por Karathanos *et al.* (1996) para el secado convectivo de rodajas de zanahoria. En esta figura(11) podemos ver que la porosidad a 40°C en el primer período de secado se mantiene aproximadamente constante, después la porosidad incrementa gradualmente hasta llegar al final del secado, también a esta temperatura se observó que conforme disminuyó X/X_0 se formaron cuerpo de aire en los cilindros de papaya en la última etapa del secado (figura 12).

Rahaman *et al.* (2002) explican el comportamiento de la porosidad a través de observar el comportamiento de esta propiedad en diversos materiales. Encontraron que a una temperatura de 40°C la porosidad está relacionada con el contenido de humedad, mientras que a altas temperaturas hubo un incremento en la formación de poros en la primera parte del secado, después llegando a un contenido de humedad crítico se presentó el colapso, debido a la pérdida de humedad.

Madiouli *et al.* (2007) mencionan que la porosidad de alimentos secos depende tanto de la naturaleza del alimento como de las condiciones de secado. En este caso podemos observar la influencia de las condiciones de secado que si afectaron la porosidad de la papaya durante el proceso.

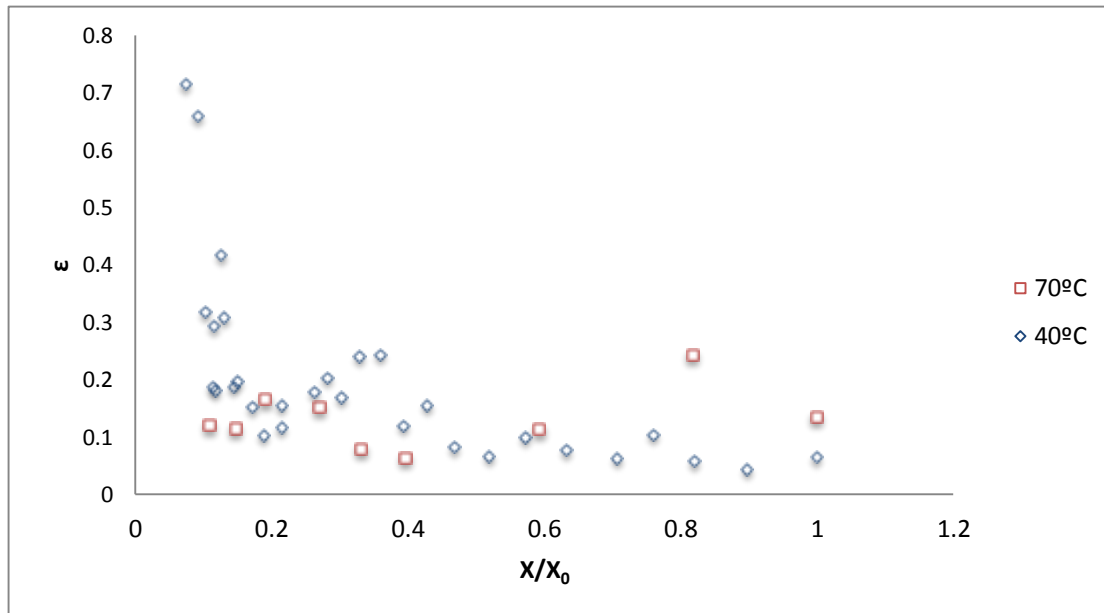


Figura 11. Porosidad durante el secado de papaya

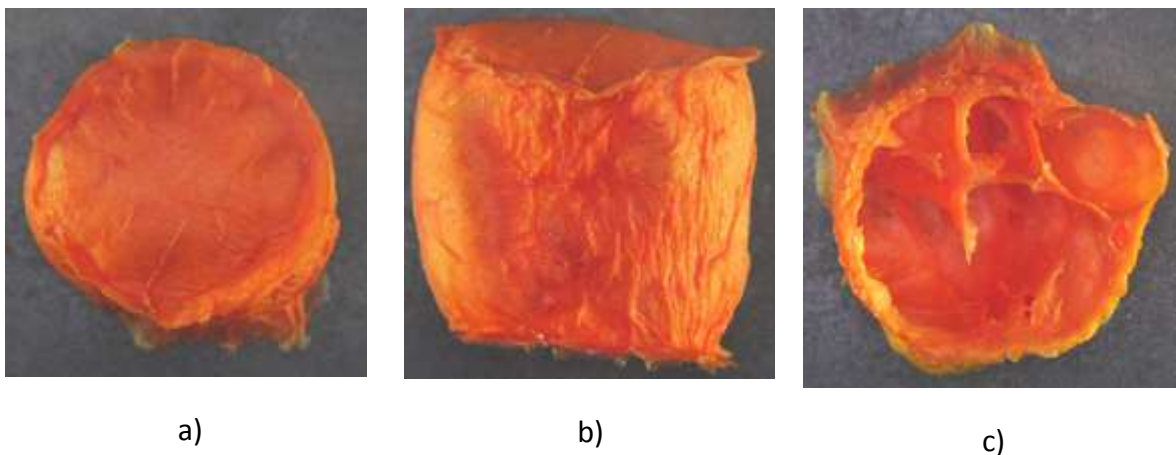


Figura 12. a) Cara A, b) Cara B, c) Corte transversal del cilindro a los 1600 min

5.3 Encogimiento

El encogimiento fue calculado por tres métodos en la figura 13 observamos el encogimiento estimado con la densidad aparente.

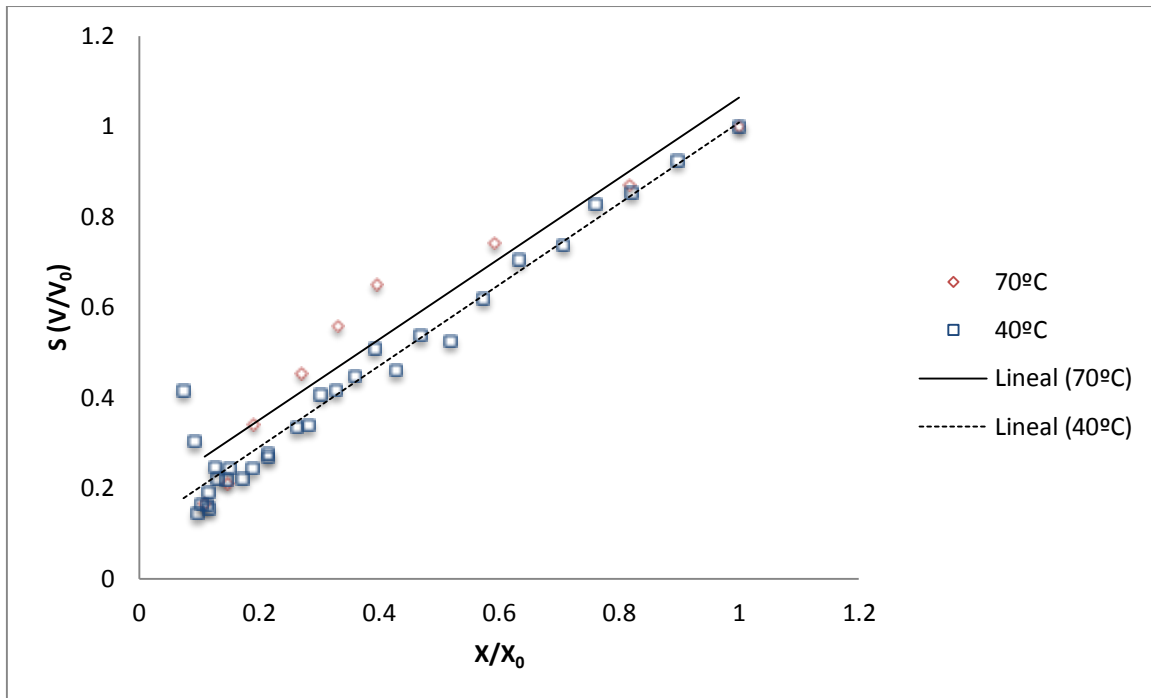


Figura 13. Encogimiento aparente durante el secado

Se observa en la figura 13 que el encogimiento a 70°C es muy cercano al encogimiento lineal, ya que conforme disminuye X/X_0 también disminuye el coeficiente de encogimiento (S); sin embargo a 40°C en un primer periodo el coeficiente de encogimiento (S) va disminuyendo conforme X/X_0 disminuye, pero llegando a un contenido de humedad reducido (X/X_0) menor a 0.2 empieza incrementar S ; esto físicamente fue observado que a contenido de humedad bajos las piezas empezaron a sufrir hinchamiento, debido a la formación de “cuerpos de aire” en el interior de los cilindros. Curvas similar fueron reportadas por Madiouli *et al.* (2007) para el secado gel de sílica, en estas curvas se observa que cuando X/X_0 es menor a 0.2 incrementa S .

Kurozawa *et al.* (2012) reportaron comportamientos similares para el encogimiento de cubos de papaya a 40 y 70°C, sin embargo cuando el contenido de humedad reducido (X/X_0) es menor a 0.2, Kurozawa no reporta el incremento tan marcado en S , esto probablemente pueda deberse a que la geometría utilizada por este trabajo es diferente, en el caso de Kurozawa utilizaron cubos de 1x1x1 cm.

En la figura 14 se presenta el encogimiento de área (A/A_0) calculado por imágenes a 70°C , para las 4 caras del cilindro. Se puede ver en la figura que las 4 caras presentan la misma tendencia, que conforme disminuye X/X_0 el coeficiente de encogimiento de área disminuye también. Por lo que se observa que la disposición del cilindro en el secado y con el flujo de aire no afecta el encogimiento de los cilindros de papaya

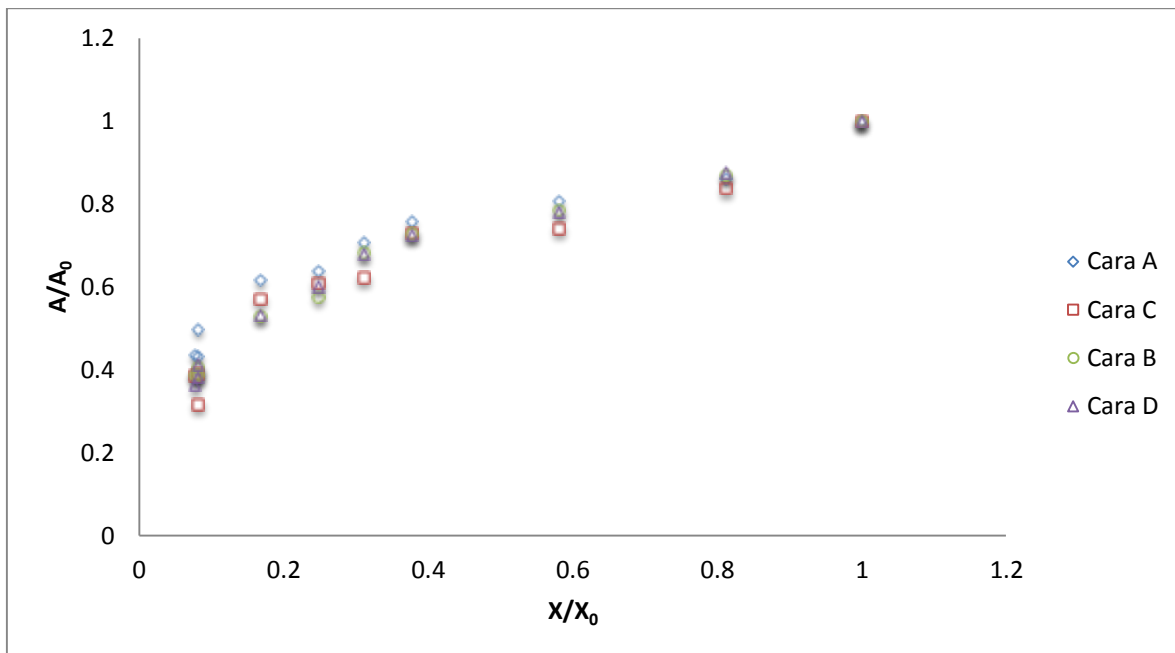


Figura 14. Encogimiento de área a 70°C

En la figura 16 se muestra el encogimiento de área a 40°C ; en la gráfica se puede observar que el coeficiente de encogimiento de área va disminuyendo conforme disminuye X/X_0 ; sin embargo llegando a un contenido de humedad reducido (X/X_0) menor a 0.4 dicho coeficiente aumenta; como se mencionó anteriormente a contenidos de humedad bajos a 40°C se observó el hinchamiento de las piezas (figura 15), lo cual se observa en la gráfica como el aumento de área de las piezas.

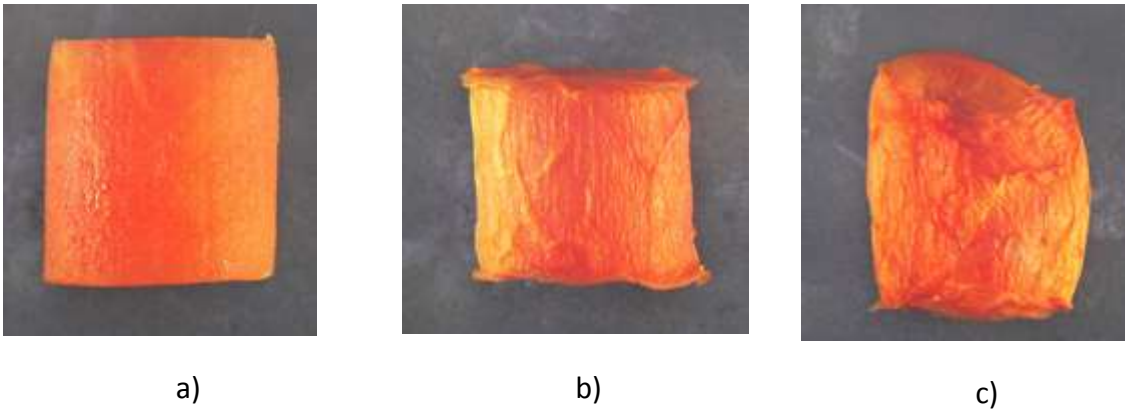


Figura 15. a) Cilindro fresco de papaya, b) cilindro secado durante 360 min, c) cilindro secado durante 1500 min

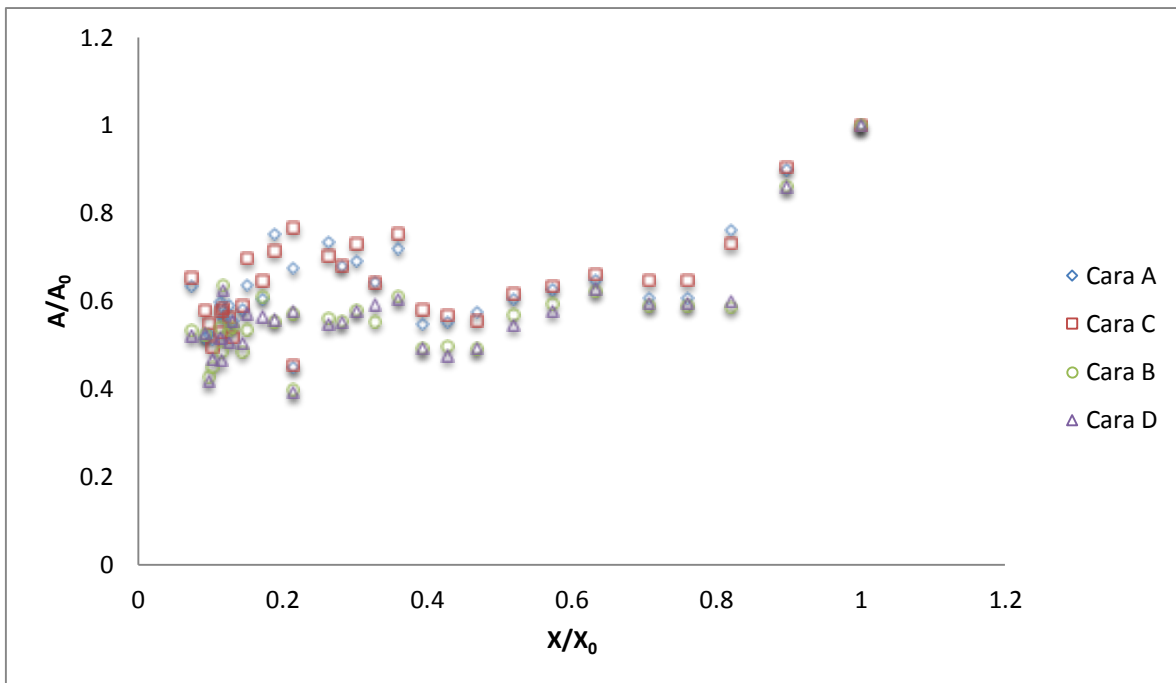


Figura 16. Encogimiento de área a 40°C

Con estas áreas se estimó el volumen de los cilindros, y con este volumen se calculó el encogimiento volumétrico por imágenes. Por otro lado el coeficiente de encogimiento de área fue usado para estimar el encogimiento volumétrico utilizando la relación de Suzuki *et al.* (1976). En la figura 17 se puede observar el encogimiento volumétrico estimado por ambos métodos de imágenes a 70°C, podemos observar que los valores de encogimiento volumétrico por ambos métodos son muy parecidos. Así que se correlacionaron los valores de encogimiento volumétrico estimados por imágenes con los valores de encogimiento volumétricos estimados con el cambio de volumen aparente. Los resultados

se observan en la figura 18, como se puede apreciar el método de imágenes pudo ser correlacionado a 70°C para calcular el encogimiento durante el secado convectivo de papaya, los coeficientes de las correlaciones lineales se muestran en la tabla 4. Ambos coeficientes muestra un buen ajuste lineal con el encogimiento volumétrico aparente.

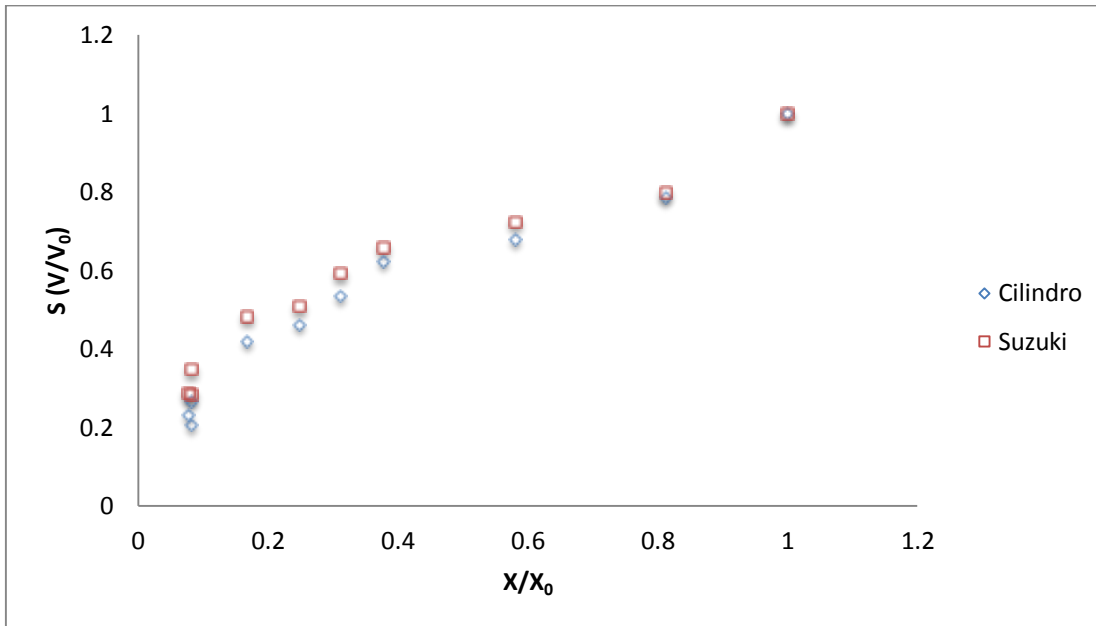


Figura 17. Encogimiento volumétrico por imágenes a 70°C

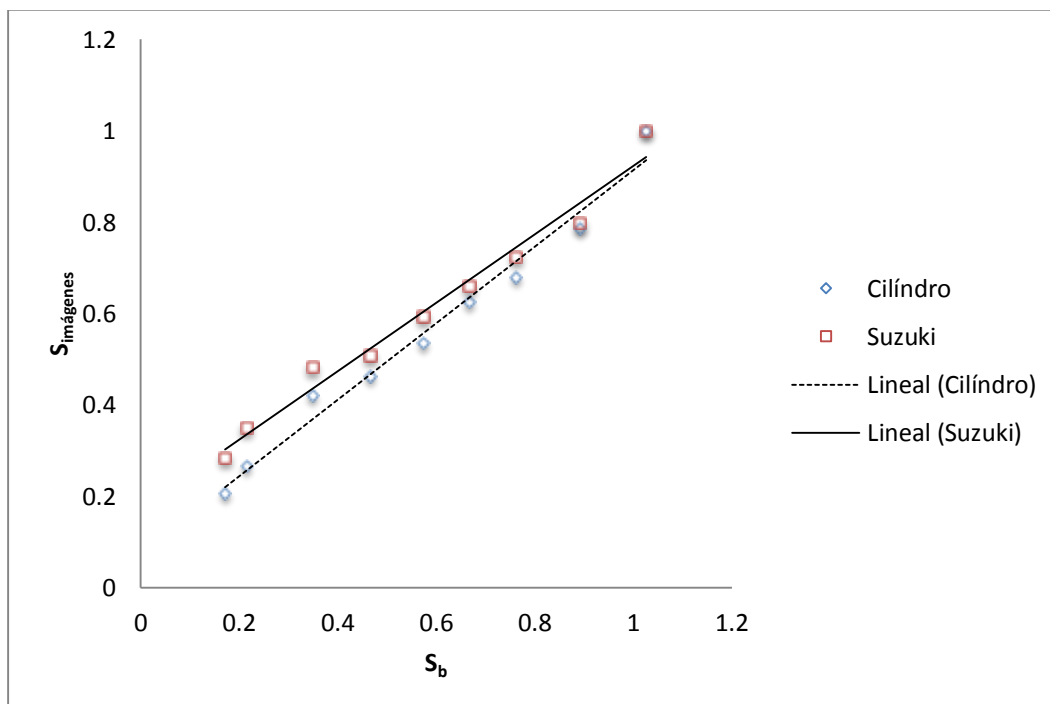


Figura 18. Correlación del encogimiento por imágenes con el encogimiento aparente a 70°C

Tabla 4. Coeficientes de correlación del encogimiento aparente y encogimiento estimado por imágenes a 70°C

Correlación entre:	Coefficiente de correlación R ²
Encogimiento aparente con encogimiento de volumen por cilindros	0.9796
Encogimiento aparente con encogimiento volumétrico usando la relación de Suzuki	0.9778

Se realizó el cálculo del encogimiento volumétrico a 40°C por imágenes por los dos métodos, el cálculo del volumen del cilindro y el encogimiento usando la relación de Suzuki; en la figura 19 se aprecia que conforme disminuye X/X_0 también disminuye S , sin embargo llegando a un contenido de humedad reducida menor a 0.4, incrementa el valor de S .

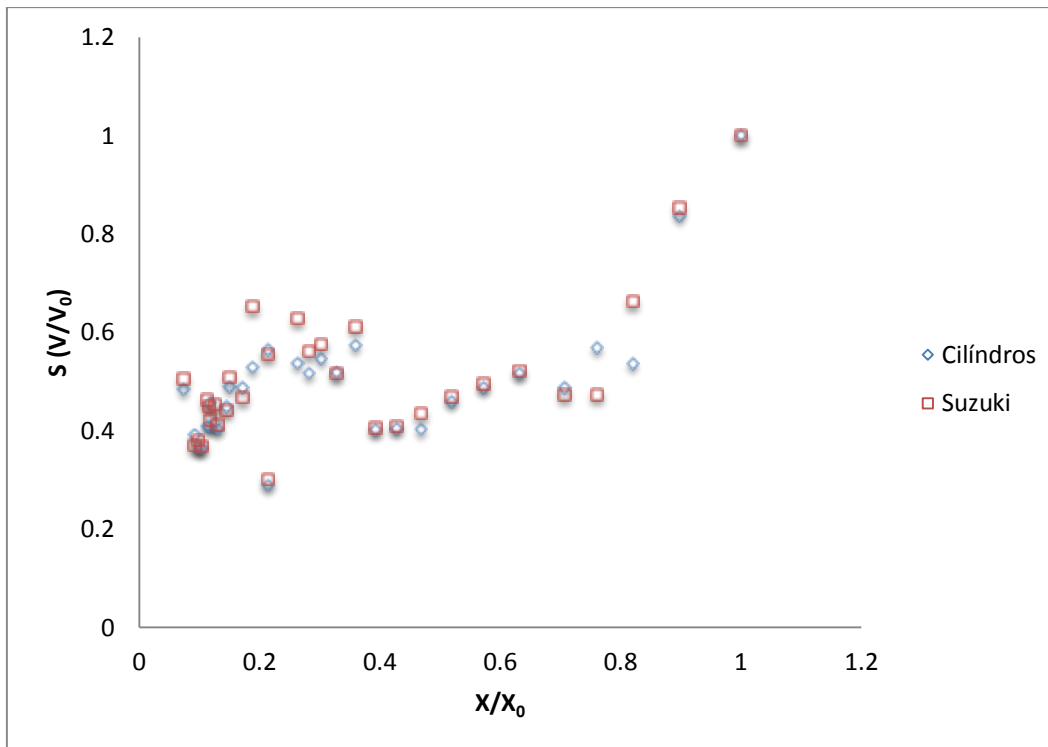


Figura 19. Encogimiento volumétrico por imágenes a 40°C

Después se correlacionaron ambos métodos con el encogimiento aparente, los resultados se muestran en la figura 20; los coeficientes de determinación R² se muestran en la tabla

5. Los coeficientes indican que existe una débil correlación lineal para los métodos por imágenes con el método físico de encogimiento aparente. Esto probablemente se deba a que las piezas sufren hinchamiento a contenidos bajos de humedad, sin embargo el contorno de la pieza se ve afectado de manera diferente a como se afecta el volumen, debido a que hay un volumen interno que no puede ser apreciado en las imágenes.

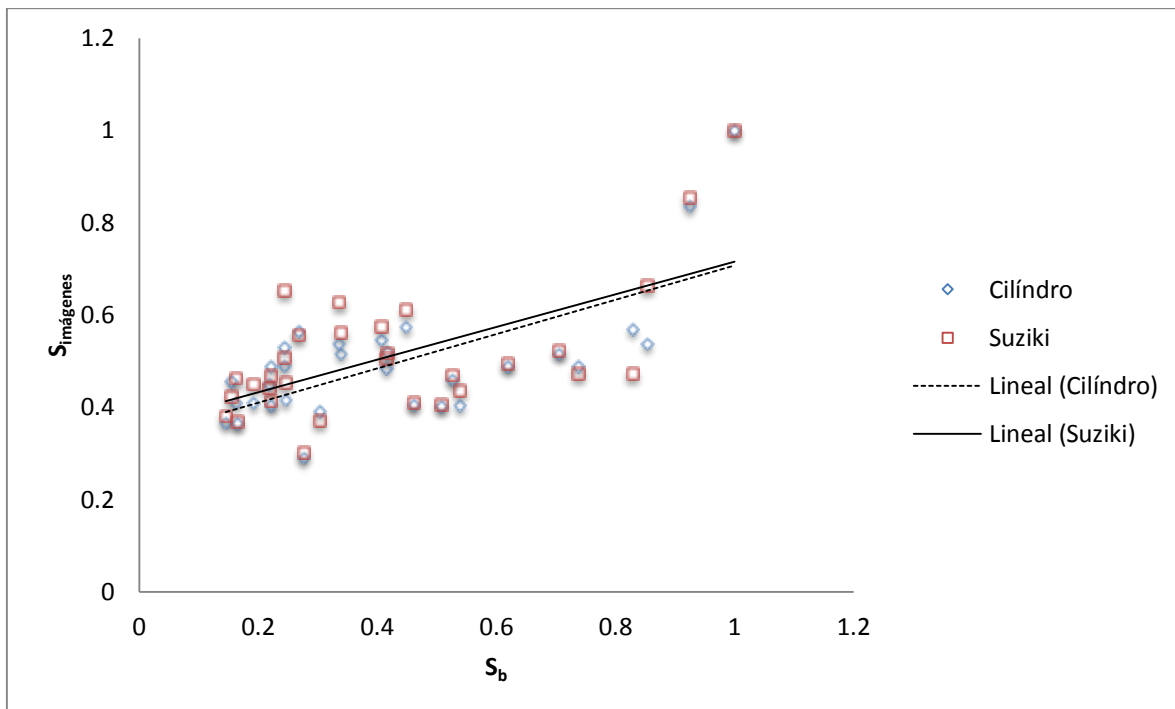


Figura 20. Correlación del encogimiento por imágenes con el encogimiento aparente a 40°C

Tabla 5. Coeficientes de correlación del encogimiento aparente y encogimiento estimado por imágenes a 40°C

Correlación entre:	Coefficiente de correlación R^2
Encogimiento aparente con encogimiento de volumen por cilindros	0.3831
Encogimiento aparente con encogimiento volumétrico usando la relación de Suzuki	0.4610

Kurozawa et al. (2012) reportan que durante el secado a 70°C las muestras permanecen en el estado gomoso, y los cambios en el volumen de las piezas es casi igual al volumen de agua perdido durante el secado. En el caso del secado a 40°C el volumen de agua removido es mayor que la reducción de volumen de las piezas durante todo el proceso de secado; además durante el secado el material pasa de un estado gomoso al vítreo.

La rigidez del material en la superficie hace que se disminuya la velocidad con la que el volumen de los cilindros de papaya van cambiando, además en forma simultánea la porosidad incrementa, lo cual se observó como la formación de “cuerpos de aire” en el interior de los cilindros.

Esto afecta las tendencias de encogimiento diferentes a diferentes temperaturas (40 y 70°C)

CAPÍTULO 6. CONCLUSIONES

Se encontró que la temperatura influyó en los cambios de ρ_b , ρ_p y ϵ de los cilindros de papaya secados a 40 y 70°C, se observó que a 70°C el material es más denso y menos poroso en comparación con los cilindros de papaya secados a 40°C.

El encogimiento fue estudiado durante el secado convectivo de papaya, este proceso es afectado principalmente por las condiciones de secado, ya que la temperatura afectó los coeficientes de encogimiento.

El volumen medido mediante las imágenes adquiridas permitió calcular el encogimiento utilizando 4 imágenes por pieza extraída del secador. Se utilizaron 2 métodos de medición de volumen por imágenes. Los coeficientes de encogimiento encontrados por los dos métodos que involucran imágenes se correlacionaron linealmente con los coeficientes de encogimiento aparente (medido físicamente). Se encontró una buena correlación lineal entre los métodos por fotografías con el método físico para 70°C; sin embargo para 40°C se encontró una débil correlación lineal entre los métodos por fotografía y el método físico; a esta temperatura se encontró que a contenidos de humedad reducidos menores a 0.2 , con la formación de cuerpos de aire en el interior de los cilindros, esto afectó en la determinación del volumen por imágenes.

REFERENCIAS

- Acharya, T., Ray, A.K. 2005. *Image processing: principles and applications*. Wiley-Interscience Publication. pp.2-4.
- Agudelo- Laverde, L.M., Schebor, C., Buera, M.P. 2014. *Evaluation of Structural Shrinkage on Freeze-Dried Fruits by Image Analysis: Effect of Relative Humidity and Heat Treatment*. Food Bioprocess Technology, Vol. 7 (9), pp.2618-2626
- Aguilera, J.M. y Stanley, D.W. 1999. *Microstructural principles of food processing and engineering*. Elsevier Applied Science, London and New York, 343
- Aguilera, J.M. 2005. *Why food microstructure?*. Journal of Food Engineering. Vol. 67, pp. 3–11
- Barbosa-Cánovas G.V., Juliano P., Peleg M., 2004, *Engineering properties of foods, in Food Engineering*, [Ed. Gustavo V. Barbosa-Cánovas], in Encyclopedia of Life Support Systems (EOLSS), Developed under the Auspices of the UNESCO, Eolss Publishers, Oxford ,UK, [<http://www.eolss.net>]
- Barbosa- Cánovas, V. G. & Vegas, M. H. 1996. *Deshydration of Food*. Ed. Chapman and Hall. USA
- Barceló-Valenzuela, M., Coronado-Sesma, A., Aguilar-Valenzuela, F. A., Pérez-Soltero, A. 2012. *Una estrategia para el procesamiento y análisis de imágenes digitales de frutos esféricos*. Avances de Investigación en Ingeniería en el Estado de Sonora. Maria Trinidad Serna-Encinas (Eds.), pp. 259- 264.
- Brosnan, T., Sun, D.-W 2004. *Improving quality inspection of food products by computer vision—a review*, Journal of Food Engineering , Vol. 61, pp. 3–16.
- Du, C.J., Sun, D.W. 2005. *Correlating shrinkage with yield, water content and texture of pork ham by computer visión*. Journal of Food Processing Engineering. Vol. 28, pp. 219-232

-
- El-Aouar, Â. A., Azoubel, P. M., Xidieh Murr, F. E. 2003. *Drying kinetics of fresh and osmotically pre-treated papaya (Carica papaya L.)*. Journal of Food Engineering, Vol. 59, pp. 85-91.
- FAO, 2000. *Food and Agriculture Organization. Manual de manejo postcosecha de frutas tropicales (papaya, piña, platano, citricos)*.
- Fernández, L., Castellero, C., Aguilera, J.M. 2005. *An application of image analysis to dehydration of apple discs*. Journal of Food Engineering. Vol. 67, pp. 185–193
- FOASTAT, 2012a. *Food and Agriculture Organization of the United Nations. Disponible en:* <http://faostat3.fao.org/faostat-gateway/go/to/home/E>
- Geankoplis, C. J. 2002. *Procesos de transporte y operaciones unitarias*. 3ª. Edición. Compañía Editorial Continental, pp. 579-581
- Gunasekaran, S. 1996. *Computer vision technology for food quality assurance*. Trends in Food Science & Technology, Vol. 7, pp. 245– 256.
- Heertje, I. 2014. *Structure and function of food products: A review* . Food structure. Vol 1, pp. 3–23
- Hernández, J.A., Pavón, G., García M.A. 2000. *Analytical solution of mass transfer equation considering shrinkage for modeling food-drying kinetics*. Journal of Food Engineering, Vol. 45, pp 1-10
- Huang, Lue-lue, Zhang, M. Mijumdar, A.S., Lim, R.X. 2011. *Comparison of four drying methods from re-structured mixed potato with apple chips*. Journal of Food Engineering, Vol. 103 (3), pp. 279 -284
- Huerta, B. E., 2008. *Evaluación cualitativa de la migración de agua durante el secado de alimentos con ciclos de atemperado mediante análisis térmico y de microestructura*. Tesis de Maestría en Ciencias con Especialidad en Alimentos. pp. 4-5
- INEGI, 2011. *Instituto Nacional de Estadística y Geografía*. Disponible en: <http://www.inegi.org.mx/est/contenidos/proyectos/estadistica/default.aspx>

-
- Karathanos, V. T., Kanellopoulos, N. K., Belessiotis, V.G. 1996. *Development of Porous Structure during Air Drying of Agricultural Plant Products*. Journal of Food Engineering, Vol. 29, pp. 167-183.
- Koç, B., Eren, I. Ertekin, F.K. 2008. *Modelling bulk density, porosity and shrinkage of quince during drying. The effect of drying method*. Journal of Food Engineering, Vol. 85, pp. 340- 349
- Kowalski, S. J., Rybicki, A. 2007. *The vapour–liquid interface and stresses in dried bodies*. Drying of porous materials. Springer. pp. 43-58
- Krokida, M. K., Zogzas, N. P., Maroulis, Z. B. 1997. *Modelling shrinkage and porosity during vacuum dehydration*. International Journal of Food Sciences and Technology. Vol. 32, pp. 445-458.
- Krokida, M.K., Karathanos, V. T., Maroulis, Z.B., Marinos-Kouris, D. 2003. *Drying kinetics of some vegetables*. Journal of Food Engineering, Vol. 59, pp. 391- 403.
- Kurozawa, L. E.; Hubinger, M.D.; Park, K.J. 2012. *Glass transition phenomenon on shrinkage of papaya during convective drying*. Journal of Food Engineering, Vol. 108, pp. 43–50
- Kurozawa, L. E.; Terng, I.; Hubinger, M.D.; Park, K.J. 2014. *Ascorbic acid degradation of papaya during drying: Effect of process conditions and glass transition phenomenon*. Journal of Food Engineering . Vol. 123, pp. 157–164.
- Luikov, A. V. (1975). *Systems of differential equations of heat and mass transfer in capillary-porous bodies*. International Journal of Heat and Mass Transfer, Vol. 18, pp. 1–18 (review).
- López- Ortiz, A., 2011. *Secado convectivo de ajo (Allium sativum, L.) con condiciones variables de operación*. Tesis de Doctorado en Ciencias en Conservación y Aprovechamiento de Recursos Naturales (Ingeniería en Procesos). 2007. p. 6

-
- Lozano, J.E.; Rotstein, E., Urbicain, M.J. 1983. *Shrinkage, porosity and bulk density of foodstuffs at changing moisture contents*. Journal of Food Science. Vol 48. pp. 1497-1502.
- Madamba, P.S., Driscoll, R.H., Buckle, K.A. 1994. *Shrinkage, Density and Porosity of Garlic during Drying*. Journal of Food Engineering. Vol. 23, pp. 309-319.
- Martynenko, A. 2008. *The System of Correlations Between Moisture, Shrinkage, Density, and Porosity*. Drying Technology, Vol. 26, pp. 1497–1500.
- Martynenko, A. 2011. *Porosity Evaluation of Ginseng Roots from Real-Time Imaging and Mass Measurements*. Food Bioprocess Technol. Vol. 4, pp. 417 – 428.
- Mayor, L., Sereno, A.M. 2014. *Modelling shrinkage during convective drying of food materials: a review*, Journal of Food Engineering, Vol. 61, pp. 373–386 .
- Mclaughlin; Magee. 1998, *The effect of shrinkage during drying of potato spheres and the effect of drying temperature on vitamin C retention*, Trans IchemE, Vol 76, Part C, pp. 138-142.
- Nieto, A.B., Salvatori, D.M. Castro, M.A., Alzamora, S.M. 2004. *Structural changes in apple tissue during glucose and sucrose osmotic dehydration: shrinkage, porosity, density and microscopic features*. Journal of Food Engineering. Vol. 61, pp. 269–278.
- Ochoa, M. R. , Kessler, A. G. , Pirone, B. N. , Márquez, C. A. and De Michelis, A. 2007. *Analysis of shrinkage phenomenon of whole sweet cherry fruits (Prunus avium) during convective dehydration with very simple models*. Journal of Food Engineering, Vol. 79, pp. 657- 661.
- Omid. M., Khojastehnazhand. M., Tabatabaeefar. A., 2010. *Estimation volume and mass of citrus fruits by image processing technique*. Journal of Food Engineering. Vol. 100, pp. 315-321.

-
- Pereira, C., 2009. Sistema de visión computarizada y herramientas de diseño gráfico para la obtención de imágenes de muestras de alimentos segmentadas y promediadas en coordenadas CIE-L*A*B*. *Agronomía Costarricense*. Vol. 33(2), pp. 283-301.
- Piotrowski, D. y Lenart, A.,1998. *The Influence Of Constant And Variable Conditions On The Drying Kinetics Of Apples*. *Drying Technology*, Vol. 16 (5), pp. 761 -778
- Rahman, M. S. (2001). *Towards prediction of porosity in foods during drying: A brief review*. *Drying Technology*, Vol. 19(1), pp. 1–13.
- Ramos, I.N., Brandã, T.R.S, Silva, C.L.M., 2003. *Structural Changes During Air Drying of Fruits and Vegetables*. *Food Sci Tech Int*. Vol. 9, pp. 0201–6
- Rodríguez-Rámirez, J.; Méndez-Lagunas, L.; Martínez-Álvarez, C.; Diego-Nava, F. 2001. *A closed loop tunnel for drying kinetics research*, Inter-American Drying Conference, Boca del Río, Veracruz, Mexico. 499-504.
- Rodríguez-Ramírez, J., Méndez-Lagunas, L., López-Ortiz, A., Sandoval-Torres, S. 2012. *True density and apparent density during the drying process for vegetables and fruits: A review*. *Journal of Food Science*. Vol. 77, Nr. 12. pp 145- 154
- Sampson, D. J., Chang, Y. K., Rupasinghe, H. P., Zaman, Q. 2014. *A dual-view computer-vision system for volume and image texture analysis in multiple apple slices drying*. *Journal of Food Engineering*. Vol. 127, pp. 49-57.
- Santacruz, V., Santacruz, C., Welti, J., Farrera, R., Alamilla, B., Chanona P., Gutiérrez G.F. (2008), *Effects of ai-drying on shrinkage, surface temperature and structural features of apples slabs by means of fractal analysis*, *Revista Mexicana de Ingeniería Química*, Vol. 7, Núm. 001, pp. 55-63.
- Saravacos, G. D., Maroulis, Z. B. 2001. *Transport Properties of Foods*. Serie: Food Science and Technology, CRC Press.

















-
- SIAP, 2012. *Mexican Agricultural Information Service*. Disponible en: http://www.siap.gob.mx/index.php?option=com_content&view=article&id=50&Itemid=380
- Suzuki, K., Kubota, K., Hasegawa, T., Hosaka, H. 1976. *Shrinkage in dehydration of root vegetables*. Journal of Food Science, Vol. 41, pp. 1189- 1193.
- Thybo, A. K., Szczypiński, P. M., Karlsson, A. H., Dønstrup, S., Stødkilde-Jørgensen, H. S., & Andersen, H. J. 2004. *Prediction of sensory texture quality attributes of cooked potatoes by NMR-imaging (MRI) of raw potatoes in combination with different imaging analysis methods*. Journal of Food Engineering, 61, 91e100.
- Toriwaki, J, Yoshida, H. 2009. *Fundamentals of Three-Dimensional digital image processing*. Springer-Verlag London Limited, pp. 5
- Vengaiah, P.C., Pandey, J.P. 2007. *Dehydration kinetics of sweet pepper (Capsicum annum L.)*. Journal of Food Engineering, Vol. 81, pp. 282- 286.
- Velić, D., Planinić, M., Tomas, S. y Bilić M. 2004 *Influence of airflow velocity on kinetics of convection apple drying*. Journal of Food Engineering, Vol. 64, pp. 97-102
- Walker, C., Panozzo, J. 2012. *Measuring volume and density of a barley grain using ellipsoid approximation from a 2-D digital image*. Journal of Cereal Science. Vol. 55, pp. 61-68.
- Wall, M.M., 2006. *Ascorbic acid, vitamin A, and mineral composition of banana (Musa sp.) and papaya (Carica papaya) cultivars grown in Hawaii*. Journal of Food Composition and Analysis, Vol. 19(5), pp. 434–445.
- Wang, N., Brennan, J.G. 1995. *A mathematical model of simultaneous heat and moisture transfer during drying of potato*. Journal of Food Engineering. Vol. 24. pp. 47-60.
- Xu, C., He Y., Parra, A., Delp, E., Khanna, N., Boush, C. 2013. *Image-Based Food Volume Estimation*. [CEA '13](#) Proceedings of the 5th international workshop on Multimedia for cooking & eating activities, ACM Nueva York, pp. 75-80.

-
- Yan, Z., Sousa-Gallagher, J., Oliveira F. A.R. 2008. *Shrinkage and porosity of banana, pineapple and mango slices during air-drying* . Journal of Food Engineering, Vol. 84, pp. 430–440
- Yadollahiniaa, A., Latifib, A., Mahdavi, R. 2009. *New method for determination of potato slice shrinkage during drying*. Computers and electronics in agricultura. 65. pp 268–274.
- Yuzgec, U., M. Turker and Y. Becerikli. 2004. *Modelling of batch fluidized bed drying of baker yeast for cylindrical pellets*, Proceedings of the IEEE International Conference on Mechatronics 2004, ICM'04, Istanbul, Turkey, 3-5 June 2004.
- Zogzas N.P., Maroulis Z.B. y Marinos-Kouris D., 1994. *Densities, shrinkage and porosity of some vegetables during air drying*. Drying Technology, 12, 1653- 1666
- Zogzas, N. P., & Maroulis, Z. B., 1996. *Efective moisture difusivity estimation from drying data. A comparison between various methods of analysis*. Drying Technology, Vol. 14 (7/8), pp. 1543-157

ANEXOS

Anexo A. Cinéticas de secado con imágenes

Tabla A. 1 Cinética de secado en fotografías a 70°C

Tiempo (min)	Cara A	Cara B	Cara C	Cara D
0				
30				
60				
120				




























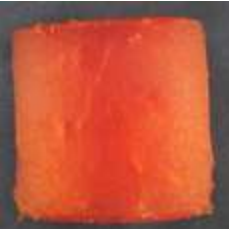














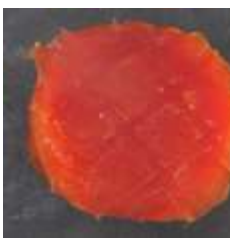
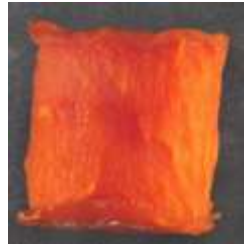






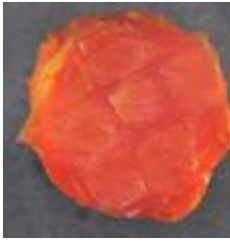

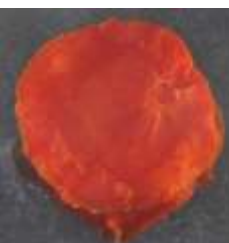





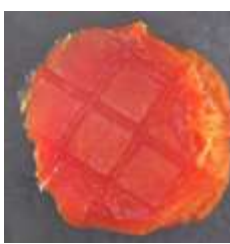

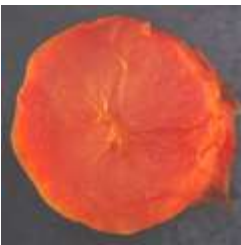







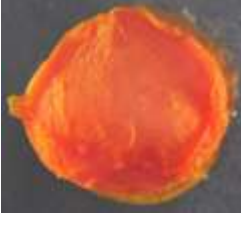

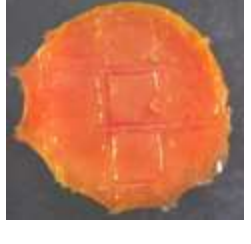

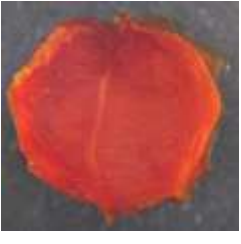

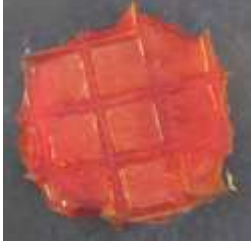

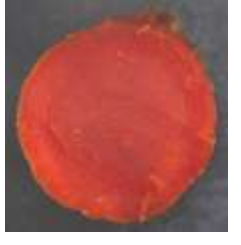





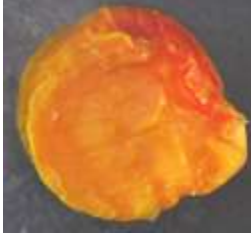

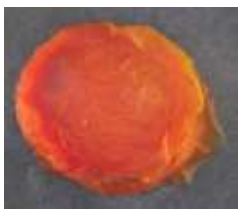

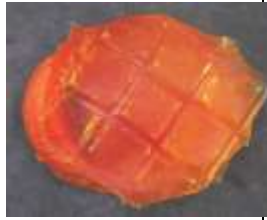

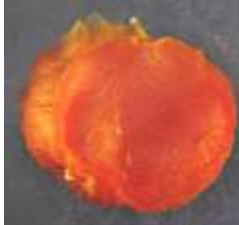









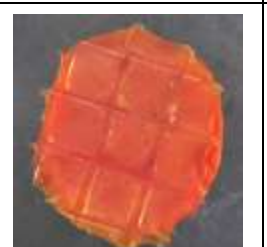









240				
360				
420				
480				

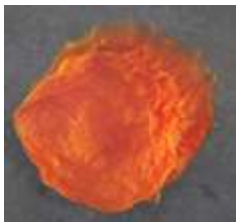









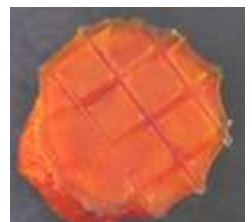



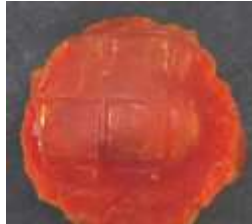









Tabla A. 2 Cinética de secado en fotografías a 40°C

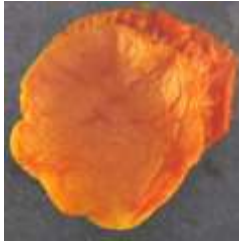



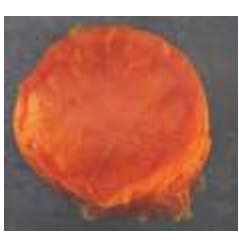



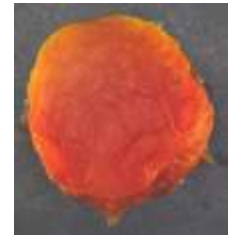



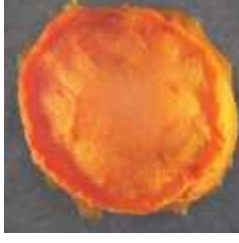



Tiempo (min)	Cara A	Cara B	Cara C	Cara D
0				
30				
60				
90				
120				

180				
240				
300				
360				
420				
480				

540				
600				
660				
720				
780				
840				

900				
960				
1020				
1080				
1140				
1200				

1260				
1320				
1380				
1440				
1500				
1560				

1620				
1680				
1740				
1800				

Anexo B. Análisis de varianza de las propiedades estructurales durante el secado de papaya.

Tabla B. 1 Análisis de varianza para datos de densidad aparente a 40 y 70°C

Origen	Suma de cuadrados	gl	Media cuadrática	F	Sig.
Modelo corregido	10142466,016 ^a	21	482974,572	1,190	,265
Intersección	215160197,799	1	215160197,799	530,045	,000
Temperatura	1058202,653	1	1058202,653	2,607	,108
Tiempo	3199204,421	10	319920,442	,788	,640
Temperatura * Tiempo	5885058,942	10	588505,894	1,450	,162
Error	71443389,558	176	405928,350		
Total	296746053,373	198			
Total corregida	81585855,574	197			

Tabla B. 2 Análisis de varianza para datos de densidad real a 40 y 70°C

Variable dependiente: Densidad Real

Origen	Suma de cuadrados	gl	Media cuadrática	F	Sig.
Modelo corregido	13423943,076 ^a	21	639235,385	1,037	,422
Intersección	279746229,864	1	279746229,864	453,612	,000
Temperatura	53254,138	1	53254,138	,086	,769
Tiempo	7925313,417	10	792531,342	1,285	,242
Temperatura * Tiempo	5445375,522	10	544537,552	,883	,550
Error	108540605,010	176	616707,983		
Total	401710777,951	198			
Total corregida	121964548,087	197			

a. R cuadrado = ,110 (R cuadrado corregida = ,004)

Tabla B. 3 Análisis de varianza para datos de porosidad a 40 y 70°C

Variable dependiente: Porosidad

Origen	Suma de cuadrados	gl	Media cuadrática	F	Sig.
Modelo corregido	1,355 ^a	21	,065	5,212	,000
Intersección	4,067	1	4,067	328,550	,000
Temperatura	,448	1	,448	36,183	,000
Tiempo	,653	10	,065	5,279	,000
Temperatura * Tiempo	,254	10	,025	2,048	,031
Error	2,179	176	,012		
Total	7,600	198			
Total corregida	3,533	197			

a. R cuadrado = ,383 (R cuadrado corregida = ,310)

Anexo C. Datos experimentales de ρ_b , ρ_p y ε durante el secado de cilindros de papaya a 70° y 40°C

Tabla C. 1 Datos experimentales a 70°C

Tiempo (min)	Medición	70 °C									Promedio	Desviación estándar
		Corrida 1			Corrida 2			Corrida 3				
		Pza 1	Pza 2	Pza 3	Pza 1	Pza 2	Pza 3	Pza 1	Pza 2	Pza 3		
0	ρ_b	1012.934	1003.929	1017.995	998.195	1012.540	1002.663	1029.996	1026.499	1031.209	1015.107	12.227
	ρ_p	1221.864	1209.055	1097.022	1195.93	1112.836	1181.377	1220.655	1207.859	1095.937	1171.393	53.709
	ε	0.0901	0.1512	0.16534	0.1709	0.16965	0.07203	0.15619	0.15015	0.05906	0.13164	0.0447
30	ρ_b	1026.606	1018.810	1018.088	1011.72	1012.680	1017.943	1002.497	1002.125	1011.804	1013.586	7.888
	ρ_p	1318.365	1343.323	1328.036	1165.67	1774.906	1223.723	1322.783	1347.825	1332.487	1350.791	170.675
	ε	0.13207	0.42944	0.16815	0.2213	0.24157	0.23338	0.22390	0.24410	0.23594	0.23665	0.0816
60	ρ_b	1043.391	1018.951	1029.086	999.782	1025.160	1024.264	1029.628	1040.974	1054.114	1029.483	15.6974
	ρ_p	1197.702	1211.857	1221.572	1092.22	1170.637	1183.854	1148.862	1162.672	1172.133	1173.501	38.4316
	ε	0.08463	0.12427	0.13480	0.1288	0.15918	0.15757	0.10378	0.10467	0.10068	0.12204	0.0258
90	ρ_b	1024.237	1021.560	1020.975	1019.05	1014.221	1042.104	1025.363	1048.557	1019.719	1026.199	11.4169
	ρ_p	995.1880	1066.639	1078.680	1128.01	1096.459	1062.542	973.3557	1043.239	1055.017	1055.459	47.6748
	ε	0.09659	0.07500	0.01923	-0.0291	0.04226	0.05349	-0.05343	-0.00509	0.03345	0.0258	0.0485
120	ρ_b	1054.284	1032.393	1026.346	1055.50	1046.564	1024.803	1069.354	1063.065	1031.939	1044.917	16.5977
	ρ_p	1225.312	1242.480	1225.312	1171.14	1137.449	1354.740	1222.910	1240.045	1222.910	1226.923	59.0604
	ε	0.04938	0.07080	0.12022	0.0291	0.13532	0.14785	0.02724	0.12045	0.15361	0.09489	0.0509
180	ρ_b	1033.823	1025.519	989.2844	1041.66	1019.207	1027.414	927.9233	964.0228	943.7742	996.9590	42.3287
	ρ_p	1225.3122	1242.4803	1228.3133	1171.148	1137.4492	1354.7400	1222.9106	1240.0451	1232.8606	1228.3622	59.06030
	ε	0.110563	0.10395	0.24161	0.156276	0.1746	0.19262	0.15462	0.17299	0.23448	0.17130	0.0476
240	ρ_b	1090.1616	1040.6575	1065.6664	1054.851	1034.2527	1097.2568	983.04304	982.01824	1006.5755	1039.3870	42.4663
	ρ_p	1245.1117	1288.8151	1317.8845	1192.485	1348.2765	1292.0118	1251.122	1295.0365	1324.2462	1283.8877	47.53509
	ε	0.1154	0.2329	0.1507	0.1247	0.1925	0.1913	0.2092	0.2285	0.2371	0.1869	0.0464

300	ρ_b	997.72538	955.38264	1046.4802	1038.934	1040.0396	1098.3038	936.2288	938.2340	1010.076	1006.822	55.343
	ρ_p	1189.4110	1105.2996	1043.1475	1147.456	1315.5080	1146.4987	1232.9900	1145.7968	1081.367	1156.386	81.8755
	ε	0.1611	0.13563	-0.00319	0.0945	0.2094	0.04203	0.2406	0.1811	0.0659	0.1252	0.0812
360	ρ_b	1020.8578	876.9061	856.7065	901.4352	851.4339	1026.8828	976.3062	820.7490	852.5518	909.3144	78.300
	ρ_p	1158.316	1267.767	1222.555	1153.921	1133.0202	1125.7377	1191.082	1267.740	1212.588	1192.5255	53.952
	ε	0.1186	0.308	0.2992	0.2188	0.2485	0.08781	0.1803	0.3525	0.2969	0.2345	0.0906
420	ρ_b	792.122	832.258	755.3009	827.1366	851.6369	904.0058	790.4378	832.2588	796.0953	820.1393	43.0372
	ρ_p	1170.081	1130.610	1139.364	799.607	1005.316	1197.835	1207.860	1167.115	1176.151	1110.438	130.923
	ε	0.32301	0.26388	0.33708	-0.03442	0.15286	0.2453	0.3455	0.2869	0.32313	0.24926	0.1221
480	ρ_b	729.026	720.515	710.7222	716.0811	702.15330	658.4094	706.1118	662.4867	690.1298	699.5151	24.7772
	ρ_p	1170.081	1130.610	1139.364	799.607	1005.316	1197.835	1207.860	1167.115	1176.151	1110.438	130.923
	ε	0.3769	0.36271	0.37621	0.1044	0.3015	0.4503	0.4154	0.4323	0.413	0.3592	0.1052

Tabla C. 2 Datos experimentales a 40°C

Tiempo (min)	Medición	40 °C									Promedio	Desviación estándar
		Corrida 1			Corrida 2			Corrida 3				
		Pza 1	Pza 2	Pza 3	Pza 1	Pza 2	Pza 3	Pza 1	Pza 2	Pza 3		
0	ρb	1019.8447	999.9683	1012.0981	1010.5849	1010.3979	1008.3238	1016.9215	1020.9840	1013.2603	1012.4871	6.4108
	ρp	1067.6617	1053.1587	1086.5122	1081.2028	1081.2028	1081.2028	1102.0716	1077.7586	1077.7586	1078.7255	13.2383
	ε	0.0567498	0.0751334	0.0639146	0.0534596	0.0406024	0.0719627	0.0772636	0.0526784	0.0598448	0.0612899	0.01200
30	ρb	1017.5408	1004.8873	1008.2788	1029.0501	1020.3305	1020.1304	953.6285	1007.7158	1019.7904	1009.0392	22.1606
	ρp	1070.5090	1097.3328	1088.9474	1056.7300	1056.7300	1056.7300	1153.9216	1133.0202	1125.7377	1093.2954	36.8640
	ε	0.0370853	0.0490596	0.0458501	0.0387282	0.0701722	0.0631959	0.1735760	0.1105933	0.0941137	0.0758194	0.04441
60	ρb	1021.8664	1009.2786	1017.5214	1020.2447	1030.4372	1038.0280	1018.9518	1017.1439	1044.3710	1024.2048	11.1952
	ρp	1080.1131	1102.8946	1088.9171	1061.2106	1071.6233	1106.9222	1020.5580	1117.7548	1093.9358	1082.6588	29.2427
	ε	0.0371	0.0582	0.0808	0.0554	0.0657	0.0467	0.0016	0.0900	0.0453	0.0534	0.0258
90	ρb	1036.0083	1008.6529	1018.7687	1018.1597	1035.4028	1041.7567	1024.2378	1021.5608	1020.9754	1025.0581	10.5571
	ρp	1046.2129	1060.3963	1082.1734	1092.4928	1122.0820	1212.9567	1048.2967	1062.5084	1084.3288	1090.1609	51.8841
	ε	0.0098	0.0488	0.0586	0.0680	0.0772	0.1411	0.0230	0.0385	0.0584	0.0582	0.0378
120	ρb	1032.6512	1029.5784	1033.9389	1038.7678	1030.7245	1020.2567	1028.1800	1022.7070	1032.3939	1029.9110	5.6702
	ρp	1056.0543	1080.2499	1096.9023	1125.3518	1088.7859	1092.6572	1013.4129	1061.8076	1071.1093	1076.2590	31.3672
	ε	0.0222	0.0469	0.0574	0.0769	0.0533	0.0663	-0.0146	0.0368	0.0361	0.0424	0.0270
180	ρb	1016.3661	1014.9544	1042.8549	1048.1705	1040.0305	1046.5074	993.7917	1005.9743	970.9671	1019.9574	26.8008
	ρp	1108.8254	1103.7188	1124.2063	1103.5218	1090.9681	1136.3605	1105.7545	1100.6621	1121.0929	1110.5678	13.9959
	ε	0.0834	0.0804	0.0724	0.0502	0.0467	0.0791	0.1013	0.0860	0.1339	0.0815	0.0261
240	ρb	1018.3229	1021.8896	1024.3617	1065.4979	1051.3478	1200.4667	1025.3631	1048.5580	1019.7194	1052.8363	57.8649
	ρp	1127.9388	1143.8994	1155.0767	1115.9456	1175.2857	1116.1667	1169.5802	1205.3117	1237.9384	1160.7937	41.2626
	ε	0.0972	0.1067	0.1132	0.0452	0.1055	-0.0755	0.1233	0.1301	0.1763	0.0913	0.0713
300	ρb	1037.8201	1041.0895	1057.5991	1056.3358	1060.8446	1049.6649	1053.0459	1083.2284	1028.8841	1052.0569	15.6707

	ρp	1127.9388	1143.8994	1155.0767	1115.9456	1175.2857	1116.1667	1169.5802	1205.3117	1237.9384	1160.7937	41.2626
	ε	0.0799	0.0899	0.0844	0.0534	0.0974	0.0596	0.0996	0.1013	0.1689	0.0927	0.0332
360	ρb	1037.7319	1001.4385	1065.5357	1036.8892	1007.3210	1015.1272	1180.6685	1038.8924	1049.7751	1048.1533	53.7664
	ρp	1131.2692	1144.2977	1163.4048	1131.5816	1125.9355	1104.4098	1118.6567	1131.5400	1150.4340	1133.5033	17.4425
	ε	0.0827	0.1248	0.0841	0.0837	0.1053	0.0808	-0.0554	0.0819	0.0875	0.0751	0.0511
420	ρb	974.8241	1036.8246	1054.5390	1009.9604	1049.8908	999.5022	1003.7195	1020.7514	1019.0253	1018.7819	25.4571
	ρp	1196.2809	1177.9957	1310.7355	1147.0947	1207.7767	1278.0637	1196.2809	1177.9957	1310.7355	1222.5510	61.1322
	ε	0.1851	0.1198	0.1955	0.1195	0.1307	0.2180	0.1610	0.1335	0.2226	0.1651	0.0414
480	ρb	1007.9506	1036.8786	1064.7700	1005.7028	978.0787	1002.5360	966.7932	1106.0613	1107.1066	1030.6531	51.8470
	ρp	1219.3087	1332.0868	1175.9462	1165.2324	1164.1383	1205.3794	1125.9684	1431.4680	1135.8361	1217.2627	100.880
	ε	0.1733	0.2216	0.0945	0.1369	0.1598	0.1683	0.1414	0.2273	0.0253	0.1498	0.0622
540	ρb	917.9398	866.1083	1042.1937	991.5601	1027.6074	1082.1983	1022.1128	991.8623	1052.2393	999.3136	68.2926
	ρp	1266.4410	1204.4043	1197.2326	1210.7426	1268.0338	1260.3736	1013.2600	918.1362	938.4515	1141.8973	143.689
	ε	0.2752	0.2809	0.1295	0.1810	0.1896	0.1414	-0.0087	-0.0803	-0.1213	0.1097	0.1471
600	ρb	856.8699	1039.3469	1053.7476	1037.2856	986.7135	1040.1293	1005.7028	978.0787	1002.5360	1000.0456	59.8120
	ρp	1161.2680	1138.5920	1161.2680	1232.3345	1254.9682	1392.1777	1010.7688	921.7529	980.5825	1139.3014	148.317
	ε	0.2621	0.0872	0.0926	0.1583	0.2138	0.2529	0.0050	-0.0611	-0.0224	0.1098	0.1201
660	ρb	968.7177	1082.5261	1076.3907	1030.1755	1021.4988	1055.5117	956.6826	971.3670	969.3642	1014.6927	49.7128
	ρp	1279.7844	1265.7647	1243.5553	1220.0101	1245.3706	1299.3918	1077.8124	1101.9842	1089.7503	1202.6026	87.7184
	ε	0.2431	0.1448	0.1344	0.1556	0.1798	0.1877	0.1124	0.1185	0.1105	0.1541	0.0434
720	ρb	1018.7686	1040.6093	1041.5448	997.9890	1005.6803	1072.1034	992.4903	1039.5732	980.9848	1021.0826	29.4667
	ρp	1342.9191	1269.8252	1278.3024	1301.6398	1289.0971	1301.6398	1003.8796	1095.4513	1064.4405	1216.3550	125.197
	ε	0.2414	0.1805	0.1852	0.2333	0.2199	0.1763	0.0113	0.0510	0.0784	0.1530	0.0845
780	ρb	1025.4164	1008.1665	1079.2455	1006.0132	1021.7138	1071.6311	897.9481	956.7603	877.4883	993.8203	70.3392
	ρp	1266.4895	1281.3912	1296.6835	1276.8951	1226.7688	1286.4853	1161.5314	1101.0233	1057.9776	1217.2495	88.9318
	ε	0.1903	0.2132	0.1677	0.2121	0.1672	0.1670	0.2269	0.1310	0.1706	0.1829	0.0303
960	ρb	1125.3031	1060.4803	1090.9589	1019.7747	1082.0388	992.9247	939.6978	945.5795	1179.9642	1048.5247	81.0841
	ρp	1339.4254	1466.2101	1365.6698	1309.5277	1259.6542	1309.5277	1126.5270	1079.9948	1192.3585	1272.0995	121.643

	ε	0.1599	0.2767	0.2012	0.2213	0.1410	0.2418	0.1658	0.1245	0.0104	0.1714	0.0780
1020	ρb	1101.4106	1112.1520	1093.5705	814.1531	1115.3475	946.1087	897.9481	956.7603	877.4883	990.5488	116.648
	ρp	1327.9263	1399.9241	1462.2344	1242.5509	1264.2653	1235.1521	1220.1969	1235.4975	1294.0389	1297.9763	83.9606
	ε	0.1706	0.2056	0.2521	0.3448	0.1178	0.2340	0.2641	0.2256	0.3219	0.2374	0.0703
1080	ρb	1129.9712	1122.8101	1109.9938	1025.0162	1015.5813	814.9393	937.9259	1041.0903	805.0174	1000.2606	123.869
	ρp	1294.1683	1384.9507	1427.0406	1215.3656	1225.1441	1314.7792	1261.5742	1251.5376	1177.6488	1283.5788	81.1964
	ε	0.1269	0.1893	0.2222	0.1566	0.1711	0.3802	0.2565	0.1682	0.3164	0.2208	0.0829
1140	ρb	1113.4447	1059.9503	1156.4074	789.7967	815.8963	916.5908	921.6518	901.1779	906.3537	953.4744	128.041
	ρp	1438.4807	1746.8850	1438.4807	1280.6411	1305.8363	1340.9723	1340.8931	1254.5291	1340.8931	1387.5124	148.590
	ε	0.2260	0.3932	0.1961	0.3833	0.3752	0.3165	0.3127	0.2817	0.3241	0.3121	0.0686
1200	ρb	1119.2144	898.9445	1124.5743	814.1531	1115.3475	946.1087	989.8176	1010.5937	1070.5764	1009.9256	108.973
	ρp	1499.6498	1499.6498	1499.6498	1330.5967	1316.8274	1269.0766	1411.1984	1249.0879	1434.2752	1390.0013	101.143
	ε	0.2537	0.4006	0.2501	0.3881	0.1530	0.2545	0.2986	0.1909	0.2536	0.2715	0.0813
1260	ρb	1132.1744	1076.9510	1157.5474	959.0598	857.3601	681.3258	903.2391	675.2854	875.1828	924.2362	176.956
	ρp	1342.9853	1385.7432	1420.9254	1469.6230	1348.0742	1332.9054	1343.8360	1302.3712	1377.9542	1369.3798	50.8313
	ε	0.1570	0.2228	0.1854	0.3474	0.3640	0.4888	0.3279	0.4815	0.3649	0.3266	0.1189
1320	ρb	943.5703	774.8835	1188.0408	1029.2402	895.4173	790.6868	1001.9494	912.3599	770.9951	923.0159	137.665
	ρp	1300.7988	1562.4335	1531.5930	1393.1515	1372.4196	1426.8294	1272.1351	1416.8151	1312.9288	1398.7894	99.5427
	ε	0.2746	0.5041	0.2243	0.2612	0.3476	0.4458	0.2124	0.3560	0.4128	0.3376	0.1024
1380	ρb	761.5442	952.2483	759.7105	792.7018	910.4336	872.4253	810.9876	860.6381	889.7748	845.6071	67.9274
	ρp	1446.1775	1446.1775	1446.1775	1416.8723	1428.4917	1397.0808	1377.8237	1402.3587	1354.1867	1412.8163	32.8252
	ε	0.4734	0.3415	0.4747	0.4405	0.3627	0.3755	0.4114	0.3863	0.3429	0.4010	0.0519
1440	ρb	925.7780	938.5723	852.4909	1023.4981	1000.3457	897.4547	855.2839	821.3892	798.7654	901.5087	77.5759
	ρp	754.6102	701.1368	743.5706	1403.2693	1438.3087	1403.2693	1108.1256	1084.1043	1149.7157	1087.3456	296.895
	ε	-0.2268	-0.3386	-0.1465	0.2706	0.3045	0.3605	0.2282	0.2423	0.3052	0.1110	0.2684
1500	ρb	1167.1646	1140.3919	960.6799	814.1531	1115.3475	946.1087	770.7273	860.6051	908.4467	964.8472	145.432
	ρp	1243.3470	1265.0493	1243.3470	1340.5699	1287.7569	1374.8192	1319.8855	1203.7831	1157.1312	1270.6321	68.3161
	ε	0.0613	0.0985	0.2273	0.3927	0.1339	0.3118	0.4161	0.2851	0.2149	0.2380	0.1252

1560	ρb	825.7178	827.9596	922.6153	972.5756	844.4151	840.2922	932.9198	749.9184	913.6957	870.0122	69.6808
	ρp	608.4733	619.6488	687.3969	1397.1725	1475.3927	1526.6749	1034.3949	1064.8686	1181.6496	1066.1858	363.279
	ε	-0.3570	-0.3362	-0.3422	0.3039	0.4277	0.4496	0.0981	0.2958	0.2268	0.0852	0.3388
1620	ρb	1105.1533	1171.2150	1032.5733	342.5001	470.9238	636.4478	909.6870	1074.2503	910.4498	850.3556	297.064
	ρp	852.9352	852.9352	852.9352	1465.6217	1595.9434	1853.9082	924.9300	924.9300	924.9300	1138.7854	388.836
	ε	-0.2957	-0.3732	-0.2106	0.7663	0.7049	0.6567	0.0165	-0.1614	0.0157	0.1244	0.4574
1680	ρb	1147.5015	900.1878	1009.8524	416.3883	459.4981	332.6447	869.4484	857.4502	1033.1194	780.6768	299.052
	ρp	706.6725	743.7941	766.6911	980.9995	1045.9289	994.4516	812.3346	876.7141	888.1128	868.4110	120.266
	ε	-0.6238	-0.2103	-0.3172	0.5755	0.5607	0.6655	-0.0703	0.0220	-0.1633	0.0488	0.4518
1740	ρb	338.0563	571.6836	486.9389	359.5892	404.0968	550.2017	363.7683	408.3461	554.6570	448.5931	92.9587
	ρp	1318.6786	1430.2377	1341.6958	1374.8150	1522.9727	1222.2751	780.0600	756.6522	814.9664	1173.5949	303.607
	ε	0.7436	0.6003	0.6371	0.7384	0.7347	0.5499	0.5337	0.4603	0.3194	0.5908	0.1430
1800	ρb	291.0094	364.8161	284.3733	550.5526	534.5360	553.2994	348.6146	457.2967	327.2261	412.4138	112.130
	ρp	1181.6432	1209.5987	1278.5654	1120.2929	1146.8356	946.8356	999.9905	937.9427	1192.3223	1112.6697	122.459
	ε	0.7537	0.6984	0.7776	0.5086	0.5339	0.4156	0.6514	0.5124	0.7256	0.6197	0.1295