



Benemérita Universidad
Autónoma de Puebla

FACULTAD DE INGENIERÍA
QUÍMICA

**“Evolución de las características
de deformación de papa durante
secado convectivo.”**

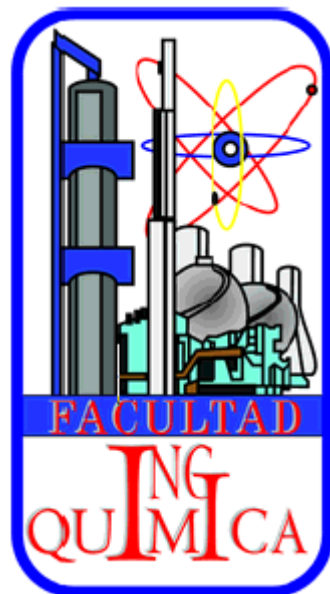
TESIS PROFESIONAL

Que para obtener el Título de:
Ingeniero en Alimentos

Presenta:
Estefania Yañez Mota

Director de Tesis:
Dr. Irving Israel Ruiz López

Puebla, Puebla. 2014





C. ESTEFANIA YAÑEZ MOTA
PASANTE
LICENCIATURA EN INGENIERÍA EN ALIMENTOS
PRESENTE

Oficio No. FIQ/AC/1007/2013
Asunto: Registro de Tema de Tesis
Fecha: 30 de Septiembre de 2013

Por medio del presente me permito informarle, de la aprobación del Registro de Tema de Tesis de la Licenciatura en Ingeniería en Alimentos cuyo título es el siguiente:

"EVOLUCIÓN DE LAS CARACTERÍSTICAS DE DEFORMACIÓN DE PAPA DURANTE SECADO CONVECTIVO"

Con el siguiente contenido:

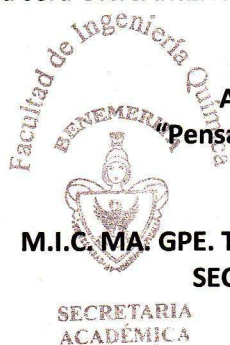
INTRODUCCIÓN

CAPÍTULO 1	ANTECEDENTES
CAPÍTULO 2	METODOLOGÍA
CAPÍTULO 3	RESULTADOS Y DISCUSIÓN

CONCLUSIONES
BIBLIOGRAFÍA

Director de Tesis: Dr. Irving Israel Ruiz López

Lo cual me permito comunicarle para su conocimiento y fines consiguientes aclarando que la vigencia de este tema será **ÚNICAMENTE POR UN AÑO.**



ATENTAMENTE

"Pensar Bien, Para Vivir Mejor"

M.I.C. MA. GPE. TITA VÁZQUEZ E. DE LOS MONTEROS
SECRETARIA ACADÉMICA

**SECRETARIA
ACADÉMICA**

C.c.p. Director de Tesis: Dr. Irving Israel Ruiz López
Minutario Facultad de Ingeniería Química



Benemérita Universidad Autónoma de Puebla

FACULTAD DE INGENIERÍA QUÍMICA

CIUDAD UNIVERSITARIA

LIC. Ma. Cristina Laura Gómez Aguirre.
Directora de la Administración Escolar
De la BUAP.
Presente

ASUNTO:
AUTORIZACIÓN
IMPRESIÓN DE TESIS

Por este conducto me permito presentar a Ud. al C. pasante de la carrera de Ingeniería en Alimentos:

Estefania Yañez Mota

Quién presenta como tema de tesis:

Evolución de las características de deformación de papa durante secado convectivo.

La cual ha sido debidamente revisada y se autoriza para su impresión correspondiente.

Sin otro particular y para los fines que se estimen conducentes reitero mi distinción.

ATENTAMENTE

“Pensar Bien, para Vivir Mejor”

H. Puebla de Z., a 24 de Septiembre de 2014

Director de Tesis
Dr. Irving Israel Ruiz López

Tesis para obtener el título de Ingeniero en
Alimentos

**Evolución de las características de
deformación de papa durante secado
convectivo**

Índice general

Índice de figuras	iv
Índice de tablas	v
Introducción	1
1. Planteamiento del problema	3
2. Justificación	4
3. Hipótesis	5
4. Objetivos	6
4.1. Objetivo general	6
4.2. Objetivos específicos	6
5. Marco teórico	7
5.1. Definición de secado	7
5.2. Encogimiento y deformación en alimentos	9
5.2.1. Mecanismo del encogimiento	10
5.2.2. Cálculo del encogimiento durante el secado de alimentos	11
5.3. Medición experimental del encogimiento y la deformación	13
5.4. Modelación del encogimiento	14
6. Materiales y métodos	21
6.1. Experimentos de secado y adquisición de la imagen	21
6.2. Análisis de imagen	26
6.3. Modelación de las características de encogimiento y deformación	28

7. Resultados y discusión	29
7.1. Evolución del área de sección transversal normalizada (A/A_0)	29
7.2. Evolución del perímetro de sección transversal normalizado (P/P_0) . .	33
7.3. Evolución del área específica de sección transversal normalizada (a/a_0)	37
7.4. Encogimiento y deformación de sección transversal obtenida a partir del prisma cuadrangular de papa	40
8. Conclusiones	44
Bibliografía	45

Índice de figuras

5.1. Representación esquemática de la transferencia de calor y masa durante el secado en una estructura de papa (adaptada de Aguilera, 2003). . .	8
5.2. Diagrama de estabilidad de alimentos y velocidad relativa de las reacciones degradativas en función de la actividad de agua (adaptada de Aguilera, 1992).	9
5.3. Representación esquemática de los fenómenos del encogimiento y colapso que pueden llegar a ocurrir durante el secado de alimentos (adaptada de Khalloufi <i>et al.</i> , 2009).	11
5.4. Relación existente entre el volumen normalizado (V/V_0) de cilindros de zanahoria y su contenido de humedad (adaptada de Hatamipour & Mowla, 2002).	16
5.5. Relación existente entre el cuadrado del diámetro normalizado (D/D_0) ² de cilindros de zanahoria y su contenido de humedad (adaptada de Hatamipour & Mowla, 2002).	16
5.6. Determinación del encogimiento en esferas de papa como una función del contenido de humedad comparando tres modelos (adaptada de McLaughlin & Magee, 1998).	17
5.7. Datos experimentales y ajuste por serie de potencias para el encogimiento de cilindros de papa como función de la velocidad del aire de secado ($T=50^{\circ}\text{C}$, $\text{HR}=33\%$) (adaptada de Ratti, 1994).	18
5.8. Datos experimentales y ajuste por serie de potencias para el área específica normalizada (a/a_0) en discos y cilindros de papa sometidos a secado convectivo ($T=50^{\circ}\text{C}$, $\text{HR}=33\%$) (adaptada de Ratti, 1994). . .	19
7.1. Área de la sección transversal normalizada (A/A_0) de los perfiles originales.	30
7.2. Área de la sección transversal normalizada (A/A_0) de los perfiles promedio.	31

7.3. Relación entre las áreas de sección transversal normalizada (A/A_0) de los perfiles promedio contra los originales.	32
7.4. Perímetro de la sección transversal normalizado (P/P_0) de los perfiles originales.	34
7.5. Perímetro de sección transversal normalizado (P/P_0) de los perfiles promedio.	35
7.6. Relación entre los perímetros de la sección transversal normalizados (P/P_0) de los perfiles promedio contra los originales.	36
7.7. Área específica de sección transversal normalizada (a/a_0) de los perfiles originales.	37
7.8. Área específica de sección transversal normalizada (a/a_0) de los perfiles promedio.	39
7.9. Relación entre las áreas específicas de la sección transversal normalizadas (a/a_0) de los perfiles promedio contra los originales.	40
7.10. Mapa de encogimiento-deformación de los prismas de papa secados a una temperatura de 50°C.	41
7.11. Mapa de encogimiento-deformación de los prismas de papa secados a una temperatura de 60°C.	42
7.12. Mapa de encogimiento-deformación de los prismas de papa secados a una temperatura de 70°C.	42
7.13. Mapa de encogimiento-deformación de los prismas de papa secados a una temperatura de 80°C.	43

Índice de tablas

6.1. Tiempos y fracciones de humedad libre obtenidas experimentalmente durante el secado convectivo de prismas cuadrangulares de papa.	22
6.2. Tiempos requeridos para alcanzar una fracción de humedad libre deseada en muestras de papa secadas a diferentes temperaturas.	23
7.1. Parámetros de regresión del modelo de área de sección transversal normalizada (A/A_0) usando los perfiles originales.	30
7.2. Parámetros de regresión del modelo de área de sección transversal normalizada (A/A_0) usando los perfiles promedio.	31
7.3. Parámetros de regresión de la relación entre las áreas de sección transversal normalizada (A/A_0) de los perfiles originales contra los perfiles promedio.	32
7.4. Parámetros de regresión del modelo del perímetro de sección transversal normalizado (P/P_0) usando los perfiles originales.	34
7.5. Parámetros de regresión del modelo del perímetro de sección transversal normalizado (P/P_0) usando los perfiles promedio.	35
7.6. Parámetros de regresión de la relación entre los perímetros de sección transversal normalizada (P/P_0) de los perfiles originales contra los perfiles promedio.	36
7.7. Parámetros de regresión del modelo del área específica normalizada (a/a_0) usando los perfiles originales.	38
7.8. Parámetros de regresión del modelo del área específica normalizada (a/a_0) usando los perfiles promedio.	39
7.9. Parámetros de regresión de la relación entre las áreas específicas de sección transversal normalizadas (a/a_0) de los perfiles originales contra los perfiles promedio.	40

Introducción

El secado convectivo es una de las técnicas de procesamiento más importantes para la conservación de alimentos. Esta operación provoca varios cambios físicos y químicos en los alimentos, siendo la reducción de tamaño y deformación, provocados por la pérdida de agua y colapso de la estructura celular, los más evidentes. El secado convectivo se considera una operación controlada por la difusión de humedad interna, donde el coeficiente de difusión efectivo del agua en el producto caracteriza la velocidad a la que ocurre el proceso, y su cálculo depende de la distancia que deben recorrer las moléculas de agua para alcanzar la superficie del alimento. De esta forma, el fenómeno de encogimiento ha sido reconocido como el principal factor que afecta la estimación de la difusividad del agua debido al acortamiento de su trayectoria de difusión (Ruiz-López *et al.*, 2012).

Los métodos existentes para medir el encogimiento en alimentos sujetos a procesos de secado se basan en la medición directa de las dimensiones lineales del producto o medición del volumen por técnicas de desplazamiento, no proporcionando información sobre su deformación. Recientemente, se han publicado diversos estudios sobre la aplicación de técnicas de análisis de imagen para la medición de las características de encogimiento-deformación de alimentos sujetos a secado (Campos-Mendiola *et al.*, 2007; Panyawong & Devahastin, 2007; Yadollahinia *et al.*, 2009; Gumeta-Chávez *et al.*, 2011); sin embargo, en todos los casos la medición del encogimiento y deformación del producto se hace sobre una dimensión en la que no ocurre el transporte de masa de forma preferentemente, limitando su aplicación a la modelación y simulación de esta operación.

La finalidad de este trabajo es desarrollar una nueva metodología basada en técnicas de análisis de imagen para evaluar el encogimiento-deformación de productos con transporte de masa en dos dimensiones, donde estos fenómenos se evalúan en la misma dirección en la que ocurre la pérdida de agua en el producto. Para ello, se secaron tiras de papa ($8\text{ cm} \times 0.95\text{ cm} \times 0.95\text{ cm}$) obtenidas a 50, 60, 70 and 80°C con una velo-

cidad de aire de 2 m/s. Las dimensiones se seleccionaron para favorecer el transporte de masa y deformación en las dimensiones de menor tamaño.

Los resultados demostraron que no existe un efecto de la temperatura sobre las características de encogimiento y deformación en los prismas de papa bajo las condiciones experimentales estudiadas ($p < 0.05$), produciendo muestras con aproximadamente el 17 y 63 % de su área y perímetro de sección transversal iniciales. Por otra parte, el área específica promedio registró un aumento no lineal al disminuir el contenido de humedad, incrementándose en aproximadamente un 209 %.

1. Planteamiento del problema

En la mayoría de los procesos industriales existe por lo menos una etapa que involucra al secado. Esta operación unitaria es considerada como una de las más importantes en la Ingeniería de Alimentos, y consiste en la remoción de relativamente pequeñas cantidades de agua u otro líquido del material sólido para reducir el contenido del líquido residual a un valor aceptablemente bajo. Sin embargo, la transferencia simultánea de masa de la superficie y calor hacia la superficie y el interior del material, la hidrodinámica del movimiento de partículas en el secador, los diferentes mecanismos de transporte de agua dentro del material sólido, y el encogimiento son algunos de los problemas asociados a esta tecnología (Hatamipour & Mowla, 2002).

Durante la evaporación de agua ocurren varios cambios en la estructura física de los alimentos y, fenómenos como el encogimiento y la deformación, determinan las propiedades estructurales y la calidad finales del producto sometido al secado. La deformación es el cambio en la geometría del producto provocado por la remoción del agua interna, afectando a su vez al encogimiento, y se ha comprobado que si este último es ignorado durante la modelación de la operación, la difusividad efectiva se reduce a un parámetro empírico obtenido que ajusta simplemente los datos experimentales, ya que no se incluye en su estimación la disminución gradual y significativa de la distancia que deben recorrer las moléculas de agua para dejar el producto, sobreestimando el valor real de ésta. Actualmente existen modelos que implementan este fenómeno durante la simulación de secado, pero consideran que no existe deformación, debido a la falta de métodos para cuantificarlo experimentalmente, por lo que el desarrollo de una metodología para tal propósito es fundamental para generar nuevo conocimiento en la estimación de propiedades de transporte de masa (Ruiz-López & García-Alvarado, 2007; Ruiz-López *et al.*, 2012).

2. Justificación

El encogimiento en un producto alimenticio produce una variación en la distancia requerida para el movimiento de las moléculas de agua, ocasionando una sobreestimación en el valor de la difusividad efectiva cuando no se considera este fenómeno en la modelación (Ruiz-López & García-Alvarado, 2007). A la fecha, tampoco se ha reportado el impacto de la deformación en la simulación del proceso de secado, principalmente debido a la ausencia de métodos para cuantificarla o incorporarla en los modelos. El grupo de investigación BUAP-CA-176 “Innovación en Tecnología para el Desarrollo de Producto Alimenticios” de la Facultad de Ingeniería Química ha empezado a desarrollar modelos difusionales de secado que son capaces de incorporar la deformación del producto, pero se requieren datos experimentales para alimentar a los simuladores.

En la investigación realizada por Ortiz-García-Carrasco (2013) se propuso el desarrollo de una metodología con análisis de imágenes y uso de software para estimar de manera simultánea el encogimiento y la deformación. En dicho trabajo se secaron tiras de papa ($8\text{ cm} \times 0.95\text{ cm} \times 0.95\text{ cm}$) a diferentes temperaturas (50, 60, 70 y 80°C) y se obtuvo la deformación final del producto a partir del análisis de imágenes digitales de láminas provenientes del corte transversal del producto. Los contornos de las muestras fueron promediados para modelar las características de la deformación y encogimiento al final del proceso de secado, usándose en la solución numérica del proceso para evaluar las difusividades efectivas, donde se consideró que el área de sección transversal estaba relacionada con el contenido de humedad por un modelo de línea recta, comportamiento que no fue comprobado. En este trabajo se propone desarrollar una metodología para cuantificar el encogimiento y deformación de un producto a lo largo del proceso y así poder determinar de forma confiable la relación existente entre los fenómenos de encogimiento-deformación y humedad del producto, así como el instante en que empieza a deformarse el producto.

3. Hipótesis

El estudio de cortes de sección transversal de muestras de producto durante el proceso de secado convectivo por medio de técnicas de análisis de imagen y gravimétricas hará posible el desarrollo de una metodología para cuantificar la evolución de la deformación de alimentos, relacionándola con su contenido de humedad y temperatura de secado.

4. Objetivos

4.1. Objetivo general

Establecer el encogimiento y deformación de prismas rectangulares de papa durante su secado convectivo.

4.2. Objetivos específicos

1. Desarrollar e implementar la metodología para cuantificar el encogimiento y deformación del producto a lo largo del proceso de secado.
2. Establecer si existe un efecto de humedad y temperatura sobre el encogimiento y deformación del producto.
3. Describir matemáticamente los datos obtenidos de encogimiento y deformación.

5. Marco teórico

5.1. Definición de secado

“El secado se refiere generalmente a la operación unitaria que consiste en la separación del líquido de un sólido por medio de evaporación.” Perry & Green (2010)

En esta operación debe aportarse calor sensible y latente, ambos necesarios para transferir la masa de agua en forma de líquido o vapor dentro del sólido, y como vapor de agua que se desprende de las superficies expuestas donde se transfiere hacia la corriente de aire, que actúa también como un agente transportador (Figura 5.1), pero en esta definición el alimento ha sido considerado como un sólido homogéneo, y no provee la información suficiente sobre los fenómenos internos y externos de transporte y sus propiedades físicas incluyendo la microestructura característica del alimento al que se somete esta tecnología.

5.1. DEFINICIÓN DE SECADO

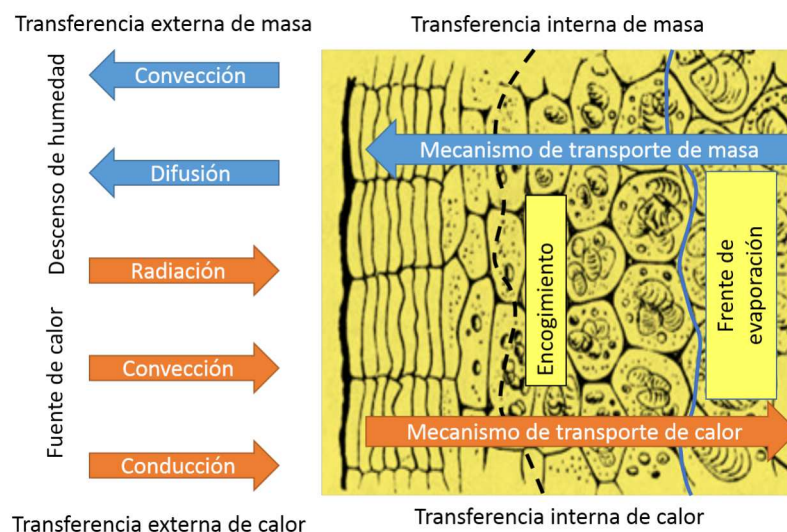


Figura 5.1. Representación esquemática de la transferencia de calor y masa durante el secado en una estructura de papa (adaptada de Aguilera, 2003).

En general, durante el secado, se observa un mecanismo de circulación del líquido, que predomina durante un tiempo específico dentro del sólido. La causa de este mecanismo es debido a la estructura de éste y de cómo permite el flujo interno del líquido; pudiéndose mencionar los siguientes mecanismos: difusión en sólidos homogéneos continuos, flujo capilar en sólidos granulados y porosos, flujo provocado por gradientes de contracción y presión, flujo producido por gravedad y por último, el flujo originado por una secuencia de evaporación y condensación.

Durante el secado convectivo de alimentos se dan de manera simultánea el transporte másico, gracias a los gradientes existentes entre la concentración superficial e interna del agua del producto, y de calor, producto de las diferencias entre las temperaturas del aire y del producto sometido al secado, de tal manera que el objetivo de este fenómeno de transporte es alcanzar la humedad de equilibrio a la temperatura trabajada. Este comportamiento puede ser observado e interpretado en las curvas de secado, en las que se interpreta cómo los sólidos mojados pierden humedad a través del tiempo, primero por evaporación desde una superficie saturada del sólido, a lo cual sigue un período de evaporación de la superficie saturada que tiene un área gradualmente decreciente y, por último, cuando el agua se evapora en el interior del sólido (Geankoplis, 1998; Perry & Green, 2010).

5.2. ENCOGIMIENTO Y DEFORMACIÓN EN ALIMENTOS

Aunque esta tecnología sea la más requerida para preservar e incrementar la vida útil de alimentos de humedad alta e intermedia, debido a que reduce drásticamente su actividad de agua (a_w), inhibiendo así el crecimiento bacteriano y reacciones enzimáticas indeseables (Figura 5.2) y facilitando las operaciones posteriores de manejo, almacenamiento y transporte (Hayashi, 1989), durante el secado convectivo de un producto, la transferencia de calor y los gradientes de humedad causan estrés microestructural generando la contracción e hinchamiento de los tejidos, manifestándose cambios estructurales como el encogimiento, la deformación y el colapso celular, que, en la mayoría de los casos, imposibilitan al producto a una aceptación sensorial total por parte de consumidor.

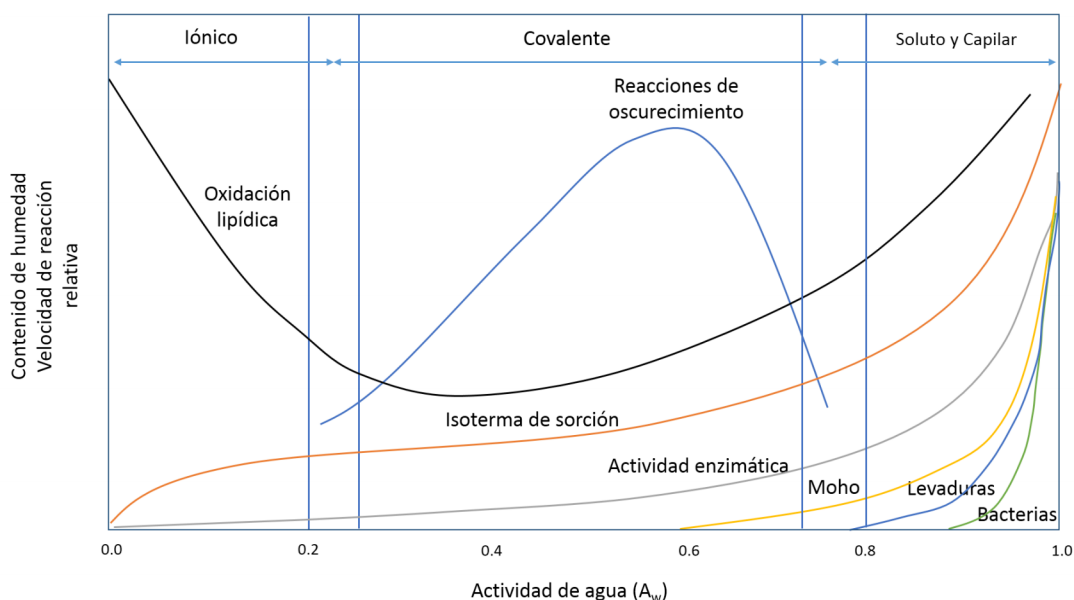


Figura 5.2. Diagrama de estabilidad de alimentos y velocidad relativa de las reacciones degradativas en función de la actividad de agua (adaptada de Aguilera, 1992).

5.2. Encogimiento y deformación en alimentos

Los cambios más evidentes, y sin embargo, los menos adaptados a modelos de secado hasta el presente, son la reducción de tamaño y la deformación, ambos provocados por la pérdida de agua y colapso de la estructura celular. El secado convectivo se considera

una operación controlada por la difusión de humedad interna, donde el coeficiente de difusión efectivo del agua en el producto caracteriza la velocidad a la que ocurre el proceso, y su cálculo depende de la distancia que deben recorrer las moléculas de agua para alcanzar la superficie del alimento. De esta forma, el fenómeno de encogimiento ha sido reconocido como el principal factor que afecta la estimación de la difusividad del agua debido al acortamiento de su trayectoria de difusión (Ruiz-López *et al.*, 2012).

El encogimiento representa el cambio relativo o la reducción dimensional del volumen, área o espesor de un producto alimenticio, y ocurre cuando la matriz viscoelástica se contrae hacia los espacios que anteriormente fueron ocupados por el agua interna extraída de las células de ésta (Aguilera, 2003). La reducción del volumen externo es uno de los cambios físicos más notables que sufre un producto alimenticio durante el secado, el calentamiento y la pérdida de agua intracelular causa estrés en la estructura celular, provocando cambios en la forma y la disminución en sus dimensiones, afectando la transferencia de calor y masa durante el secado (Mayor & Sereno, 2004).

5.2.1. Mecanismo del encogimiento

Los sistemas alimenticios sólidos y semisólidos son altamente heterogéneos, y pueden ser considerados como redes sólidas tridimensionales o matrices sólidas que retienen en su interior grandes cantidades de líquido, en la mayoría, una solución acuosa. Los biopolímeros son las estructuras elementales de esta matriz, aunque también puede estar formada por otro tipo de materiales complejos (Aguilera, 1992). La estructura particular del material alimenticio y las características mecánicas de sus elementos en equilibrio, definen su volumen, determinan su forma y tamaño de una muestra tomada de cualquiera de estos sistemas. Cuando el agua es removida del alimento, se produce un desequilibrio entre la presión interna y la externa, generando un estrés que contrae la muestra, ocasionando el encogimiento o colapso, se comienza a modificar su forma y sucesivamente se deforma su geometría inicial (Mayor & Sereno, 2004) (Figura 5.3).

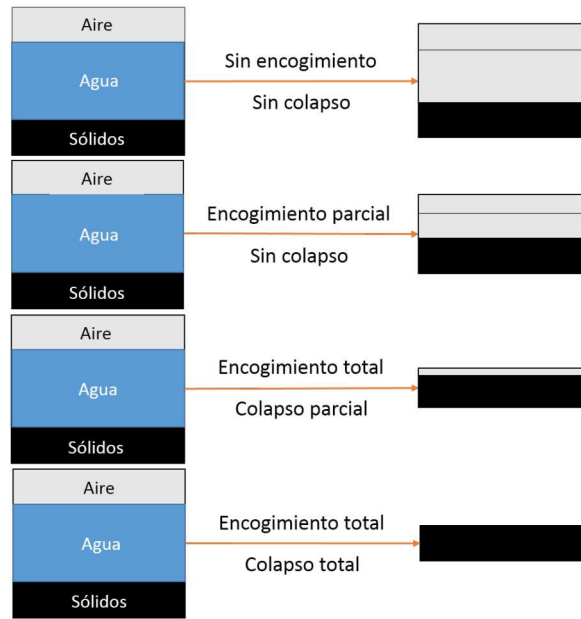


Figura 5.3. Representación esquemática de los fenómenos del encogimiento y colapso que pueden llegar a ocurrir durante el secado de alimentos (adaptada de Khalloufi *et al.*, 2009).

5.2.2. Cálculo del encogimiento durante el secado de alimentos

El encogimiento ha sido medido a través de cambios en las dimensiones del producto o por el cambio en parámetros relacionados como la porosidad o la densidad. Por ejemplo, Zogzas *et al.* (1994) determinaron experimentalmente los términos de densidad aparente, densidad de partícula, encogimiento y porosidad durante el secado convectivo de cubos manzana, zanahoria y papa, considerando que el producto húmedo está conformado por sólidos secos, agua y aire. La ecuación que integra el coeficiente de encogimiento volumétrico (β) se describe a continuación:

$$\frac{v}{v_0} = 1 + \beta \cdot X \quad (5.1)$$

En la ecuación anterior, la humedad de la muestra en base seca (kg agua/kg sólidos secos) se determina por

$$X = \frac{m_w}{m_s} \quad (5.2)$$

5.2. ENCOGIMIENTO Y DEFORMACIÓN EN ALIMENTOS

y v es el volumen específico de la muestra (m^3/kg sólidos secos) definido como

$$v = \frac{V_s + V_w + V_a}{m_s} \quad (5.3)$$

donde $V_s + V_w + V_a$ es la suma de los volúmenes de sólidos secos, agua y aire, respectivamente, que conforman la muestra, mientras que m_s es la masa de sólidos secos de la misma. Por lo tanto, v_0 es el volumen específico cuando $X = 0$.

Por su parte, Rahman *et al.* (1996) propusieron otra ecuación para calcular el encogimiento durante el secado de calamar, a partir de la densidad aparente o densidad global (ρ_A), definida como la densidad del producto incluyendo todos los poros remanentes en él, resultado de la derivación del balance total de sólidos

$$S = \frac{\rho_{a_0}}{\rho_A} \cdot \left[\frac{1 - X_{w_0}}{1 - X_w} \right] \quad (5.4)$$

donde X_w y X_{w_0} son las fracciones másicas base húmeda en un momento determinado y al inicio del secado respectivamente, y ρ_{a_0} es la densidad aparente inicial del producto, convirtiéndose la ecuación anterior en

$$S = \frac{V_A}{V_{a_0}} \quad (5.5)$$

Con la ecuación de la relación entre los volúmenes específicos, y la definición de encogimiento a partir del balance total de sólidos secos, Mayor & Sereno (2004) definieron el encogimiento (S_b) como un cambio dimensional relativo o la reducción del volumen del producto, y actualmente también es calculado con los parámetros del área o de los espesores iniciales y finales obtenidos durante el proceso de secado.

$$S_b = \frac{V}{V_o} \quad (5.6)$$

En concordancia como esta definición, Koc *et al.* (2008) lo describen como la relación entre el volumen aparente de la muestra en un momento específico del secado y el volumen aparente cuando la muestra se encuentra fresca. Este cambio de volumen en los sistemas alimentarios es indispensable tomarlo en cuenta cuando se predicen los perfiles de contenido de humedad de los materiales que se someten al secado o a la deshidratación.

5.3. Medición experimental del encogimiento y la deformación

Yan *et al.* (2008) emplearon métodos de desplazamiento para cuantificar los cambios en el volumen específico, encogimiento y porosidad en rebanadas de plátano, piña y mango durante su secado convectivo, a través de la determinación de sus volúmenes aparente y verdadero; para la medición experimental de este último, se hizo uso de un picnómetro de gas, pero para el volumen aparente de la muestra, los métodos para la medición del desplazamiento fueron realizados con perlas de vidrio, tolueno y n-heptano, picnómetro de líquidos y aplicando el principio de Arquímedes. El encogimiento, lo reportan como porcentaje de encogimiento, y evaluado en función de su volumen aparente, la ecuación empleada es similar a la que utilizan Mayor & Sereno (2004).

$$S = \frac{V_d}{V_0} \times 100 \quad (5.7)$$

donde V_d es el volumen aparente de la muestra después del secado y V_0 es el volumen aparente de la muestra en fresco. Adicionalmente, se empleó el análisis de imagen de las muestras deshidratadas y frescas para observar y cuantificar el colapso estructural a nivel de la macroestructura midiendo los cambios en área, perímetro, diámetro equivalente y utilizando un factor de forma (SF), que se calcula como

$$SF = \frac{Perímetro}{Área} = \frac{PD_e}{4A} \quad (5.8)$$

Para el secado convectivo de discos de agave cortados de manera transversal y longitudinal, Gumeta-Chávez *et al.* (2011) midieron la influencia que la pérdida de agua, el encogimiento y la deformación tienen en la estructura del tejido, utilizando cuatro parámetros morfológicos para realizar el estudio del cambio en su macroestructura, los cuales fueron área proyectada (PA), longitud mayor (ML), factor de forma (SF) y dimensión fractal del contorno (FDc).

Para relacionar los cambios de tamaño y forma, se midieron el desplazamiento de *n*-heptano en una probeta graduada y el grosor de las muestras con un micrómetro, dando lugar a la siguiente ecuación, que emplea el valor del exponente fractal (d), valor que varía entre 1 y 3, y que es un indicador de la ley de potencia fractal entre el grosor

5.4. MODELACIÓN DEL ENCOGIMIENTO

y el volumen del producto sometido a deformación por la deshidratación, y es una medición de la heterogeneidad de tal deformación en sistemas de volumen cambiantes.

$$\frac{V}{V_0} = \left(\frac{L}{L_0} \right)^d \quad (5.9)$$

Yadollahinia *et al.* (2009) aplicaron técnicas de procesamiento de imagen para medir el cambio en la forma de rodajas de papa. Su metodología consiste en el uso de un sistema de adquisición de imágenes para medir los efectos del secado en la superficie de encogimiento, y la relación entre ésta y el contenido de humedad de las muestras. A través del procesamiento de las imágenes capturadas con software se obtuvieron parámetros celulares como área, perímetro, diámetros mayor y menor y los diámetros paralelo y perpendicular al flujo del aire, también el diámetro de Feret y la redondez. En estos dos últimos, se emplean el área (A) y el perímetro (P) de la muestra, calculados a través de su número de píxeles, y se calculan de la siguiente manera respectivamente,

$$FD = 2\sqrt{\frac{A}{\pi}} \quad (5.10)$$

$$R = \frac{4\pi A}{P^2} \quad (5.11)$$

5.4. Modelación del encogimiento

Como se ha presentado, el secado de productos alimenticios produce reducciones significativas en el volumen y el área principal de transferencia de masa y calor, debido a que su estructura celular varía conforme a las condiciones en las que fueron sometidos a esta tecnología de preservación. La disminución de su superficie a causa de la contracción de los tejidos es acompañada por la pérdida de agua, de tal manera que todos los parámetros que dependen de los cambios en sus dimensiones externas e internas repercuten en el ajuste preciso de modelos de curvas de velocidad de secado. El fenómeno del encogimiento afecta el coeficiente de difusión efectiva del agua, que es uno de los principales parámetros que gobiernan el proceso de secado, y también tiene influencia en la velocidad de secado Ortiz-García-Carrasco (2013).

Estudios recientes han tratado de analizar y predecir la transferencia de masa en productos alimenticios incluyendo al encogimiento, remarcando que éste fenómeno del

5.4. MODELACIÓN DEL ENCOGIMIENTO

secado tiene un fuerte influencia en la velocidad de secado al modificar significativamente el coeficiente de difusión del agua Ruiz-López & García-Alvarado (2007). Pero, en las bases teóricas del encogimiento debe tomarse en cuenta el estrés del material alimenticio y la evolución de la deformación durante la remoción del agua, aunque su cuantificación y análisis sea en extremo complicado por tratarse de sistemas multifásicos y naturaleza celular, por lo tanto, características como su estructura, las propiedades elásticas y mecánicas de cada fase del sistema, y su variación con el contenido de humedad y temperatura son requeridas para conocer y describir satisfactoriamente este fenómeno y predecir correctamente los tiempos de secado y los promedios de velocidades de secado.

En este trabajo se propusieron tres parámetros para analizar la evolución del encogimiento y la deformación en la geometría propuesta, y son el área (A/A_0), el perímetro (P/P_0) y el área específica (a/a_0) normalizados de la sección transversal, y aunque diversos trabajos incluyen también el concepto de estos tres parámetros, son determinados y analizados con metodologías diferentes a la propuesta pero con la misma finalidad de cuantificar y poder emplearlos posteriormente para simular el encogimiento pero no la deformación.

Por ejemplo, Hatamipour & Mowla (2002) propusieron que los cambios de volumen (V/V_0) (Figura 5.4) y cuadrado del diámetro ($(D/D_0)^2$) (Figura 5.5) durante el secado de muestras cilíndricas de zanahorias en lecho fluidizado con partículas inertes, puede ser modelado como una función de línea recta del contenido de humedad de las muestras (X), y que la contracción de la longitud en el eje axial (L/L_0) fuera correlacionado como una función logarítmica del contenido de humedad, reportando que no existe un efecto de la temperatura en la geometría estudiada durante el secado.

La equivalencia que existe entre el volumen del producto normalizado (V/V_0) y el área de sección transversal normalizada (A/A_0) se puede comprobar considerando que

$$\frac{V}{V_0} = \frac{A \cdot L}{A_0 \cdot L_0} = \frac{A}{A_0} \quad (5.12)$$

donde L es la longitud del prisma cuadrangular de papa, y conforme se somete éste al secado, el verdadero cambio en el encogimiento existe en el área de sección transversal normalizada (A/A_0), volviéndose el encogimiento en L despreciable. Por otra parte, la equivalencia entre el diámetro del producto normalizado ($(D/D_0)^2$) y el perímetro de sección transversal normalizado (P/P_0) también se puede comprobar tomando la

5.4. MODELACIÓN DEL ENCOGIMIENTO

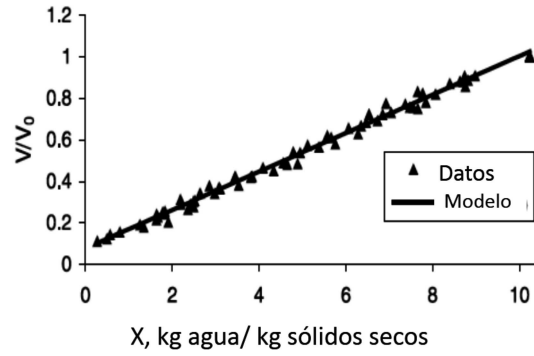


Figura 5.4. Relación existente entre el volumen normalizado (V/V_0) de cilindros de zanahoria y su contenido de humedad (adaptada de Hatamipour & Mowla, 2002).

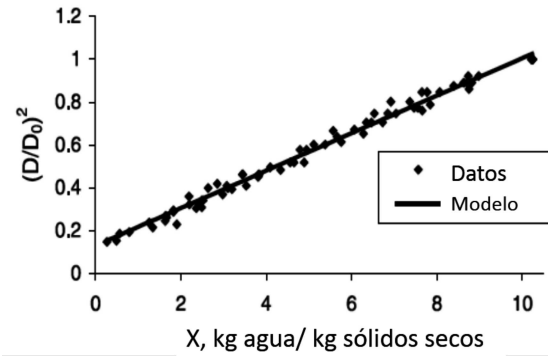


Figura 5.5. Relación existente entre el cuadrado del diámetro normalizado $(D/D_0)^2$ de cilindros de zanahoria y su contenido de humedad (adaptada de Hatamipour & Mowla, 2002).

5.4. MODELACIÓN DEL ENCOGIMIENTO

siguiente consideración

$$\frac{S}{S_0} = \left(\frac{4 \cdot \pi \cdot D}{4 \cdot \pi \cdot D_0} \right)^2 = \frac{D^2}{D_0^2} = \left(\frac{D}{D_0} \right)^2 = \frac{P}{P_0} \quad (5.13)$$

McLaughlin & Magee (1998) determinaron el encogimiento de esferas de papa, secadas en lecho fluidizado a una velocidad de 1 m/s, donde la medición del encogimiento (V/V_0) fue por medio de desplazamiento volumétrico de tolueno. Se propusieron para el ajuste de los datos experimentales tres modelos, que relacionan el encogimiento con respecto al contenido de humedad durante el secado. El mejor ajuste se encontró con el siguiente modelo de línea recta

$$\frac{V}{V_0} = a + bX \quad (5.14)$$

donde V/V_0 es el encogimiento volumétrico, X es el contenido de humedad ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$) y a , b son constantes, modelo similar al propuesto por Hatamipour & Mowla (2002), pero alcanzando un valor final del encogimiento diferente durante el secado. Esta variación puede ser causada por el tipo de geometría, y las condiciones como la velocidad de secado y temperatura con las que se trabajó.

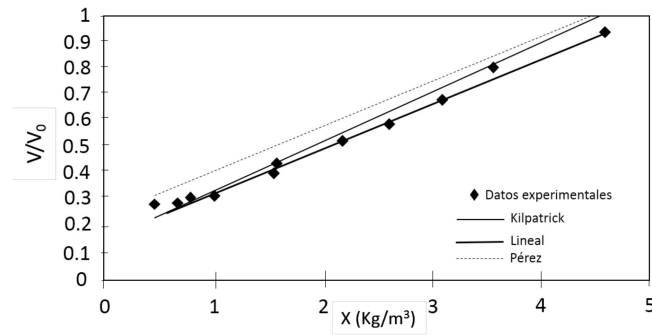


Figura 5.6. Determinación del encogimiento en esferas de papa como una función del contenido de humedad comparando tres modelos (adaptada de McLaughlin & Magee, 1998).

Ratti (1994) comprueba en su trabajo que el encogimiento volumétrico (V/V_0) es afectado por la velocidad del aire empleada durante el secado (Figura 5.7), y que la relación área superficial y volumen en función del contenido de humedad son prácticamente independientes de las condiciones experimentales usadas, pero sí son dependientes de la geometría y del material alimenticio de la muestra. Se puede inferir

5.4. MODELACIÓN DEL ENCOGIMIENTO

que las diferentes velocidades de secado empleadas para cilindros de papa (1×5 cm) dieron lugar a un encogimiento final entre el 14 % al 20 % sobre su área original bajo condiciones de secado parecidas a la velocidad de secado empleada en este trabajo (2 m/s).

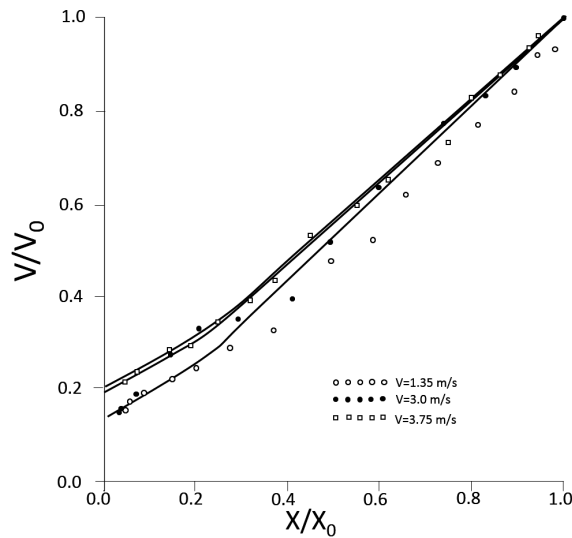


Figura 5.7. Datos experimentales y ajuste por serie de potencias para el encogimiento de cilindros de papa como función de la velocidad del aire de secado ($T=50^{\circ}\text{C}$, $\text{HR}=33\%$) (adaptada de Ratti, 1994).

El comportamiento de los datos experimentales de la Figura 5.7, puede ser comparado con los datos experimentales de las Figuras 7.1 y 7.2, concluyendo que el secado de un producto con cierta geometría produce un encogimiento proporcional a la disminución del contenido de humedad en éste, observándose una inflexión de los datos a valores bajos de humedad.

Ratti (1994) también introduce un parámetro conocido como la relación entre el área superficial y el volumen, conocida como área específica, que arroja de manera empírica como debe ser el diseño del secador, porque su definición permite saber la velocidad con que se secará un producto en relación a su tamaño. Estos autores demostraron que el área específica normalizada es independiente de las condiciones de secado de discos y cilindros de papa, pero depende de su contenido de humedad y la geometría empleada (Figura 5.8).

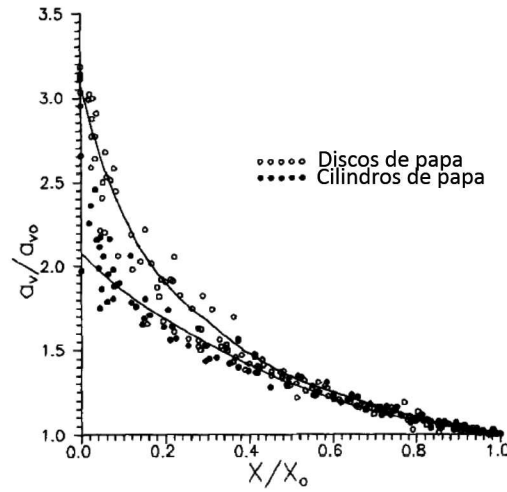


Figura 5.8. Datos experimentales y ajuste por serie de potencias para el área específica normalizada (a/a_0) en discos y cilindros de papa sometidos a secado convectivo ($T=50^{\circ}\text{C}$, $\text{HR}= 33\%$) (adaptada de Ratti, 1994).

Respecto a la tecnología empleada para el análisis de imagen para la medición del encogimiento y deformación de nuestro producto, se han publicado diversos trabajos, como es el caso de Campos-Mendiola *et al.* (2007), que utilizan la metodología SAFES para estudiar el encogimiento y los cambios en la microestructura de rodajas de papa (consideradas como un producto homogéneo y no-isotrópico) sometidas al secado convectivo, y empleando también geometría fractal para estudiar las interfaces y otros casos como las barreras de control-transferencia. La metodología que proponen es muy similar a la utilizada en este trabajo, convirtiendo las imágenes en un número de matrices con la ayuda de un software de computadora, que determina los parámetros geométricos, permitiendo a las matrices ser manipuladas para ser contrastadas, oscurecidas o clarificadas (Aguilera, 2003). Su análisis incluye la transformación en escalas de grises de las imágenes capturadas, seguida de la segmentación del contorno para obtener la forma de la interfase sólido-aire de las rodajas; y se tomaron los valores del área lateral proyectada normalizada (A_{lat}/A_{lat_0}) como indicadores del encogimiento/deformación no isotrópico para determinar la correlación con la remoción de la humedad.

Otro caso donde se ha intentado modelar el encogimiento conjuntamente con la deformación es con el secado de cubos de zanahoria, trabajo realizado por Panyawong & Devahastin (2007), utilizando el parámetro de factor de forma Heywood (k), que

5.4. MODELACIÓN DEL ENCOGIMIENTO

involucra el volumen del cubo (V_p) medido por desplazamiento de n -heptano, y la medición del área de proyección de una de las caras del cubo (A_p) y haciendo su equivalencia al diámetro de una esfera con esta dimensión ($d_a = \sqrt{4 \cdot A_p / \pi}$), es decir:

$$k = \frac{V_p}{d_a^3} \quad (5.15)$$

Sus curvas obtenidas del secado y el ajuste de un modelo de segundo orden muestran que el encogimiento no sigue una tendencia lineal como en la mayoría de los trabajos se reporta, y que la deformación se presenta en las etapas de secado más avanzadas. Conforme avanza el secado hacia éstas últimas etapas del secado el factor de forma de Heywood disminuye drásticamente, lo cual implica en una deformación no-uniforme. Y así como estos dos trabajos, Yadollahinia *et al.* (2009) y Gumeta-Chávez *et al.* (2011) reportan valores similares para la medición del encogimiento y también su deformación; sin embargo, en todos los casos la medición del encogimiento y deformación del producto se hace sobre una dimensión en la que no ocurre el transporte de masa de forma preferentemente, limitando su aplicación a la modelación y simulación esta operación. Por lo tanto, en este trabajo se introduce una nueva metodología para evaluar la deformación y el encogimiento de productos con transporte de masa en 2D, donde estos fenómenos se evalúan en la misma dirección en la que ocurre la pérdida de agua en el producto.

6. Materiales y métodos

6.1. Experimentos de secado y adquisición de la imagen

Inicialmente se emplearon los datos experimentales de los tiempos y fracciones de humedad libre a diferentes temperaturas recopilados durante el secado convectivo de papa de Ortiz-García-Carrasco (2013) (Tabla 6.1), para determinar los tiempos específicos en los cuales se alcanzan las fracciones de humedad con valores aproximados de 0.9 hasta 0.1 en las muestras.

6.1. EXPERIMENTOS DE SECADO Y ADQUISICIÓN DE LA IMAGEN

Tabla 6.1. Tiempos y fracciones de humedad libre obtenidas experimentalmente durante el secado convectivo de prismas cuadrangulares de papa.

t (min)	ψ a 50°C	ψ a 60°C	ψ a 70°C	ψ a 80°C
0	1.0	1.0	1.0	1.0
1	0.992	0.986	0.990	0.987
2	0.983	0.983	0.980	0.982
3	0.976	0.969	0.969	0.967
4	0.968	0.957	0.957	0.951
5	0.960	0.953	0.946	0.938
10	0.920	0.899	0.889	0.877
15	0.882	0.855	0.833	0.804
20	0.845	0.811	0.777	0.750
25	0.809	0.763	0.724	0.690
30	0.773	0.721	0.674	0.628
40	0.706	0.636	0.581	0.530
50	0.643	0.571	0.500	0.448
60	0.584	0.502	0.429	0.369
70	0.531	0.444	0.368	0.310
80	0.482	0.394	0.316	0.256
95	0.417	0.329	0.249	0.189
110	0.360	0.278	0.191	0.130
125	0.310	0.232	0.146	0.089
140	0.265	0.190	0.108	0.064
155	0.225	0.157	0.077	0.042
175	0.178	0.113	0.049	0.026
195	0.137	0.085	0.032	0.017
215	0.103	0.058	0.022	0.011
235	0.075	0.037	0.015	0.010
255	0.053	0.022	0.011	0.005
280	0.033	0.013	0.008	0.000
305	0.021	0.003	0.006	0.000
330	0.014	0.001	0.004	0.000
355	0.010	0.002	0.000	0.000
380	0.007	0.000	0.001	0.000
410	0.004	0.000	0.000	0.000

Para comenzar a generar los primeros datos experimentales, se interpolaron los tiempos y fracciones de humedad libre de la Tabla 6.1 para obtener nueve tiempos específicos de trabajo que representaron las nueve fracciones de humedad libre requeridas, y

6.1. EXPERIMENTOS DE SECADO Y ADQUISICIÓN DE LA IMAGEN

así, obtener las imágenes sobre la evolución del encogimiento de los prismas cuadrangulares.

La Tabla 6.2 muestra los valores predichos de los tiempos de secado requeridos para alcanzar cierta fracción de humedad libre a cada unas de las temperaturas con las que se desea trabajar.

Tabla 6.2. Tiempos requeridos para alcanzar una fracción de humedad libre deseada en muestras de papa secadas a diferentes temperaturas.

ψ	t (min) a 50°C	t (min)a 60°C	t (min) a 70°C	t (min) a 80°C
0.90	12.6	9.9	9.0	8.1
0.80	26.3	21.1	17.9	15.4
0.70	40.9	32.4	27.4	24.2
0.60	57.3	45.5	38.0	32.9
0.50	76.3	60.4	49.9	43.7
0.40	99.4	78.8	64.8	56.0
0.30	128.3	103.5	83.6	71.8
0.20	165.5	136.5	107.7	92.5
0.10	216.8	184.1	143.7	120.9

Para obtener el tamaño de los prismas cuadrangulares de papa, se hizo uso de un cortador con cuchillas de acero inoxidable con aberturas cuadradas de 3/8 de pulgada. Se seleccionaron muestras regulares, las cuales se cortaron a su largo deseado de 8 cm. De esta manera, al emplear estas dimensiones se asegura que la transferencia de agua en el producto se lleve a cabo preferentemente en las dos direcciones de menor tamaño.

Se formaron nueve grupos de muestreo, representando cada una de las fracciones de humedad libre en las muestras (de 0.9 a 0.1), y cada grupo a su vez consiste de cinco prismas de papa. Se registraron los pesos de los grupos de muestreo en una balanza analítica. Este peso se identificó como m_{p0} .

Utilizando como base los tiempos de secado (Tabla 6.2), se colocaron los grupos de muestreo en un secador convectivo de túnel con bandejas perforadas, con una velocidad de secado de 2 m/s y la temperatura de experimentación programada, colocando las muestras separadas unas de otras. Una vez colocados los grupos de muestreo, se comenzó a cronometrar el tiempo calculado para el proceso de secado.

Transcurrido el tiempo de secado (t) para cada una de las fracciones de humedad libre requeridas, se retiraron los cinco prismas que conforman el grupo de muestreo y se pesaron nuevamente en la balanza analítica, registrando estos valores como m_{pt} .

6.1. EXPERIMENTOS DE SECADO Y ADQUISICIÓN DE LA IMAGEN

Se procedió a extraer una rebanada de aproximadamente un milímetro de espesor de la mitad del largo del prisma. Este corte se realizó con una navaja delgada, procurando no deformar la muestra debido a la presión ejercida en el momento del corte.

De este procedimiento se obtuvieron cinco rebanadas o láminas por cada fracción de humedad libre deseada (de 0.9 a 0.1) a cada temperatura, los remanentes de las mitades de prismas de papa fueron pesados juntos como grupo nuevamente, obteniendo con esto un peso denominado m_{pc} , y se devolvieron al secador hasta alcanzar un peso constante m_{pe} . La masa de agua perdida después del corte de la lámina hasta el equilibrio se calcula como:

$$\Delta m_w(c \rightarrow e) = m_{pc} - m_{pe} \quad (6.1)$$

Los nueve grupos de las tiras remanentes se llevaron a secar en un estufa a 105°C hasta que alcanzaron su peso constante, este último peso se registró como m_{pf} .

La siguiente secuencia de fórmulas utilizan los cuatro pesos obtenidos registrados durante el proceso de secado. Las operaciones descritas a continuación tienen como objetivo obtener el valor exacto de la fracción de humedad libre en el tiempo en que se extrajo el grupo de muestreo del secador.

La masa de agua perdida entre el inicio del proceso y el instante en que es extraída la muestra del secador para la extracción de la lámina, se calcula como:

$$\Delta m_w(0 \rightarrow t) = m_{p0} - m_{pt} \quad (6.2)$$

La masa de agua perdida entre el instante en que se alcanza el equilibrio en el secador y el instante en que se retira de la estufa es:

$$\Delta m_w(e \rightarrow f) = m_{pe} - m_{pf} \quad (6.3)$$

La masa de agua perdida por el producto cortado en el momento en que la muestra se extrae del secador es:

$$\Delta m_w(0 \rightarrow c) = \frac{m_{pc}}{m_{pt}} \cdot \Delta m_w(0 \rightarrow t) \quad (6.4)$$

Por lo tanto, las humedades del producto al inicio del proceso, después del corte son respectivamente,

$$X_0 = \frac{[\Delta m_w(0 \rightarrow c) + \Delta m_w(c \rightarrow e) + \Delta m_w(e \rightarrow f)]}{m_{pf}} \quad (6.5)$$

$$X_c = \frac{[\Delta m_w(c \rightarrow e) + \Delta m_w(e \rightarrow f)]}{m_{pf}} \quad (6.6)$$

$$X_e = \frac{\Delta m_w(e \rightarrow f)}{m_{pf}} \quad (6.7)$$

Dado que la masa de producto extraído de la estufa y de las porciones resultantes después del corte de la lámina tienen la misma humedad, estos últimos valores se pueden usar para calcular la fracción de humedad libre de las muestras en el momento de retirarlas del secador como

$$\Psi = \frac{X_c - X_e}{X_0 - X_e} \quad (6.8)$$

Se colocó cada lámina de papa sobre una hoja de papel de color azul y se tomó una fotografía con una línea de enfoque normal a la superficie sobre la que se encontraba la muestra (Nikon modelo COOLPIX L810, Japón). En la toma de cada fotografía se enfocó la muestra en el modo Macro, sin flash y con temporizador. Se procuró evitar que la fotografía presentará sombras o zonas que no pertenecieran al contorno de la muestra.

Junto a cada lámina de papa, se colocó de manera alineada y horizontal un objeto de referencia (una arandela circular de diámetro aproximado de 5.88 mm), para poder recuperar las dimensiones reales de las muestras y compensar las diferencias de enfoque.

Durante la toma de fotografías, se agregó un nuevo grupo de muestreo, el grupo que representa a la fracción de humedad libre igual a 1.0, es decir, se tomaron cinco fotografías de la manera anteriormente descrita de los prismas de papa recién cortados.

Una vez obtenidas las cinco imágenes de cada uno de los diez grupos, se procedió a recortar con la aplicación MS Paint un cuadrado que contuviera solamente la lámina de papa. Ésta imagen se redujo a tres colores utilizando una aplicación de Matlab R2010a. Estos colores se verán distribuidos ya sea, dos en el fondo y uno en la muestra, o viceversa.

Con las imágenes reducidas a tres colores, se eliminó el fondo de la muestra, permitiendo obtener en la nueva imagen la zona de color equivalente a la lámina de papa en un fondo completamente blanco.

Con ayuda de MS Paint, se borraron los píxeles desconectados y se rellenaron los espacios en blanco dentro del contorno de la muestra, obteniendo una imagen limpia y uniforme en el área de color para su posterior proceso. Las imágenes corregidas se

redujeron a dos colores para cuantificar el porcentaje de pixeles que corresponden al fondo y a la muestra.

Se registraron los pixeles del largo y ancho que tenían las imágenes reducidas a dos colores, y en la aplicación MS Paint, se abrieron las imágenes originales donde se dibujó una circunferencia sobre la arandela, procurando que el perímetro de la circunferencia trazada coincidiera con el contorno del objeto, el tamaño era el correcto cuando el número de pixeles del largo coincidían con los del ancho de la circunferencia sobrepuesta.

6.2. Análisis de imagen

Con los datos obtenidos en los dos apartados anteriores, se procedió a realizar una serie de cálculos que tienen por finalidad obtener el área de las láminas de papa deformadas en milímetros al cuadrado.

1. Con el diámetro del círculo sobrepuesto a la arandela se obtiene el área del círculo en pixeles de cada imagen de los grupos de muestreo.
2. Se calcula el área de la arandela en milímetros al cuadrado.
3. El área de la imagen reducida a dos colores se determina multiplicando el ancho por el largo de pixeles.
4. Para determinar el área en pixeles de la lámina de papa de cada imagen reducida a dos colores se multiplicaron las fracciones de color obtenidas en la sección anterior.
5. Utilizando una regla de tres, tomando como factor de conversión la equivalencia de las áreas en pixeles y milímetros al cuadrado de la arandela con el área de la lámina de papa en pixeles al cuadrado.
6. Empleando como área original el promedio de las áreas de las láminas de papa fresca (A_0), se graficará la relación entre las áreas de las láminas y esta área obtenidas durante el proceso de secado.

Una vez procesadas las imágenes de los grupos de muestreo de dos colores a escala de grises (Matlab R2010a), se procedió a determinar el contorno de cada una de éstas con

6.2. ANÁLISIS DE IMAGEN

una rutina de Matlab R2010a que permite obtener cuatrocientos puntos ubicados en el plano de pixeles que corresponden a su contorno.

Teniendo como referencia el diámetro en pixeles y en milímetros de la arandela, se aplicó a cada imagen una regla de tres simple que transforma los puntos del contorno de un plano en pixeles a otro en centímetros. Después se ejecutó una serie de rutinas (Matlab R2010a) que permiten orientar los cinco contornos correspondientes a cada fracción de humedad tomando el primero como referencia de alineación. El programa también genera cuatrocientos puntos que corresponden al contorno promedio de las cinco imágenes de cada fracción de humedad libre, llegando a tener al final de este paso, diez imágenes de los contornos promedio con tamaño de 3000×3000 pixeles. Para realizar posteriormente, el cálculo del área del contorno promedio, se consideró un lado de la imagen acotado a 3000 pixeles, generando el programa un factor de conversión que permite relacionar estos 3000 pixeles y el diámetro en pixeles y en centímetros de la arandela.

Con los datos generados en la sección anterior, se utilizó la siguiente ecuación para determinar el área del contorno promedio, y se normalizaron estos valores.

$$\text{Área del contorno promedio} = \text{Fracción de color} \times (\text{Factor de conversión})^2 \quad (6.9)$$

Los cuatrocientos puntos generados en la sección anterior para cada fracción de humedad libre de los contornos y contorno promedio fueron introducidos a una rutina de Matlab R2010a para determinar el valor de su perímetro, es decir, fueron utilizados para calcular las distancias que existen entre punto y punto a lo largo del contorno de las imágenes de las muestras deformadas de papa. Después de determinar el valor del perímetro del área original ($\Psi=1.0$), se normalizaron los valores de los restantes perímetros con respecto a éste.

El área específica es un parámetro que relaciona el área superficial de un cuerpo geométrico con su volumen, en el caso de este trabajo el área superficial es considerado el valor del perímetro de la muestra deformada multiplicado por el valor del largo del prisma cuadrangular, y el volumen el valor resultante de la multiplicación del área de una de las caras del prisma por el largo del mismo.

$$a = \frac{S}{V} = \frac{(PL + 2A)}{(AL)} \approx \frac{PL}{AL} = \frac{P}{A} \quad (6.10)$$

donde S es el área de superficie y V es el volumen de la muestra, y la equivalencia es debida a que se considera que la muestra no sufre un encogimiento apreciable sobre la

dimensión de mayor longitud. El área específica también puede ser normalizada (a/a_0), sustituyendo en la ecuación los valores del perímetro normalizado y área normalizada, considerándose también posible determinar el área específica del contorno promedio, con los correspondientes valores de perímetro y área normalizados del contorno promedio.

6.3. Modelación de las características de encojimiento y deformación

Los datos de área de sección transversal, perímetro y área específica de los prismas de papa se relacionaron con la fracción de humedad libre mediante los siguientes modelos:

$$\frac{A}{A_0} = \Delta_A + (1 - \Delta_A) \cdot \psi^{n_A} \quad (6.11)$$

$$\frac{P}{P_0} = \Delta_P + (1 - \Delta_P) \cdot \psi^{n_P} \quad (6.12)$$

$$\frac{a}{a_0} = 1 + \Delta_a \cdot e^{-k\psi^{n_a}} \quad (6.13)$$

Las ecuaciones (6.11-6.13) se ajustaron a los datos experimentales por medio de regresión no lineal. Al final del procedimiento de regresión se calcularon los intervalos de confianza al 95 % de los parámetros ajustados y el coeficiente de determinación generalizado. Todos los cálculos y procedimientos descritos se realizaron en el software Matlab R2012a (MathWorks Inc., Natick, MA, USA).

7. Resultados y discusión

7.1. Evolución del área de sección transversal normalizada (A/A_0)

En la Figura 7.1 se muestra el cambio de el área de sección transversal normalizada (A/A_0) con respecto al contenido de humedad obtenida a partir de cada uno de los perfiles originales. El análisis estadístico del modelo propuesto para describir esta respuesta se muestra en la Tabla 7.1. El área inicial de sección transversal de las muestras fue de 86.5779 mm^2 , ligeramente inferior al esperado de acuerdo a la abertura de las cuchillas usadas para cortar las muestras (0.9073 mm^2). Se puede apreciar que la tendencia de los datos no muestra el comportamiento típico de una línea recta, corroborándose con los valores del parámetro n_A , el cual toma valores menores a uno en todas las temperaturas. En todos los casos, el modelo propuesto logró una buena reproducción del comportamiento experimental ($R^2 > 0.91$). Sin embargo, se logra apreciar que el modelo se separa de los datos a partir de $\psi < 0.2$, posiblemente por el colapso repentino de la estructura del producto, el cual se analiza más adelante. El análisis de los intervalos de confianza demuestra que no hubo un efecto de la temperatura sobre esta respuesta, por lo que se agruparon y se realizó el ajuste de los datos considerando las cuatro temperaturas como un grupo homogéneo de datos. Se puede observar que el producto se encogió hasta alcanzar un valor final del 17.33 % sobre su área inicial.

7.1. EVOLUCIÓN DEL ÁREA DE SECCIÓN TRANSVERSAL NORMALIZADA (A/A_0)

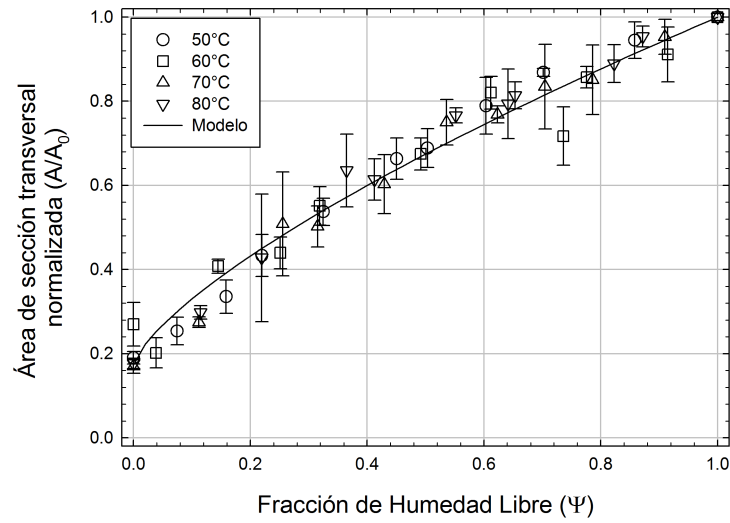


Figura 7.1. Área de la sección transversal normalizada (A/A_0) de los perfiles originales.

Tabla 7.1. Parámetros de regresión del modelo de área de sección transversal normalizada (A/A_0) usando los perfiles originales.

Temperatura (°C)	Parámetros ¹		R^2
	n_A	Δ_A	
50	0.6996 (0.6252/0.7741)	0.1539 (0.1111/0.1967)	0.9590
60	0.8365 (0.7046/0.9685)	0.2271 (0.1762/0.2780)	0.9199
70	0.7071 (0.6082/0.8060)	0.1508 (0.0922/0.2094)	0.9287
80	0.6623 (0.5686/0.7559)	0.1530 (0.0935/0.2126)	0.9286
50-80	0.7222 (0.6732/0.7712)	0.1733 (0.1469/0.1997)	0.9320

¹Los números en paréntesis indican los intervalos de confianza al 95 %.

Los datos del área de la sección transversal normalizada (A/A_0) obtenida a partir del promedio de los perfiles individuales permite observar un comportamiento prácticamente idéntico al descrito anteriormente (Figura 7.2, Tabla 7.2), pero se obtuvo un mejor ajuste ($R^2 > 0.95$) debido a que se suaviza la dispersión original.

7.1. EVOLUCIÓN DEL ÁREA DE SECCIÓN TRANSVERSAL NORMALIZADA (A/A_0)

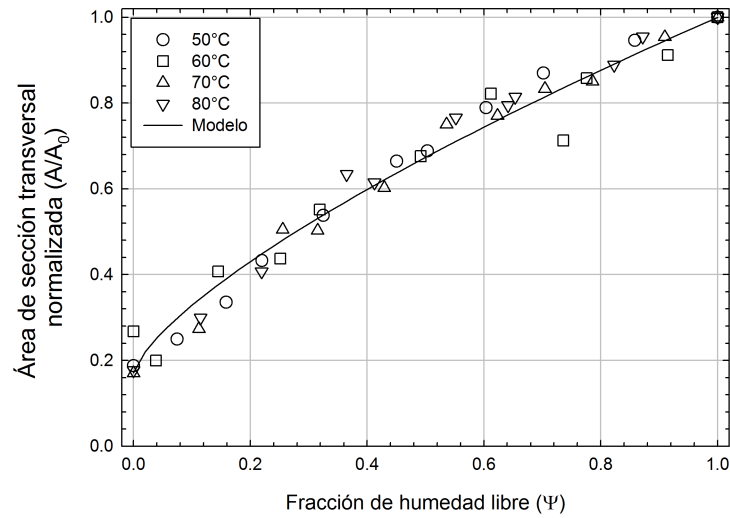


Figura 7.2. Área de la sección transversal normalizada (A/A_0) de los perfiles promedio.

Tabla 7.2. Parámetros de regresión del modelo de área de sección transversal normalizada (A/A_0) usando los perfiles promedio.

Temperatura (°C)	Parámetros ¹		R^2
	n_A	Δ_A	
50	0.6953 (0.5634/0.8272)	0.1503 (0.0735/0.2270)	0.9845
60	0.8339 (0.5535/1.1143)	0.2247 (0.1156/0.3337)	0.9567
70	0.7084 (0.5925/0.8244)	0.1503 (0.0817/0.2189)	0.9874
80	0.6680 (0.5419/0.7940)	0.1511 (0.0716/0.2306)	0.9835
50-80	0.7223 (0.6518/0.7929)	0.1711 (0.1330/0.2092)	0.9760

¹Los números en paréntesis indican los intervalos de confianza al 95 %.

La Figura 7.3 muestra la relación existente entre el área de sección transversal del perfil promedio y el área promedio de los perfiles originales. Si el área del perfil promedio fuera capaz de describir adecuadamente el promedio de las áreas de los perfiles individuales, entonces se esperaría una relación de la forma

$$y = x \quad (7.1)$$

De esta forma, se realizó un ajuste de línea recta ($y = mx + b$) para comprobar este resultado, el cual se muestra en la Tabla 7.3. A partir de los intervalos de confianza de los parámetros se observa que la pendiente y el intercepto del modelo de línea recta

7.1. EVOLUCIÓN DEL ÁREA DE SECCIÓN TRANSVERSAL NORMALIZADA (A/A_0)

no difieren significativamente de 1 y 0, respectivamente, con lo que se puede concluir que el uso de la metodología para la creación de un perfil promedio generado a partir de cada grupo de muestreo es adecuado para describir el encogimiento y deformación de los perfiles individuales de dicho grupo ($R^2 \approx 1$).

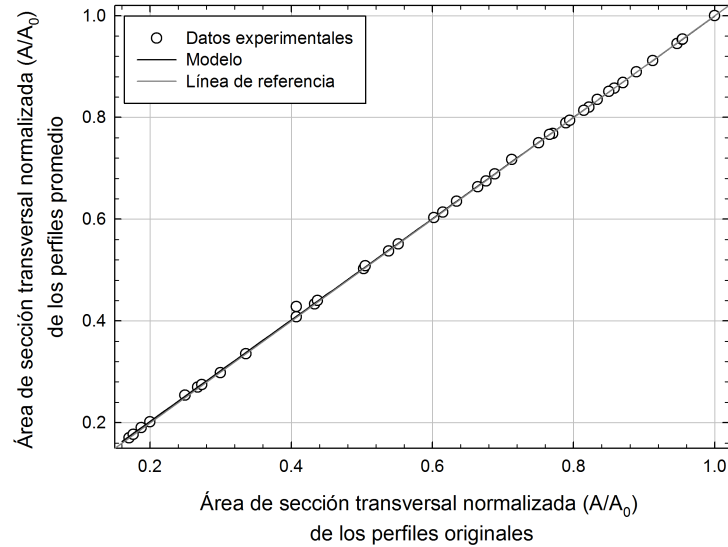


Figura 7.3. Relación entre las áreas de sección transversal normalizada (A/A_0) de los perfiles promedio contra los originales.

Tabla 7.3. Parámetros de regresión de la relación entre las áreas de sección transversal normalizada (A/A_0) de los perfiles originales contra los perfiles promedio.

Respuesta	Parámetros ¹		R^2
	m	b	
A/A_0	0.9959 (0.9921/0.9997)	0.0034 (-7.6430×10^{-4} /0.0060)	0.9998

¹Los números en paréntesis indican los intervalos de confianza al 95 %.

Si comparamos las Figuras 5.6, 7.1 y 7.2, podemos hallar que el modelo lineal produce una buena predicción del comportamiento de los datos, el ajuste fue de $E < 10\%$ y $R^2 > 0.95$ respectivamente, y se alcanzó un encogimiento $\geq 20\%$ para ambos.

En comparación de lo reportado por Hatamipour & Mowla (2002) y Panyawong & Devahastin (2007), su parámetro definido como volumen normalizado (V/V_0) puede ser considerado como equivalente al parámetro del área de sección transversal normalizada

7.2. EVOLUCIÓN DEL PERÍMETRO DE SECCIÓN TRANSVERSAL NORMALIZADO (P/P_0)

(A/A_0), aunque se visualizan dos diferencias significativas, en primera, se reportó un encogimiento final del $\leq 20\%$ sobre su área original, y en segunda, su forma de ajuste de la curva de modelación, coincidiendo con las curvas de encogimiento reportadas por estos últimos, mostrando claramente que no hay una tendencia completamente lineal sino hasta que avanzan las etapas del secado, esta diferencia es debido a que se implementó la metodología con análisis de imágenes propuesta en este trabajo, que nos permite saber el comportamiento real del encogimiento y deformación en las primeras etapas del secado, siendo claramente no lineal.

7.2. Evolución del perímetro de sección transversal normalizado (P/P_0)

En la Figura 7.4 se muestra la variación del perímetro de sección transversal normalizado (P/P_0) con respecto al contenido de humedad obtenida de cada uno de los perfiles individuales. El análisis estadístico del modelo propuesto para describir esta respuesta tiene una estructura idéntica al que se empleó para describir el área de sección transversal normalizada, y sus parámetros se muestran en la Tabla 7.4. El perímetro inicial de sección transversal de las muestras fue de 37.4430 mm, valor ligeramente inferior al esperado de acuerdo a la abertura de las cuchillas usadas para cortar las muestras (38.10 mm). Una explicación es la imperfección en la constitución de las muestras y una fuerza de corte no uniforme.

No hay evidencia de una desviación del comportamiento de línea recta, de acuerdo a los valores e intervalos de confianza del parámetro n_P en casi todas las temperaturas, excluyendo la temperatura de 60°C. El modelo propuesto logró una buena reproducción del comportamiento experimental ($R^2 > 0.86$). Una vez más, con el análisis de los intervalos de confianza se demuestra que no hubo un efecto de la temperatura sobre esta respuesta, por lo que se agruparon todos los datos experimentales como un grupo homogéneo y se realizó el ajuste de los datos. De forma general, se puede decir que las muestras tuvieron un perímetro final de alrededor del 63.9% de su valor inicial.

7.2. EVOLUCIÓN DEL PERÍMETRO DE SECCIÓN TRANSVERSAL NORMALIZADO (P/P_0)

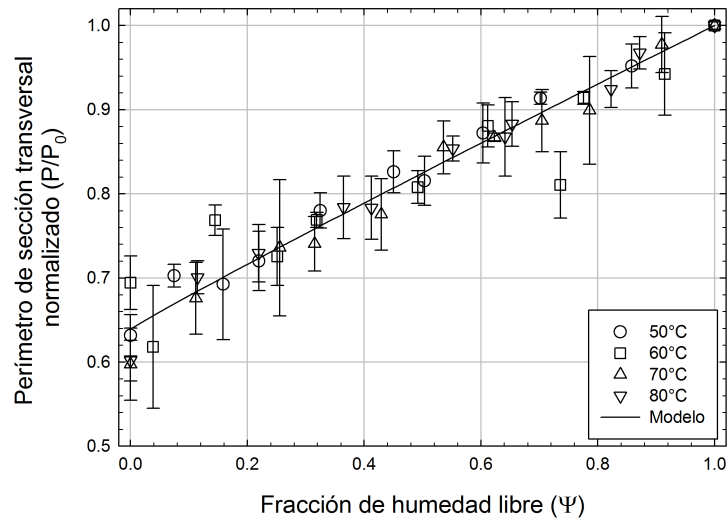


Figura 7.4. Perímetro de la sección transversal normalizado (P/P_0) de los perfiles originales.

Tabla 7.4. Parámetros de regresión del modelo del perímetro de sección transversal normalizado (P/P_0) usando los perfiles originales.

Temperatura (°C)	Parámetros ¹		R^2
	n_P	Δ_P	
50	0.8925 (0.7528/1.0323)	0.6395 (0.6147/0.6643)	0.9036
60	1.3131 (0.9416/1.6846)	0.6806 (0.6482/0.7130)	0.7254
70	0.8766 (0.7071/1.0461)	0.6050 (0.5691/0.6410)	0.8651
80	0.8278 (0.7162/0.9393)	0.6133 (0.5885/0.6382)	0.9271
50-80	0.9581 (0.8625/1.0537)	0.6390 (0.6233/0.6547)	0.8460

¹Los números en paréntesis indican los intervalos de confianza al 95 %.

Al generarse el perímetro de sección transversal normalizado (P/P_0) a partir del promedio de cada uno de los perfiles individuales, se puede observar un comportamiento casi idéntico al descrito anteriormente (Figura 7.5, Tabla 7.6), pero se obtuvo un mejor ajuste ($R^2 > 0.95$) debido a que se suaviza la dispersión original, pero las muestras tuvieron un perímetro final de alrededor del 58.19 % de su valor inicial utilizando la metodología propuesta.

7.2. EVOLUCIÓN DEL PERÍMETRO DE SECCIÓN TRANSVERSAL NORMALIZADO (P/P_0)

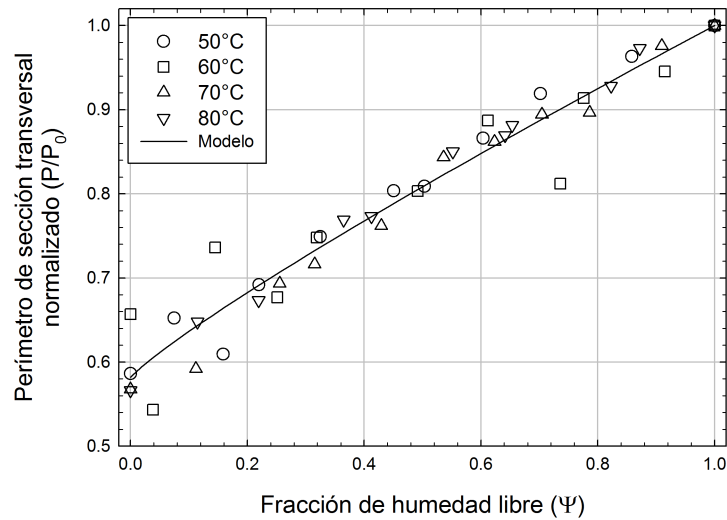


Figura 7.5. Perímetro de sección transversal normalizado (P/P_0) de los perfiles promedio.

Tabla 7.5. Parámetros de regresión del modelo del perímetro de sección transversal normalizado (P/P_0) usando los perfiles promedio.

Temperatura (°C)	Parámetros ¹		R^2
	n_P	Δ_P	
50	0.8398 (0.6245/1.0551)	0.5786 (0.5301/0.6271)	0.9726
60	1.0667 (0.4451/1.6882)	0.6188 (0.5331/0.7045)	0.8740
70	0.8581 (0.7133/1.0030)	0.5532 (0.5175/0.5889)	0.9873
80	0.7895 (0.6962/0.8827)	0.5635 (0.5387/0.5883)	0.9935
50-80	0.8847 (0.7603/1.0092)	0.5819 (0.5556/0.6081)	0.9520

¹Los números en paréntesis indican los intervalos de confianza al 95 %.

Es evidente si se analiza la Figura 7.6 y la Tabla 7.6, que la creación de un perfil promedio no conlleva a ser una reproducción fiel del perímetro del promedio de los cinco perfiles originales ($m > 1$ y $b \neq 0$), de tal forma que los datos provenientes de promediar los perfiles originales son siempre mayores al obtenido con el perfil promedio debido a que los bordes de la muestra son suavizados durante el proceso de ajuste de los cinco perfiles originales para crear un solo perfil.

Una vez más, si se realiza la comparación del trabajo de Hatamipour & Mowla (2002), el parámetro definido como diámetro normalizado $(D/D_0)^2$ puede ser conside-

7.2. EVOLUCIÓN DEL PERÍMETRO DE SECCIÓN TRANSVERSAL NORMALIZADO (P/P_0)

rado como equivalente al parámetro del perímetro de sección transversal normalizada (P/P_0), aunque se visualizan dos diferencias significativas, en primera, se reportó un encogimiento final del $< 20\%$ sobre su perímetro original, y en segunda, su forma de ajuste de la curva de modelación, esta diferencia es debido a que se implementó la metodología con análisis de imágenes propuesta en este trabajo, que nos permite saber el comportamiento real del encogimiento y deformación en las primeras etapas del secado, siendo claramente no lineal.

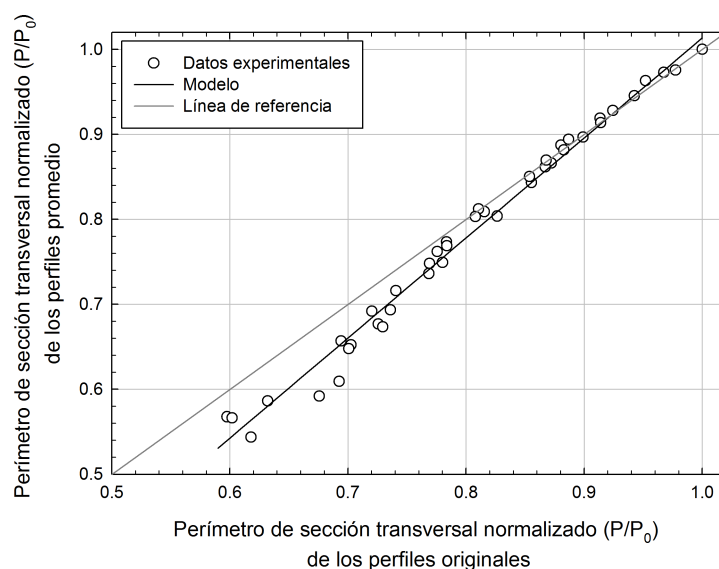


Figura 7.6. Relación entre los perímetros de la sección transversal normalizados (P/P_0) de los perfiles promedio contra los originales.

Tabla 7.6. Parámetros de regresión de la relación entre los perímetros de sección transversal normalizada (P/P_0) de los perfiles originales contra los perfiles promedio.

Respuesta	Parámetros ¹		R^2
	m	b	
P/P_0	1.1774 (1.1376/1.2172)	-0.1639 (-0.1967/-0.1310)	0.9883

¹Los números en paréntesis indican los intervalos de confianza al 95 %.

7.3. Evolución del área específica de sección transversal normalizada (a/a_0)

En este caso, el valor inicial de esta respuesta fue $a_0 = 0.4326 \text{ mm}^{-1}$. El área específica de sección transversal normalizada (a/a_0) de los perfiles originales incrementa al reducirse el contenido de humedad de la muestra (Figura 7.7), debido a que el área de sección transversal normalizada A/A_0 (equivalente al volumen normalizado del prisma, V/V_0) disminuye más rápido que el perímetro transversal normalizado P/P_0 (equivalente al área superficial del prisma, A_{sup}/A_{sup0}) durante el secado de la muestra, haciendo que aumente el cociente de la ecuación 7.2. Los parámetros del modelo propuesto para describir esta variable se muestran en la Tabla 7.7, lográndose un buen ajuste de los datos experimentales ($R^2 = 0.9226$). Para el caso del producto estudiado, el valor de la respuesta a/a_0 aumentó desde 1 hasta 3.2641.

$$\frac{a}{a_0} = \frac{A_{sup}/A_{sup0}}{V/V_0} = \frac{P/P_0}{A/A_0} \quad (7.2)$$

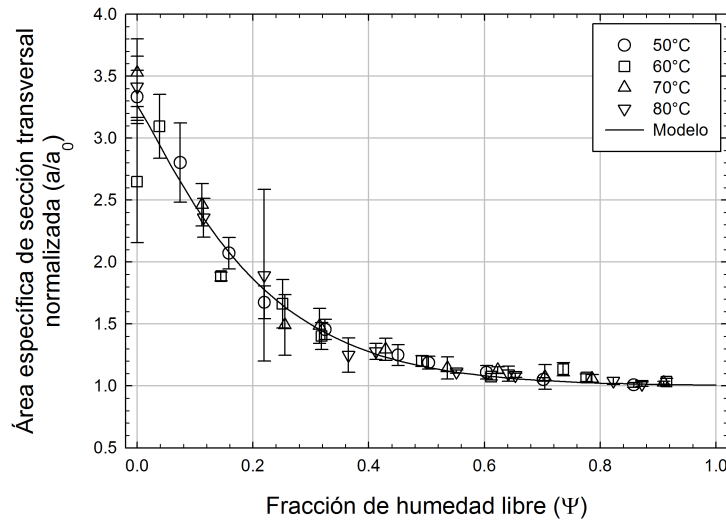


Figura 7.7. Área específica de sección transversal normalizada (a/a_0) de los perfiles originales.

7.3. EVOLUCIÓN DEL ÁREA ESPECÍFICA DE SECCIÓN TRANSVERSAL NORMALIZADA (A/A_0)

Tabla 7.7. Parámetros de regresión del modelo del área específica normalizada (a/a_0) usando los perfiles originales.

Temperatura (°C)	Parámetros ¹			R^2
	k_a	n_a	Δ_a	
50	6.0474 (4.6960/7.3989)	1.1249 (0.9712/1.2787)	2.3613 (2.2357/2.4875)	0.9678
60	7.1606 (2.5399/11.7813)	1.3470 (0.8675/1.8265)	1.8807 (1.6863/2.0750)	0.8869
70	5.5564 (4.3542/6.7570)	1.0194 (0.8663/1.1724)	2.5384 (2.4070/2.6698)	0.9668
80	5.7387 (3.6693/7.8080)	1.0862 (0.8300/1.3425)	2.4098 (2.2032/2.6163)	0.9173
50-80	5.8974 (4.8650/6.9297)	1.1257 (1.0002/1.2512)	2.2641 (2.1730/2.3553)	0.9226

¹Los números en paréntesis indican los intervalos de confianza al 95 %

Con el análisis de los datos experimentales de los perfiles promedio se puede observar en la Figura 7.8 el mismo comportamiento de los datos de los perfiles originales, cumpliéndose una vez más lo aseverado en la ecuación 7.2. Si se comparan los parámetros obtenidos en la Tablas 7.8 y 7.7 del incremento de la respuesta (Δ_a) y ajuste del modelo (R^2), se puede observar una diferencia evidente en el valor de a/a_0 de 1 hasta 3.0537 para los perfiles promedio y el valor calculado para los perfiles originales; es decir, una diferencia predicha de encogimiento del 21 % entre ambos. Esta variación puede explicarse al saber que el uso de una metodología donde se generan perfiles promedio disminuye el valor del perímetro al suavizarse la rugosidad original del contorno promedio generado, al mismo tiempo que reduce la dispersión de los datos originales, lográndose un mejor ajuste $R^2 = 0.9667$.

Un trabajo de investigación que empleó el parámetro de área específica normalizada (a/a_0), y que obtuvo valores de incremento similares al obtenidos en este trabajo ($3.2641 m^{-1}$), fue Ratti (1994), con un valor final de $3.05 m^{-1}$ en discos de papa (4×0.9 cm), mientras que para cilindros de papa (1×5 cm) reportó un valor final de $2.075 m^{-1}$ (5.8), siendo de nuestro interés este último valor que indica que los cilindros de papa, por sus dimensiones se secaron a menor velocidad que los discos de papa, que pueden ser considerados como placa finitas con transporte de masa solamente en la dirección axial.

7.3. EVOLUCIÓN DEL ÁREA ESPECÍFICA DE SECCIÓN TRANSVERSAL NORMALIZADA (A/A_0)

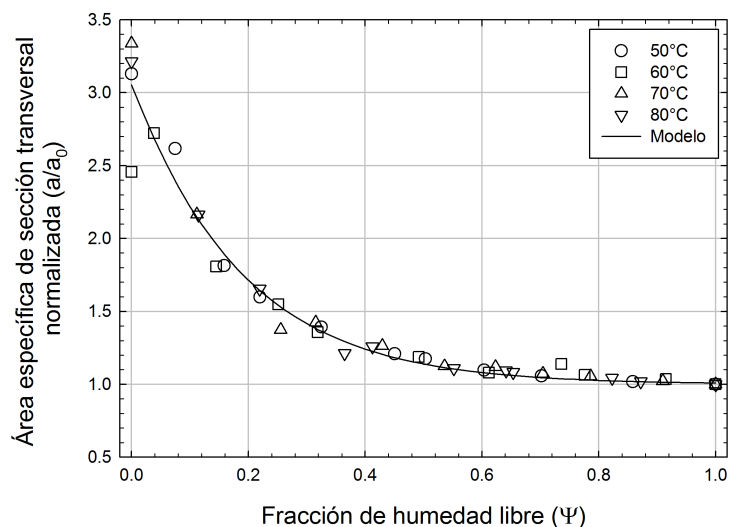


Figura 7.8. Área específica de sección transversal normalizada (a/a_0) de los perfiles promedio.

Tabla 7.8. Parámetros de regresión del modelo del área específica normalizada (a/a_0) usando los perfiles promedio.

Temperatura (°C)	Parámetros ¹			R^2
	k_a	n_a	Δ_a	
50	5.9636 (4.0395/7.8876)	1.0651 (0.8520/1.2783)	2.1616 (1.9943/2.3289)	0.9914
60	6.2887 (0.6573/11.9201)	1.2734 (0.5923/1.9545)	1.6159 (1.3512/1.8806)	0.9627
70	5.0040 (3.8575/6.1505)	0.8734 (0.7167/1.0301)	2.3430 (2.2065/2.4795)	0.9944
80	5.4782 (4.6654/6.2910)	0.9830 (0.8821/1.0840)	2.2154 (2.1369/2.2938)	0.9980
50-80	5.4464 (4.1563/6.7366)	1.0196 (0.8551/1.1840)	2.0537 (1.9330/2.1743)	0.9667

¹Los números en paréntesis indican los intervalos de confianza al 95 %

Al comparar los perfiles originales y sus promedios (Figura 7.9), se confirma que a medida que el producto se seca se amplía la separación existente entre los datos, obteniéndose una pendiente e interceptos significativamente diferentes de 1 y 0 ($m < 1$ y $b > 0$, Tabla 7.9).

7.4. ENCOGIMIENTO Y DEFORMACIÓN DE SECCIÓN TRANSVERSAL OBTENIDA A PARTIR DEL PRISMA CUADRANGULAR DE PAPA

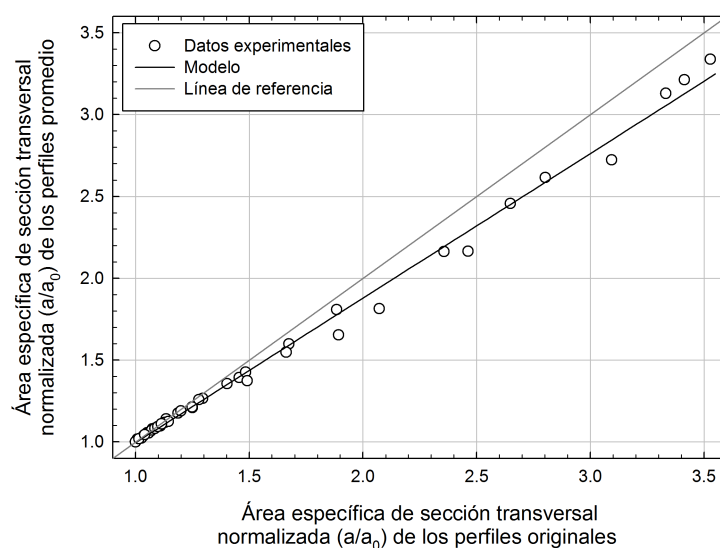


Figura 7.9. Relación entre las áreas específicas de la sección transversal normalizadas (a/a_0) de los perfiles promedio contra los originales.

Tabla 7.9. Parámetros de regresión de la relación entre las áreas específicas de sección transversal normalizadas (a/a_0) de los perfiles originales contra los perfiles promedio.

Respuesta	Parámetros ¹		R^2
	m	b	
a/a_0	0.8835 (0.8633/0.9037)	0.1116 (0.0769/0.1463)	0.9946

¹Los números en paréntesis indican los intervalos de confianza al 95 %

7.4. Encogimiento y deformación de sección transversal obtenida a partir del prisma cuadrangular de papa

La Figura 7.10 muestra un seguimiento de los cambios de dimensión y geometría como resultado del secado convectivo a la que fueron sometidos los prismas de papa. Como se puede observar e inferir el encogimiento es paulatino y casi proporcional conforme va disminuyendo su contenido de humedad, no existiendo evidencia aparente

7.4. ENCOGIMIENTO Y DEFORMACIÓN DE SECCIÓN TRANSVERSAL OBTENIDA A PARTIR DEL PRISMA CUADRANGULAR DE PAPA

de deformación hasta las últimas etapas del secado, donde a partir de un valor de $\psi \leq 0.2$ se va dando el fenómeno de deformación paulatinamente, primero por las aristas de la geometría de la muestra y después el centro de cada lado tiene una curvatura cóncava hasta lograr la completa deformación del producto. Este comportamiento ha sido anteriormente descrito en la Figuras 7.1 y 7.2, donde se puede observar en a partir que comienza el secado hasta $\psi \leq 0.2$, existe una relación entre la cantidad de agua que migra del producto con el valor del encogimiento, pero cuando comienza la deformación de la muestra comienza un comportamiento de los datos experimentales que se desvía el modelo de la tendencia original de la curva de ajuste.

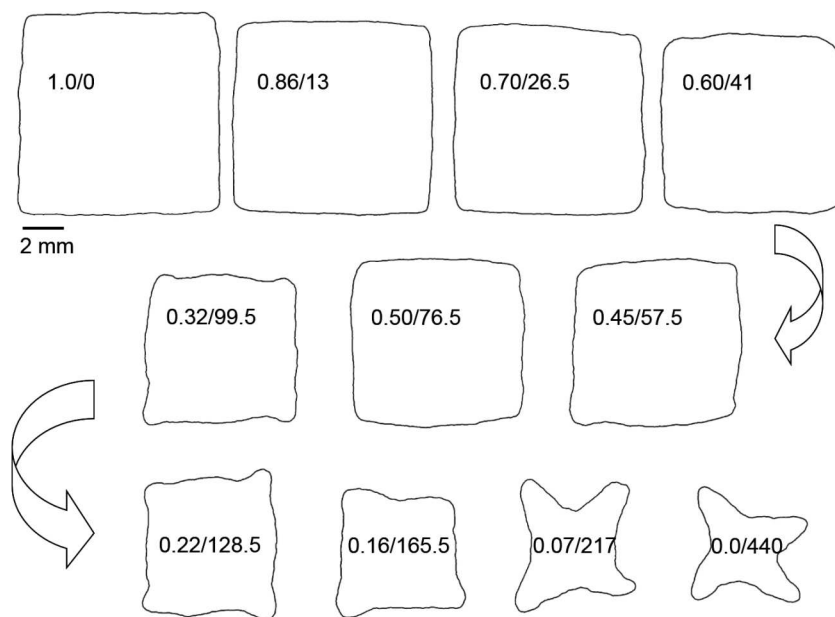


Figura 7.10. Mapa de encogimiento-deformación de los prismas de papa secados a una temperatura de 50°C.

7.4. ENCOGIMIENTO Y DEFORMACIÓN DE SECCIÓN TRANSVERSAL OBTENIDA A PARTIR DEL PRISMA CUADRANGULAR DE PAPA

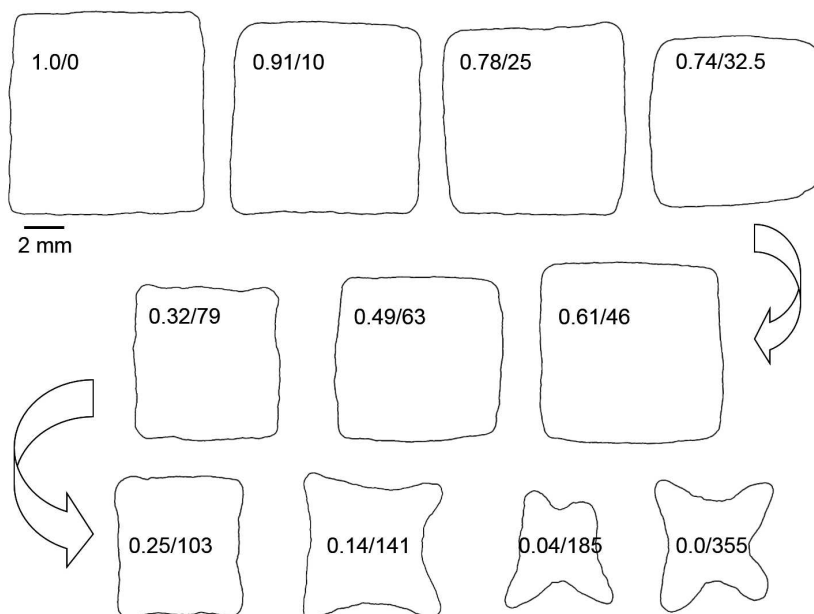


Figura 7.11. Mapa de encogimiento-deformación de los prismas de papa secados a una temperatura de 60°C.



Figura 7.12. Mapa de encogimiento-deformación de los prismas de papa secados a una temperatura de 70°C.

7.4. ENCOGIMIENTO Y DEFORMACIÓN DE SECCIÓN TRANSVERSAL OBTENIDA A PARTIR DEL PRISMA CUADRANGULAR DE PAPA

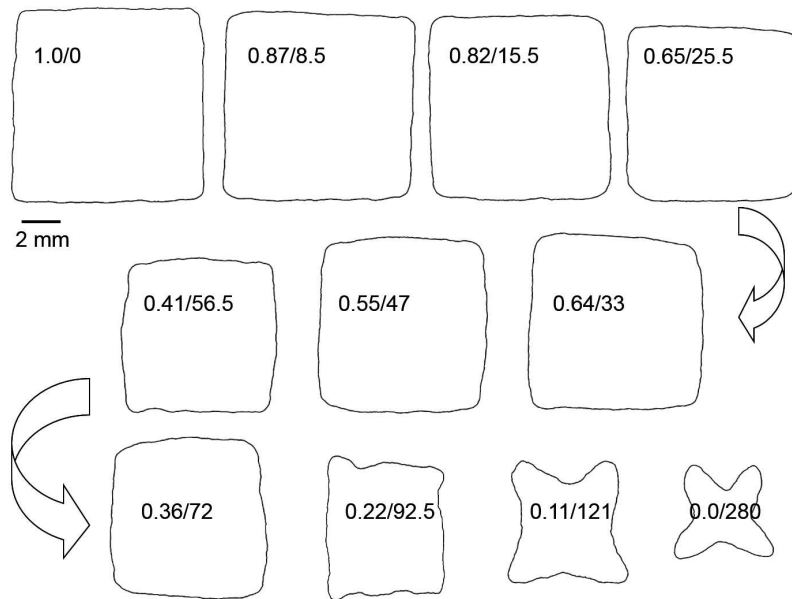


Figura 7.13. Mapa de encogimiento-deformación de los prismas de papa secados a una temperatura de 80°C.

8. Conclusiones

La metodología propuesta permitió caracterizar el comportamiento de deformación y encogimiento del alimento estudiado en las direcciones en las que ocurre el transporte de masa, identificándose que la deformación del producto no ocurre desde el inicio del proceso de secado. Adicionalmente, se demostró que el cambio de las características morfológicas del sistema estudiado no muestran un comportamiento lineal con el contenido de humedad, siendo independientes de la temperatura a la que se lleva a cabo el proceso.

Bibliografía

- Aguilera, J. M. 1992. *Physical chemistry of foods*. New York: Marcel Dekker Inc.
- Aguilera, J. M. 2003. Drying and Dried Products Under the Microscope. *Food Science and Technology International*, **9**, 137–143.
- Campos-Mendiola, R., Sánchez, H. Hernandez, Chanona-Pérez, J.J, Alamilla-Beltrán, L., Jiménez-Aparicio, A, Fito, P., & Gutiérrez-López, G.F. 2007. Non-isotropic shrinkage and interfaces during convective drying of potato slabs within the frame of the systematic approach to food engineering systems (SAFES) methodology. *Journal of Food Engineering*, **83**, 285–292.
- Geankoplis, C. J. 1998. *Procesos de transporte y operaciones unitarias*. CECSA.
- Gumeta-Chávez, C., Chanona-Pérez, J. J., Mendoza-Pérez, J.A., Terrés-Rojas, E., Garibay-Febles, V., & Gutiérrez-López, G.F. 2011. Shrinkage and deformation of agave atrovirens karw tissue during convective drying: influence of structural arrangements. *Drying Technology*, **29**, 612–623.
- Hatamipour, M. S., & Mowla, D. 2002. Shrinkage of carrots during drying in a inert medium fluidized bed. *Journal of Food Engineering*, **55**, 247–252.
- Hayashi, H. 1989. Drying Technologies of Foods- Their History and Future. *Drying Technology: An International Journal*, **7**.
- Khalloufi, S., Almeida-Rivera, C., & Bongers, P. 2009. A theoretical model and its experimental validation to predict the porosity as a function of shrinkage and collapse phenomena during drying. *Food Research International*, **42**, 1122–1130.
- Koc, 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*, **85**, 340–349.
- Mayor, L., & Sereno, A. M. 2004. Modelling shrinkage during convective drying of food materials: a review. *Journal of Food Engineering*, **61**, 373–386.
- McLaughlin, C. P., & Magee, T. R. A. 1998. The Effect Of Shrinkage During Drying Of Potato Spheres And The Effect Of Drying Temperature On Vitamin C Retention.

- Trans IChemE*, **76**, 138–142.
- Ortiz-García-Carrasco, B. 2013. *Estimación de la difusividad efectiva de agua durante el secado convectivo de papa considerando el encogimiento y deformación de la macroestructura*. M.Phil. thesis, Benemérita Universidad Autónoma de Puebla.
- Panyawong, S., & Devahastin, S. 2007. Determination of deformation of a food product undergoing different drying methods and conditions via evolution of a shape factor. *Journal of Food Engineering*, **78**, 151–161.
- Perry, R.H., & Green, D.W. 2010. *Manual del Ingeniero Químico. Volumen II*. McGraw-Hill.
- Rahman, M. S., Perera, C. O., Chen, X. D., Driscoll, R. H., & Potluri, P.L. 1996. Density, Shrinkage and Porosity of Calamari Mantle Meat during Air Drying in a Cabinet Dryer as a Function of Water Content. *Journal of Food Engineering*, **30**, 135–145.
- Ratti, C. 1994. Shrinkage During Drying of Foodstuffs. *Journal of Food Engineering*, **23**, 91–105.
- Ruiz-López, I.I., & García-Alvarado, M.A. 2007. Analytical solution for food-drying kinetics considering shrinkage and variable diffusivity. *Journal of Food Engineering*, **79**, 208–216.
- Ruiz-López, I.I., Ruiz-Espinosa, H., Arellanes-Lozada, P., Bárcenas-Pozos, M.E., & García-Alvarado, M.A. 2012. Analytical model for variable moisture diffusivity estimation and drying simulation of shrinkable food products. *Journal of Food Engineering*, **108**, 427–435.
- Yadollahinia, A., Latifi, A., & Mahdavi, R. 2009. New method for determination of potato slice shrinkage during drying. *Computers and Electronics in Agriculture*, **65**, 268–274.
- Yan, Z., Sousa-Gallagher, M. J., & Oliveira, F. A. R. 2008. Shrinkage and porosity of banana, pineapple and mango slices during. *Journal of Food Engineering*, **84**, 430–440.
- Zogzas, N. P., Maroulis, Z. B., & Marinos-Kouris, D. 1994. Densities, shrinkage and porosity of some vegetables during air drying. *Drying Technology: An International Journal*, **12**, 1653–1666.