

**TESIS PARA OBTENER EL GRADO DE: DOCTOR EN
CIENCIAS EN ALIMENTOS**

**DINÁMICA DE LA MORFOLOGÍA
DE ALIMENTOS SOMETIDOS A
SECADO CONVECTIVO**

9 de febrero de 2018

ÍNDICE

ÍNDICE DE FIGURAS	VII
ÍNDICE DE TABLAS	VIII
NOMENCLATURA	XIV
INTRODUCCIÓN	1
I ANTECEDENTES	3
1.1 Secado de alimentos	3
1.1.1 Generalidades	3
1.1.2 Principales cambios físicos en el alimento	7
1.1.2.1 Encogimiento	7
1.1.2.2 Deformación	10
1.1.3 Secado convectivo	12
1.2 Difusividad	14
1.3 Modelación y simulación del proceso de secado en alimentos	19
1.4 Visión por computadora (VC)	27
1.4.1 Adquisición de Imagen	31
1.4.2 Análisis y procesamiento de la imagen	34
1.5 Determinación de cambios estructurales en alimentos mediante vi- sión por computadora (VC)	39
II JUSTIFICACIÓN	51
III OBJETIVOS	53
3.1 Objetivo general	53
3.2 Objetivos específicos	53

IV MATERIALES Y MÉTODOS	54
4.1 Materia prima	54
4.2 Preparación de las muestras	54
4.3 Experimentos de secado	54
4.3.1 Adquisición y análisis de imagen	57
4.4 Modelado de las características de encogimiento	58
4.5 Comportamiento encogimiento-deformación promedio	61
4.6 Modelación de datos de secado	62
4.6.1 Solución a los modelos de secado	65
4.6.2 Estimación de las mallas inicial y final	69
4.6.3 Actualización de la forma de la malla	71
4.7 Estimación de la difusividad de agua y simulación del secado	73
4.7.1 Método de las pendientes modificadas	73
4.7.2 Método de regresión lineal	73
4.7.3 Modelamiento del secado considerando encogimiento del pro- ducto	74
4.7.4 Simulación del secado considerando encogimiento y deforma- ción del producto	75
4.8 Análisis de datos	75
V RESULTADOS Y DISCUSIÓN	77
5.1 Características de encogimiento en productos	77
5.2 Características de la deformación en muestras secas experimentales. .	84
5.3 Estimación de la difusividad de agua.	94
5.4 Simulación del proceso de secado	98
VI CONCLUSIONES	107
Bibliografía	108

ÍNDICE DE FIGURAS

1.1	Típica curva de velocidad de secado, condiciones de secado constantes.	6
1.2	Criterios para seleccionar un secador.	13
1.3	Clasificación de diferentes tipos de secadores	14
1.4	Formas iniciales y finales de productos secos (de Izquierda a Derecha: cuartos de cilindro, medio cilindro anular, medio cilindro y prisma rectangular).	19
1.5	Perfiles de humedad predichos por el modelo de encogimiento-deformación en tiras de papa secas. Los números de abajo de cada grafica representan la fraccion de humedad libre promedio (Ψ) / tiempo de secado adimensional (τ) / Área transversal normalizada (A/A_0).	26
1.6	Analogía entre sistemas biológicos y visión por computadora	28
1.7	Niveles de procesamiento de imagen.	29
1.8	Componentes de visión por computadora.	32
1.9	Esquema de un proceso de análisis de imagen.	32
1.10	Diferentes niveles de procesamiento de imagen.	35
1.11	Segmentación basada en umbralización(I), frontera (II) y regiones (III). 36	
1.12	Clasificación de representación de forma en 2D y técnicas de descripción.	37
1.13	Secado de cubos de zanahoria sometidos a secado al vacio y vapor sobrecalentado a baja presión a temperatura de 80 °C.	40
1.14	Diagrama de secador experimental e imagen lateral de placa de papa implementados en la metodología SAFES.	42
1.15	Rebanadas de piña y objeto de referencia empleados en el trabajo de Yan <i>et al.</i> (2008)	43

1.16	Sistema de adquisición de imagen (I) y procesamiento de imagen en muestras de melón (II)	43
1.17	Esquema de secado experimental y Diagrama de proyección del diámetro de la rebanada perpendicular y paralela a la dirección del flujo de aire.	45
1.18	Diagrama del secador experimental convectivo (I) y galería de imágenes de discos de <i>Agave</i> como una función del tiempo de secado (II).	46
1.19	Esquema de un aparato de secado, sensores y equipos de formación de imágenes con vista en sección transversal de la región de obtención de imágenes.	48
1.20	Pasos para el análisis de imagen usados para determinar deformación: (a) imagen original, (b) imagen simplificada con tres grupos de color, (c) imagen en escala de grises después de remover los grupos de color del fondo y (d) contorno del producto. Imágenes correspondientes a una rebanada de tira de papa seca en equilibrio a 50°C (440 min). La forma del contorno inicial corresponde a un cuadrado.	49
1.21	Efecto del contenido de humedad sobre el área transversal relativa de tiras de papa secas.	49
1.22	Deformación del contorno promedio de rebanadas de tiras de papa seca (80°C). Los números internos representan la fracción de humedad libre alcanzada en el producto/tiempo de secado transcurrido (min).	50
4.1	Matrices alimenticias y herramientas de corte empleadas: A=Camote; B=SMG; C=Mortadela; D= Papaya; E=Cortadora de vegetales; F=Perforador de corcho No. 8.	55
4.2	Vista esquemática de las geométricas empleadas y características relevantes.	56
4.3	Montaje empleado para obtener cinéticas de secado.	57
4.4	Sistema de visión por computadora para adquisición de imagen: (1) muestra y objeto de referencia, (2) sistema de iluminación, (3) cámara digital y (4) software y hardware.	59

4.5	Pasos del análisis de imagen usados para determinar la deformación del producto. En las imágenes se presenta la imagen original (a), agrupamiento de colores en la imagen (b), imagen sin fondo (c) e imagen en escala de grises(d).	60
4.6	Pasos para determinar un patrón representativo de la deformación del producto: (a) original, (b) alineada y (c) contornos promedio. Los gráficos corresponden a contornos de muestras de mortadela frescas y secas en equilibrio a 70°C.	63
4.7	Combinación de malla geométrica regular (a) y contorno de producto experimental (b) para producir una malla geométrica deformada inicial y final (c).	71
5.1	Efecto del contenido de humedad sobre el área transversal normalizada en muestras seleccionadas.	79
5.2	Efecto del contenido de humedad sobre el perímetro normalizado en muestras seleccionadas.	80
5.3	Efecto del contenido de humedad sobre área específica normalizada en muestras seleccionadas.	81
5.4	Deformación final de cortes transversales de muestras secas.	87
5.5	Mapa morfológico promedio de muestras secas de camote. Los números en la figura representan la fracción de humedad libre ajustada contra el tiempo de secado alcanzado (min).	88
5.6	Mapa morfológico promedio de muestras secas de SMG. Los números en la figura representan la fracción de humedad libre ajustada contra el tiempo de secado alcanzado (min).	89
5.7	Mapa morfológico promedio de muestras secas de mortadela. Los números en la figura representan la fracción de humedad libre ajustada contra el tiempo de secado alcanzado (min).	90
5.8	Mapa morfológico promedio de muestras secas de papaya. Los números en la figura representan la fracción de humedad libre ajustada contra el tiempo de secado alcanzado (min).	91
5.9	Efecto del contenido de humedad sobre la redondez relativa y compactibilidad normalizada de muestras secas de camote y mortadela.	92

5.10	Efecto del contenido de humedad sobre la redondez relativa y compactibilidad normalizada de muestras secas de SMG y papaya.	92
5.11	Curvas experimentales (figuras) y simuladas (líneas) de muestras de camote a diferentes temperaturas en representación lineal y semilogarítmica.	95
5.12	Curvas experimentales (figuras) y simuladas (líneas) de muestras de SMG a diferentes temperaturas en representación lineal y semilogarítmica. PG= prismas de gel; MCG= medios cilindros de gel; MCP= medios cilindros de papaya; CCG= cuartos de cilindro de gel.	96
5.13	Curvas experimentales (figuras) y simuladas (líneas) de muestras de mortadela a diferentes temperaturas en representación lineal y semilogarítmica.	96
5.14	Curvas experimentales (figuras) y simuladas (líneas) de muestras de papaya a diferentes temperaturas en representación lineal y semilogarítmica. PP= prismas de papaya; MCP= medios cilindros de papaya; CCP= cuartos de cilindro de papaya.	97
5.15	Curva de Arrhenius de las difusividades de agua de muestras de camote y mortadela.	99
5.16	Efecto del contenido de humedad sobre el área transversal normalizada de SMG y papaya considerando encogimiento y/o deformación.	100
5.17	Perfiles de humedad predicha en prismas de gel considerando cambio de forma. La escala de ejes se refiere a las dimensiones del producto en centímetros. El número de cada gráfico representa la fracción de humedad libre (Ψ)/tiempo de secado (t , min)/área transversal normalizada (A/A_0).	101
5.18	Perfiles de humedad predicha en medios de cilindro de gel considerando cambio de forma. La escala de ejes se refiere a las dimensiones del producto en centímetros. El número de cada gráfico representa la fracción de humedad libre (Ψ)/tiempo de secado (t , min)/área transversal normalizada (A/A_0).	102

5.19 Perfiles de humedad predicha en cuartos de cilindro de gel considerando cambio de forma. La escala de ejes se refiere a las dimensiones del producto en centímetros. El número de cada gráfico representa la fracción de humedad libre (Ψ)/tiempo de secado (t , min)/área transversal normalizada (A/A_0). 103

5.20 Curvas experimentales (figuras) y simuladas (líneas) de muestras de SMG a diferentes temperaturas en representación lineal y semilogarítmica. PG= prismas de gel; MCG= medios cilindros de gel; MCP= medios cilindros de papaya; CCG= cuartos de cilindro de gel.. . . . 106

ÍNDICE DE TABLAS

1.1	Correlaciones para el cálculo del encogimiento de diversos alimentos	9
1.2	Índices de forma empleados en análisis de imagen.	11
1.3	Modelos de difusión empleados para diversas geometrías durante secado convectivo	18
1.4	Modelos empíricos lineales para describir el encogimiento.	22
1.5	Modelos empíricos no lineales para describir el encogimiento.	23
1.6	Aplicaciones de la visión por computadora en diferentes áreas.	30
1.7	Beneficios e inconvenientes del sistema de visión por computadora.	31
4.1	Geometrías y dimensiones establecidas durante la preparación de muestras.	55
4.2	Condiciones de secado: temperatura, tiempo y humedad inicial de muestras.	58
5.1	Valores iniciales de área transversal, perímetro y área específica de muestras experimentales.	78
5.3	Parámetros de regresión para los modelos que describen el encogimiento de muestras seleccionadas.	82
5.5	Grado de encogimiento de alimentos sometidos a secado convectivo	85
5.6	Difusividades de agua estimadas con y sin encogimiento (E) en muestras secas experimentales	95
5.7	Parámetros estimados que ajustan el comportamiento de la velocidad de encogimiento.	100
5.8	Estimación de difusividades de agua de SMG mediante simulación del proceso de secado.	106

NOMENCLATURA

Letras romanas

c	Celda de malla
e	Vector básico del sistema de coordenadas ortogonales
n	Vector unitario normal
T	Variable de separación
A	Área, Área transversal del producto (m^2)
a	Área específica (m^2)
A_c	Área del círculo mínimo que rodea el contorno del producto (m^2)
a_{10}, a_{11}, a_{12}	Coefficientes de interpolación en la I-ésima celda de malla
B	Número de vértices en el contorno del producto
Bi_m	Número Biot para transferencia de masa (adimensional)
C	Compactibilidad o coeficiente isoperimétrico (factor de forma, adimensional)
c	Concentración volumétrica de sólidos secos ($kg \text{ sólidos secos} \cdot m^{-3}$ de producto)
D	Difusividad efectiva del agua en el alimento ($m^2 \cdot s^{-1}$)
d	Densidad (m)
D_R	Dimensión de encogimiento (volumen, área, grosor)
E	Suma de coordenadas de nodos que pertenecen a la función de interpolación de límites
f	Función de interpolación

g	Función de conectividad
H	Humedad absoluta del aire de secado ($\text{kg agua} \cdot \text{kg aire seco}^{-1}$)
h	Coefficiente de transferencia de masa externa ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)
I_1, I_2	Integrales usadas para evaluar el contenido de humedad media
K	Relación de partición de agua entre la fase sólida y gaseosa
k	Constantes de modelos
k, n	Parámetros que determinan la velocidad de encogimiento del producto
L	Grosor, longitud (m)
L_1, L_2	Primera y segunda coordenada baricéntrica
M	Modelo de malla
m	Masa (kg)
MR	Relación de humedad (adimensional)
N	Número de vértices en la malla del producto
n	Constante de potencia (adimensional)
N_{1i}, N_{2i}	Número de elementos en un anillo y dos anillos
P	Perímetro del contorno del producto (m)
r	Redondez
S	Superficie del producto (m^2)
s	Parámetros que controlan el acortamiento de distancia final entre vértices
T	Número de triángulos en la malla del producto
t	Tiempo de secado (s)

u	Contenido de humedad ($\text{kg agua} \cdot \text{kg sólidos secos}^{-1}$)
V	Volumen (m^3)
v	Volumen humedo del aire seco ($\text{m}^3 \text{ aire humedo} / \text{kg aire seco}$)
w	Función de ponderación
X, u	Contenido de humedad base seca ($\text{kg agua} / \text{kg sólidos secos}$)
x, y	Variable, Coordenadas rectangulares
Xv	Fracción volumen de agua (volumen de agua/volumen total)
a_I	Vector de coeficientes de interpolación en la I-ésima celda de malla
D	Vector de derivadas desconocidas
J	Matriz que contiene coordenadas de una celda de malla dada
S	Matriz de distancias ponderadas entre vértices
v	Vértice de malla ($i=1,\dots,N$)
C	Concentración de sustancias
d	Diámetro (m)
Ea	Energía de activación ($\text{J} \cdot \text{mol}^{-1}$)
M	Fracción masa ($\text{kg} \cdot \text{kg}^{-1}$)
N	Número de puntos en el contorno del producto
P	Proporción
P	Variable de separación
R	Radio
RH	Humedad relativa
S_b	Encogimiento volumétrico relativo ($V \cdot V_0^{-1}$)

S, R_V	Encogimiento
T	Temperatura (K)
T_g	Temperatura de transición vítrea (K)
U	Matriz de diferencias de humedades ponderadas

Letras griegas

α	Coefficiente de relación de densidad
β	Coefficiente de relación de densidad, coeficiente de encogimiento
δ	Criterio de distancia entre dos contornos
Δx	Traslación horizontal (m)
Δy	Traslación vertical (m)
γ	Denota (γ°) rotación de orden ciclico de las coordenadas en el contorno del producto
κ	Relación altura-ancho (adimensional)
λ	Constante de separación;pendientes asintóticas para curvas de secado promedio: original y transformada, respectivamente
μ	Constante de separación
μ	Viscosidad
ϕ	Ángulo de rotación
ψ, Ψ	Fracción de humedad libre (adimensional)
ρ	Densidad ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)
τ	Número de Fourier para transferencia de masa (adimensional)
Θ	Variable de separación

θ	Número de Fourier modificado para transferencia de masa en productos que encogen con la difusividad dependiente del tiempo (adimensional)
ε	Porosidad
ξ	Coordenada radial a lo largo del eje x (adimensional)
ζ	Coordenada axial a lo largo del eje y (adimensional)

Subíndices

a	Área específica
ap	área proyectada
i	Componente
P	Producto
p	proyectada
r	Cualquier contorno del producto de referencia
0	Cero; inicial
A	Área transversal
a	Aire
b	Aparente
e	Equilibrio
ex	Exceso
f	Final
g	Transición vítrea
i	Interfase del producto-aire
l	Líquido

P	Para perímetro
p	Partícula
R	Reducida (Valor corriente/valor inicial)
r	Radio
Ro	Reducida (Valor corriente/ valor a X=0)
s	Sólido
sn	Solución
T	Total
theta	Denota dirección angular
w	Agua

Superíndices

<i>d</i>	exponente fractal
0	Cero; inicial

INTRODUCCIÓN

Los alimentos son productos complejos que requieren eventualmente de operaciones como la deshidratación para su procesamiento y/o conservación. Por lo tanto, la deshidratación es ampliamente utilizada en la industria de los alimentos no solo por limitar el crecimiento de microorganismos, al reducir el contenido de agua, sino también por ofrecer una gama de posibilidades en el desarrollo de nuevos productos o ingredientes (Vega-Mercado *et al.*, 2001). La deshidratación se puede llevar a cabo mediante diversos procesos, ya sea de manera aislada o en combinación; como el secado convectivo, deshidratación osmótica o freído. (Ruiz-López *et al.*, 2012; Toğrul & İspir, 2007)

El secado convectivo, es uno de los procesos más comunes y antiguos de conservación de alimentos; se emplea principalmente en el secado de frutas y hortalizas, especias, entre otros para aumentar la vida de anaquel, reducir su volumen, almacenado, manejo y costos de transporte (Beigi, 2016; Moses *et al.*, 2014). Es importante considerar que, el secado convectivo es un proceso que involucra el transporte simultáneo de materia y energía en un sistema que sufre diferentes cambios en sus propiedades físicas, mecánicas y químicas. Cambios en las características físico-mecánicas como densidad, porosidad, volumen, forma, entre otros son considerados como principales atributos de calidad en alimentos deshidratados (Bai *et al.*, 2002; Beigi, 2016; Udomkun *et al.*, 2016). Debido a ello y a la complejidad del proceso de secado, diversos autores han trabajado en entender los cambios macro y microestructurales en productos deshidratados (Campos-Mendiola *et al.*, 2007; Ebrahimi *et al.*, 2012; Ortiz-García-Carrasco *et al.*, 2015; Pacheco-Aguirre *et al.*, 2015; ?).

Por lo tanto, la reproducibilidad de la geometría así como cambios de volumen en los alimentos son factores imperativos en el proceso de secado, su evaluación como predicción representa una tarea difícil tanto numérica como experimentalmente (Campos-Mendiola *et al.*, 2007). Diversos estudios se han centrado en la caracterización macroscópica (externa) de las características encogimiento y/o deformación de productos alimenticios, principalmente mediante el uso de técnicas novedosas de análisis y procesamiento de imagen. Estas técnicas, denominadas de manera ge-

neral como visión por computadora, facilitan la medición objetiva y no destructiva de las características visuales de calidad en productos alimenticios a partir de imágenes digitales en donde se pueden obtener propiedades como volumen, área proyectada y perímetro correspondiente así como factores de forma tales como redondez, compactibilidad, elongación, etc. (Campos-Mendiola *et al.*, 2007; Khazaei *et al.*, 2013; Muñoz *et al.*, 2015; Yadollahinia *et al.*, 2009; Yan *et al.*, 2008).

Aunque hoy en día, existen trabajos para monitorear el proceso de secado a través del cálculo del encogimiento mediante técnicas de análisis de imagen aún se desconocen diversos aspectos del comportamiento encogimiento-deformación; aspectos como: el efecto de la geometría inicial y tipo de producto, el efecto del tipo de deshidratación, el efecto de las condiciones de proceso, entre otras. En este trabajo se propuso la implementación de protocolos de visión por computadora en procesos de secado convectivo para la evaluación y estimación del comportamiento encogimiento-deformación de alimentos que permitan la modelación y simulación del proceso para diseñar y controlar operaciones de secado así como del control de calidad de los mismos.

I. ANTECEDENTES

1.1. Secado de alimentos

1.1.1. Generalidades

Retirar agua de un alimento semisólido o líquido para dejarlo como un sólido ha sido desde hace varios siglos la forma más adecuada de conservación de los mismos. Como una operación de la deshidratación, el secado ocurre por efecto de la vaporización del líquido por transferencia de calor en el alimento húmedo, del medio circundante a la superficie del mismo. Humedad ligada o no ligada al alimento (humedad en exceso) transcurre hasta la superficie del alimento a través de uno o más mecanismos como la difusión, flujo capilar, presiones internas establecidas por encogimiento durante el secado o a través de una vaporización y recondensación repetida y progresiva de humedad a la superficie expuesta por secadores indirectos (de conducción). La liofilización se muestra como un caso especial de deshidratación ya que esta ocurre por abajo del punto triple del líquido que es eliminado, pasando directamente de una fase sólida a gaseosa lo que comúnmente se conoce como sublimación. (Aguilera *et al.*, 2003; Mujumdar, 2014). La transferencia de calor puede ser por convección (secador directo), por conducción (secador de contacto directo o indirecto), radiación o volumétricamente por desplazamiento de humedad del material húmedo en un microondas o campo electromagnético (Mujumdar, 2014).

La humedad contenida en un sólido húmedo o solución líquida ejerce una presión de vapor en cierto grado que depende de la naturaleza de la humedad, la naturaleza del sólido y la temperatura. Un sólido húmedo expuesto a un suministro continuo de gas fresco continúa perdiendo humedad hasta que la presión de vapor de la humedad en el sólido sea igual a la presión parcial del vapor en el gas. Entonces se dice que el sólido y el gas están en equilibrio, y el contenido de humedad del sólido se denomina contenido de humedad de equilibrio en las condiciones imperantes. Una mayor exposición a este aire por períodos indefinidamente largos no provocará ninguna pérdida adicional de humedad a menos que la humedad relativa del aire sea más baja (Mujumdar, 2014). El contenido de humedad de un sólido generalmente se

expresa como el contenido de humedad en peso del material completamente seco en el sólido, X . Otras veces, se expresa como contenido de humedad en base húmeda, W , que es la relación humedad-sólido basada en el total del material húmedo. los dos contenidos de humedad se relacionan de acuerdo a la siguiente expresión:

$$X = \frac{W}{1 - W} = \frac{m_w}{m_s} \quad (1.1)$$

$$\Psi = \frac{X - X_e}{X_0 - X_e} \quad (1.2)$$

La fracción de humedad libre (Ψ) esta representada por la ecuación 1.2 (Ortiz-García-Carrasco *et al.*, 2015; Ruiz-López *et al.*, 2012).

El agua puede estar ligada a un sólido ya sea por retención de capilares, solución en estructura celular, solución con el sólido o por adsorción física o química en la superficie del sólido. La humedad no ligada en un material higroscópico es la humedad en exceso del contenido de humedad en equilibrio correspondiente a la humedad saturada. El contenido de humedad libre es el contenido de humedad removible a cierta temperatura. En las inmediaciones de la interfaz entre el agua libre y el vapor, la presión de vapor en el equilibrio es la presión de vapor saturado (Mujumdar, 2014). Los productos muy húmedos tienen una presión de vapor en la interfaz casi igual a la presión de vapor de saturación. Si la concentración de sólidos se incrementa mediante la eliminación de agua, entonces los sólidos higroscópicos disueltos producen una caída en la presión de vapor debido a las fuerzas osmóticas. La eliminación adicional de agua finalmente da como resultado que la superficie del producto se seque. El agua ahora solo existe en el interior en capilares muy pequeños, entre partículas pequeñas, entre moléculas grandes y unidas a las moléculas mismas. Esta unión produce una disminución considerable de la presión de vapor. Tal producto esta en equilibrio solo con una atmósfera externa en la cual la presión de vapor disminuye considerablemente (Mujumdar, 2014). Para eliminar el agua de un sólido se puede recurrir a dos métodos, evaporación y vaporización. La evaporación ocurre cuando la presión de vapor de la humedad en la superficie sólida es igual a la presión atmosférica, elevando la temperatura de la humedad

hasta el punto de ebullición. Mientras que en la vaporización, la presión de vapor de la humedad es menor que la presión atmosférica, el secado se lleva a cabo por convección -pasando aire caliente sobre el producto- por lo que el producto enfría el aire transfiriendo la humedad (Mujumdar, 2014).

El comportamiento de secado de los sólidos se puede caracterizar midiendo la pérdida de contenido de humedad en función del tiempo. Los métodos utilizados son, diferencia de humedad, el pesaje continuo y el pesaje intermitente (Mujumdar, 2014).

La Figura 1.1 representa cualitativamente una curva de velocidad de secado típica de un producto higroscópico. Los productos que contienen agua se comportan de manera diferente en el secado de acuerdo con su contenido de humedad. Durante la primera etapa de secado, la velocidad de secado es constante con humedad libre en la superficie. La vaporización tiene lugar desde allí y puede producirse cierta contracción. En esta etapa de secado, la etapa de control de la velocidad de eliminación de la humedad en la superficie es la difusión del vapor de agua a través de la interfaz aire-humedad. Hacia el final del período de velocidad constante, la humedad debe ser transportada desde el interior del sólido a la superficie por fuerzas capilares y la velocidad de secado puede ser constante Mujumdar (2014). Cuando el contenido promedio de humedad ha alcanzado el contenido crítico de humedad (X_{cr}), la película superficial de humedad se ha reducido por evaporación de tal manera que el secado adicional hace que aparezcan puntos secos sobre la superficie. Sin embargo, dado que la velocidad se calcula con respecto al área total de la superficie sólida, la velocidad de secado disminuye a pesar de que la tasa por unidad de superficie sólida húmeda permanece constante. Esto da lugar a la segunda etapa de secado (período de caída de velocidad del secado), el período de secado de la superficie insaturada. Esta etapa continúa hasta que la película superficial de líquido se evapore por completo. Esta parte de la curva puede faltar por completo, o puede constituir el período de la caída de velocidad completa (Mujumdar, 2014). En un secado posterior (el segundo período de caída de velocidad o la tercera etapa de secado), la velocidad a la que la humedad puede moverse a través del sólido como resultado de gradientes de concentración entre las partes más profundas y la superficie es la etapa de control. La transmisión de calor ahora consiste en la transferencia de calor a la superficie y la conducción de calor en el producto. Dado que la profundidad promedio del nivel de humedad aumenta progresivamente y la con-

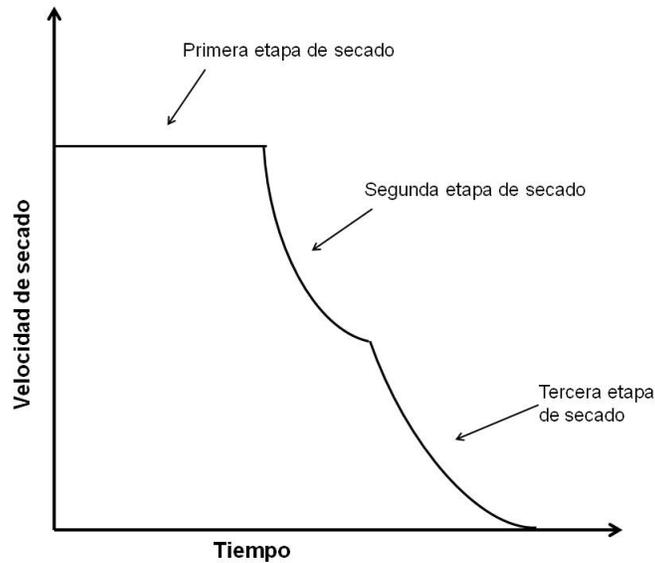


Figura 1.1. Típica curva de velocidad de secado, condiciones de secado constantes.

ductividad térmica de las zonas externas secas es muy pequeña, la velocidad de secado está cada vez más influenciada por la conducción de calor. Sin embargo, si el producto seco tiene una densidad aparente relativamente alta y un volumen de cavidad pequeño con poros muy pequeños, el secado se determina no tanto por la conducción de calor sino por una resistencia bastante alta a la difusión dentro del producto. La velocidad de secado se controla mediante la difusión de la humedad desde el interior hacia la superficie y luego la transferencia de masa desde la superficie. Durante esta etapa, se elimina parte de la humedad unida por sorción. A medida que la concentración de humedad disminuye, la velocidad de movimiento interno de la misma disminuye. La velocidad de secado disminuye aún más rápidamente que antes y continúa hasta que el contenido de humedad desciende al valor de equilibrio (X_{eq}) con la humedad del aire predominante y luego se detiene el secado (Mujumdar, 2014).

El secado es una operación esencial en la industria química, agrícola, biotecnológica, alimenticia, polimérica, cerámica, farmacéutica, de pulpa y papel, mineral así como en la industria de procesamiento de madera (Mujumdar, 2014). En la industria de los alimentos, la capacidad de rehidratación uniforme con propiedades sensoriales adecuadas, preservación de estructura celular a nivel microestructural, viabilidad entre otras cosas son consideradas ventajas de granos, legumbres, carni-

cos y lácteos deshidratados; algunos ejemplos de ello son, leche en polvo, cereal de desayuno y pasta. Aunque, los carnicos y pescados sufren mayores cambios estructurales y sensoriales, estos aún mantiene su capacidad de rehidratación no así para frutas y hortalizas quienes sufren cambios estructurales significativos y tienen una pobre capacidad de reconstitución en comparación con los productos frescos. Inherente a estas ventajas de la deshidatación, que no son comparables con otras operaciones de conservación, se tiene una excelente estabilidad a temperatura ambiente, sumándole conveniencia, diversidad en procesos y versatilidad en productos, costos mínimos y un impacto ambiental bajo (Aguilera *et al.*, 2003).

Por otra parte, el secado involucra transferencia de masa y calor junto con diversos procesos tales como, transformaciones físicas y químicas las cuales a su vez, causan cambios en la calidad del producto. Dentro de los principales cambios físicos que pueden ocurrir en un alimento seco son; encogimiento, deformación, porosidad, cristalización, formación de corteza, pegosidad, fragilidad, entre otros. Cambios químicos deseables o indeseables o reacciones bioquímicas pueden ocurrir con el consecuente cambio de color, textura, olor u otra propiedad sensorial. Valores experimentales de estas propiedades son esenciales en el modelado y diseño de secadores, calentadores y extrusores de alimentos (Mujumdar, 2014; Wang & Brennan, 1995).

Las condiciones externas de secado son especialmente importantes durante las etapas iniciales del proceso cuando se elimina la humedad superficial libre. En ciertos casos, por ejemplo, en materiales como la cerámica y la madera en las que se produce un encogimiento considerable, se da una excesiva evaporación en la superficie después de eliminar la humedad libre inicial en grupos de gradientes de humedad que van desde el interior a la superficie. Esto es susceptible de causar sequedad y encogimiento excesivo y, en consecuencia alta tensión dentro del material, lo que resulta en agrietamiento y deformación (Mujumdar, 2014).

1.1.2. Principales cambios físicos en el alimento

1.1.2.1. Encogimiento

Cuando la humedad se separa dentro de la red sólida de un alimento durante el secado, un desbalance de presión es producido entre la parte interna y externa del

alimento, generando contracción que lleva a un encogimiento, cambios de forma y algunas veces ruptura del producto. Este fenómeno afecta la velocidad de secado así como también las propiedades físicas y funcionales de los productos deshidratados, además la presentación del producto es afectada, también por un encogimiento severo del producto. Idealmente, puede considerarse que el encogimiento del material es igual al volumen de agua removida. Por lo tanto, una relación paramétrica puede ser obtenida al relacionar el volumen de encogimiento al contenido de humedad del material (Gulati & Datta, 2015; Jangam *et al.*, 2010; Riva *et al.*, 2005). Para propósitos de modelamiento del secado, el encogimiento se refiere a la reducción de tamaño en el producto debido al acortamiento regular de sus dimensiones en dirección a la transferencia de masa en un sistema seleccionado (Pacheco-Aguirre *et al.*, 2015). El encogimiento D_R (ó S_b) representa, un cambio dimensional relativo o reducido de volumen, área o grosor, el volumen de encogimiento es frecuentemente representado por las siguientes ecuaciones (Mayor & Sereno, 2004):

$$S_b = S = \frac{V}{V_0} \quad (1.3)$$

$$\%S = 100 \cdot \left(\frac{V_0 - V}{V_0} \right) \quad (1.4)$$

Donde S_b es coeficiente de encogimiento, V es volumen de la muestra al tiempo t y V_0 es volumen inicial de la muestra (Dissa *et al.*, 2008; Ko *et al.*, 2008; Mayor & Sereno, 2004).

El encogimiento puede ser medido por simples métodos como dimensión geométrica, desplazamiento de líquido, picnómetro de gas y desplazamiento de sólidos (Aghbashlo *et al.*, 2014) y muy recientemente por análisis de imagen. Tres características comúnmente usadas para medir el tamaño de un objeto y que se emplean en la evaluación de calidad de alimentos son: área, perímetro, longitud y amplitud (Du & Sun, 2004). En la tabla se muestran correlaciones empleadas por diversos autores para calcular el encogimiento.

A continuación, se presentan algunos factores que afectan la magnitud del encogimiento en alimentos sometidos a procesos de secado.

Volumen de agua removida: El encogimiento del alimento se incrementa con la cantidad de agua que se evapora, mientras más agua se evapora más contracción por

Tabla 1.1. Correlaciones para el cálculo del encogimiento de diversos alimentos

Alimento	Correlación	Referencia
Agave	$S = \left(\frac{L}{L_0}\right)^b$	(Gumeta-Chávez <i>et al.</i> , 2011)
Zanahoria	$S = \left(1 - \frac{V(t)}{V_0}\right)$	(Liu <i>et al.</i> , 2012)
Papa	$S = \frac{1-\phi_{w,0}}{1-\phi_w}$	(Gulati & Datta, 2015)

estrés es ejercida sobre el material; el equilibrio mecánico es alcanzado en algunos casos como también se logra que el volumen de agua removida durante las etapas finales del secado sea mayor que la reducción en el volumen de la muestra. Este comportamiento se ha explicado como una consecuencia de la movilidad en la matriz sólida de alimentos con bajo contenido de humedad. Estructuras de biopolímeros de productos agrícolas y el efecto combinado de condiciones de proceso determinan el tipo y grado de encogimiento (Jangam *et al.*, 2010; Mayor & Sereno, 2004).

Movilidad de la matriz sólida: Se sabe que la movilidad de la matriz sólida del material alimenticio está muy relacionada con el estado físico, una alta movilidad corresponde a un comportamiento viscoelástico típico de un estado gomoso mientras que una baja movilidad corresponde a un comportamiento elástico típico de un estado vítreo. Tanto el proceso dinámico movilidad de la matriz sólida así como el encogimiento dependen de la diferencia de temperaturas ($T - T_g$). Altos contenidos de humedad en etapas iniciales del secado (estado gomoso) en el alimento, T_g es menor y hay un aumento significativo del encogimiento en el alimento. Mientras que a bajos contenidos de humedad, T_g aumenta, causando un estado vítreo y disminución del encogimiento (Gulati & Datta, 2015; Kurozawa *et al.*, 2012; Mayor & Sereno, 2004).

Velocidad de secado: La velocidad de secado es importante considerarla pues limita la pérdida de agua en el alimento por ende afecta el grado de encogimiento que se tenga al final del proceso. A mayor velocidad hay mayor pérdida de humedad, mayor velocidad de encogimiento aunque en menor grado debido a que existe formación de corteza que fija el volumen, mayor densidad, posibilidad de agrietamiento y transición al estado vítreo en la superficie del alimento con una parte interna húmeda y elástico. A menor velocidad de secado, el encogimiento es ideal hasta el final

del secado con un mayor grado de encogimiento pero disminuye cuando el contenido de humedad es bajo debido al cambio de estado gomoso a vítreo y no por la formación de costra en la superficie (Gulati & Datta, 2015; Mayor & Sereno, 2004).

En la mayoría de los casos estos efectos (temperatura, velocidad de aire o humedad relativa del aire) se han estudiado de manera individual sin que se presente una influencia clara sobre el encogimiento de alimentos. Se encontró que estos efectos causan algún tipo y grado de encogimiento y/o deformación solo en algunos alimentos pero en otros no es así, por lo que sugieren considerar el efecto combinado en función de la cantidad de humedad presente en el alimento (Mayor & Sereno, 2004).

1.1.2.2. Deformación

La descripción de forma por el hombre suelen ser abstractas o artísticas, pero no cuantitativas. Como resultado, la identificación de la forma de una fruta es fácil para nuestro cerebro, pero es difícil para un computador. Las formas de los objetos procesados pueden ser descritas usando términos matemáticos precisos mientras que formas irregulares como aquellas características de los productos biológicos se pueden aproximar por ajuste de curvas. La industria de procesamiento de frutas y hortalizas busca obtener productos con forma homogénea, reducción de pérdidas así como un producto final que encaje bien en el empaque. (Moreda *et al.*, 2012)

La forma o, estructura física visible, se puede definir como la información geométrica que permanece cuando la localización, tamaño y efectos rotacionales son filtrados. La forma es una característica intrínseca de objetos 3D o proyecciones del mismo. El uso de nuevas tecnologías analizan la forma de los alimentos principalmente en una y dos dimensiones, empleando para ello la imagen digital planar del objeto (Moreda *et al.*, 2012). El proceso principal a la clasificación de forma puede ser dividido en los siguientes pasos: captura de imagen, segmentación o binarización, extracción del valor característico (también llamado descripción de forma), compresión del grupo de características, comparación y clasificación. Comúnmente, el tercer paso (descripción de forma) es el de mayor utilización pues provee una representación no numérica de la forma, como una gráfica. El descriptor numérico de la forma es denominado "vector de características o vector de descriptor de forma" el cual consisten de un grupo de valores de las propiedades o características

consideradas relevantes para caracterizar una forma (Moreda *et al.*, 2012).

Expresar el cambio de forma o deformación de los materiales secos usando solamente el grado de encogimiento (o relación volumen-encogimiento) no es adecuado. La necesidad de una identificación rápida y sencilla de la deformación es requerida (Panyawong & Devahastin, 2007). La deformación puede resultar fácilmente medible usando técnicas de procesamiento de imagen así como el uso de descriptores o índices de forma. En la Tabla 1.2 se muestran ejemplos de índices de forma combinando mediciones de tamaño.

Tabla 1.2. Índices de forma empleados en análisis de imagen.

$Relación\ de\ área = \frac{Área}{Diámetro\ Max. \cdot Diámetro\ Min.}$
$Relación\ de\ aspecto = \frac{Diámetro\ Max.}{Diámetro\ Min.}$
$Circularidad = \frac{Perímetro^2}{Área}$
$Compactibilidad = \frac{4\pi \cdot Área}{Perímetro^2}$
$Rango\ de\ diámetro = Diámetro\ Max. - Diámetro\ Min.$
$Excentricidad = \sqrt{1 - \frac{Eje\ semi-menor^2}{Eje\ semi-mayor^2}}$
$Redondez = \frac{4\pi \cdot Área}{\pi \cdot Diámetro\ max.^2}$
$Factor\ de\ forma\ 1 = \frac{Diámetro\ max.}{Área}$
$Factor\ de\ forma\ 2 = \frac{Área}{Diámetro\ max.^3}$
$Factor\ de\ forma\ 3 = \frac{4\pi}{\pi \cdot Diámetro\ max. \cdot Diámetro\ min.}$

Fuente: Du & Sun (2004)

Descriptores de forma, como Circularidad y compactibilidad, se pueden agrupar en tres enfoques principales: distancia de forma interna, forma de referencia y propiedades de píxeles geométricos. La distancia de forma interna y las propiedades de píxeles geométricos son más adecuadas para implementarse como medidas de estos factores de forma. Compactibilidad puede proporcionar mayor información sobre la estructura de una forma siendo que este factor se afecta menos por cambios de escala o presencia de orificios u hoyos en la imagen (Montero & Bribiesca, 2009).

Panyawong & Devahastin (2007) emplearon el factor de forma Heywood (**k**) para describir la deformación de un alimento (cubos de zanahoria) sometido a dos procesos de secado -secado al vacío y secado con vapor supercalentado a baja presión

(LPSSD)- bajo un diseño completamente al azar con dos factores (método de secado y temperatura).

$$\mathbf{k} = \frac{V}{d_a^3} \text{ con } d_a^3 = \sqrt{4A_p/\beta} \quad (1.5)$$

Donde V_p es el volumen del cubo (m^3); A_p es el área proyectada del cubo (m^2) y d_a es el diámetro equivalente al área proyectada del cubo (m).

Por otro lado, Yadollahinia *et al.* (2009) determinaron deformación en rebanadas de papa empleando para ello dos factores de forma, diámetro de Feret (DF) y Redondez.

$$FD = 2\sqrt{\frac{A}{\pi}} \quad (1.6)$$

1.1.3. Secado convectivo

Cerca de un 85 % de los secadores industriales son de tipo convectivo empleando aire caliente o gases de combustión directa como medio de secado. El primer registro conocido de secado industrial por aire caliente apareció en el siglo XVIII, a partir de entonces la industria de secado estuvo muy relacionada a los escenarios de la guerra alrededor del mundo. Británicos, canadienses y estadounidenses procesaban y embarcaban vegetales secos durante las guerras de Crimea, Boer y primera guerra mundial, respectivamente. Para 1919, entre los productos que procesaba Estados Unidos, se encontraban chícharos, repollo, zanahorias, apio, papas, espinacas, maíz dulce, nabos y sopas mixtas (Vega-Mercado *et al.*, 2001).

La tecnología de secado ha sido empleada en una escala industrial junto con diversas tecnologías de conservación como envasado y congelación como las más destacadas. Pero el uso de químicos de conservación y la demanda de proveer un rango comprensivo de productos ha hecho que se renueve el interés en las operaciones de secado (McMinn & Magee, 1999). Siempre es un problema complejo elegir un secador o proceso de secado para un material en particular pues siempre se espera elegir la mejor combinación posible entre calidad del producto y economía. En general, tres factores principales pueden evaluarse como se muestra en la Figura 1.2.

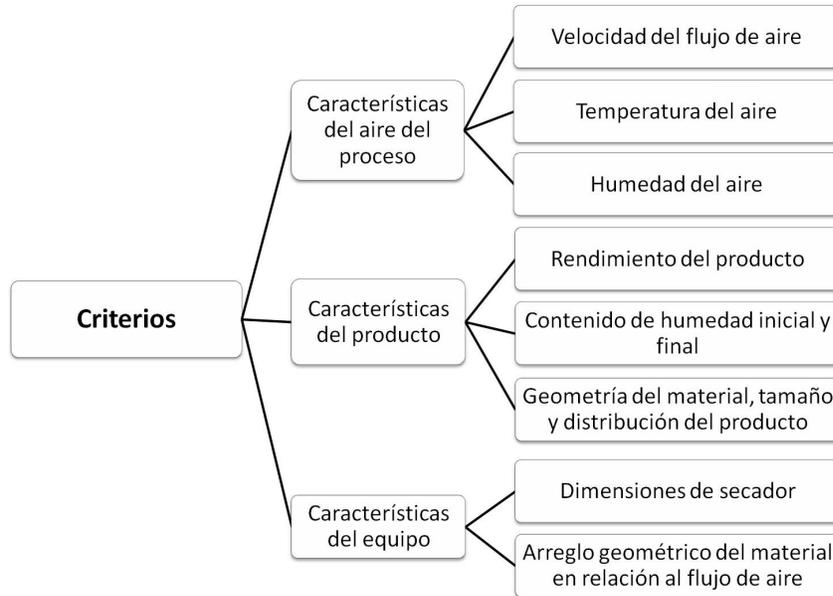


Figura 1.2. Criterios para seleccionar un secador.

Fuente: McMinn & Magee (1999)

Aunque hoy en día existen diversas técnicas de secado disponible, frutas y hortalizas aún se secan por secado con aire caliente debido a que es el más simple y económico entre los diversos procesos (McMinn & Magee, 1999).

Para la selección de un secador existen diversos requisitos que debe cubrir, sin que este limitado a ello; estos son: capacidad de producción, contenido de humedad inicial del producto, distribución del tamaño de partícula, características del secado, temperatura máxima permitible, isoterma de humedad, datos físicos del material, entre otros (Vega-Mercado *et al.*, 2001). La primera generación de secadores, de gabinete y tipo cama (por ejemplo, de tunel, bandejas, horno y transportador de flujo rotatorio) emplean flujo de aire caliente sobre una área extensa del producto para remover agua de la superficie. Empleados principalmente para secar productos sólidos como granos, frutas y vegetales ya sea en tozos o rebanadas. La configuración básica de este tipo de secadores incluye un alimentador, calentador y colector (Vega-Mercado *et al.*, 2001).

El cálculo de los procesos de secado requiere del conocimiento de un número de elementos tales como las características del material, los coeficientes de conductividad y transferencia así como las características encogimiento-deformación. En la mayoría de los casos, estas características no pueden ser calculadas por análisis

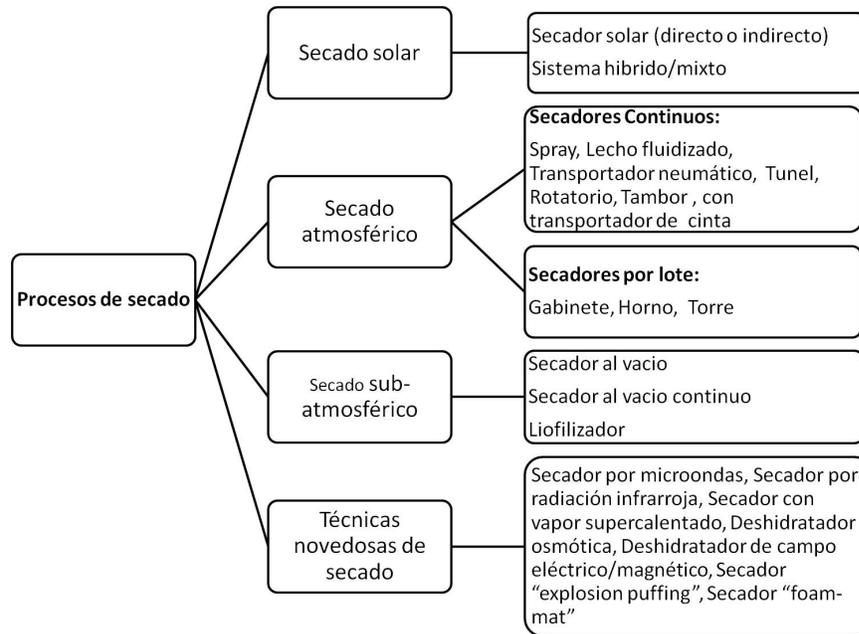


Figura 1.3. Clasificación de diferentes tipos de secadores

Fuente: McMinn & Magee (1999)

dimensional simple y deben ser integradas en el desarrollo de modelos matemáticos para calcular coeficientes de transferencia y conductividad global que reflejen el efecto total de los procesos parciales, frecuentemente interpretados como características experimentales. En consecuencia, estas características pueden ser determinadas solamente por experimentos adecuados. Con datos experimentales es posible aplicar soluciones analíticas o numéricas de transferencia de calor y masa simultáneos a cálculos prácticos (Mujumdar, 2014).

1.2. Difusividad

La difusión es el proceso por el cual la materia es transportada de una parte de un sistema a otra como resultado del movimiento molecular aleatorio (Crank, 1979). El transporte de humedad junto con sólidos puede ocurrir por cualquiera de los siguientes mecanismos de transferencia de masa (Mujumdar, 2014; Salim *et al.*, 2017):

- Difusión líquida, si el sólido húmedo está a una temperatura por debajo del punto de ebullición del líquido.

- Difusión de vapor, si el líquido esta por arriba de su temperatura de ebullición.
- Difusión Knudsen, si el secado toma lugar a muy bajas temperaturas y presiones, por ejemplo liofilización.
- Difusión superficial (posible pero no probado), diferencias de presión diferencial, cuando la velocidad de vaporización interna excede la velocidad de transporte de vapor a través del sólido al entorno.
- Combinación de mecanismos.

La teoría matemática de difusión en sustancias isotrópicas se basa sobre la hipótesis de que la velocidad de transferencia de las sustancias difundidas a través de una unidad de área de una sección es proporcional al gradiente de concentración medida en línea normal a la sección:

$$F = -D \frac{\partial C}{\partial X} \quad (1.7)$$

Donde F es la velocidad de transferencia por unidad de área de una sección, C es la concentración de la sustancia difundida, X es la coordenada espacial medida en línea normal a la sección. El signo negativo suge porque la difusión ocurre en la dirección opuesta a la concentración creciente (Crank, 1979).

El termino de difusividad efectiva (D) se define para describir la velocidad de movimiento de la humedad, no importando que mecanismo este implicado. La ecuación que describe un proceso de secado por difusión en un sistema coordenado generalizado es la siguiente (Ruiz-López *et al.*, 2013):

$$\frac{\partial(\rho u)}{\partial t} = \nabla \cdot (D \cdot \nabla(\rho \mu)) \quad (1.8)$$

Donde, u es el contenido de humedad, t es el tiempo, ρ es la concentración volumétrica de sólidos secos y D es la difusividad efectiva.

$$\frac{\partial(cX)}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(D_x \frac{\partial(cX)}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(D_y \frac{\partial(cX)}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(D_z \frac{\partial(cX)}{\partial z} \right) \quad (1.9)$$

$$\frac{\partial (cX)}{\partial t} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \cdot D_r \frac{\partial (cX)}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial \theta} \left(D_\theta \frac{\partial (cX)}{\partial \theta} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(D_z \frac{\partial (cX)}{\partial z} \right) \quad (1.10)$$

$$\frac{\partial (cX)}{\partial t} = \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left(r^2 \cdot D_r \frac{\partial (cX)}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2 \sin \theta} \frac{\partial}{\partial \theta} \left(\sin \theta \cdot D_\theta \frac{\partial (cX)}{\partial \theta} \right) + \frac{1}{r^2 \sin^2 \theta} \frac{\partial}{\partial \phi} \left(D_z \frac{\partial (cX)}{\partial \phi} \right) \quad (1.11)$$

La ecuación (1.8) puede resolverse en diversas geometrías estándares (rebanada (ec. 1.9), cilindro (ec. 1.10) o esfera (ec. 1.11)) usando las condiciones de frontera apropiadas. En muchos casos, la difusividad efectiva es estimada usando solamente el primer término de la solución analítica aplicable. Este método considera un coeficiente de difusión constante a lo largo de un proceso de secado completo y puede ser relacionado con la temperatura del producto por medio de la ecuación de Arrhenius. En realidad, el coeficiente de difusión rara vez es constante pues varía con el contenido de humedad, temperatura y coordenadas espaciales. Generalmente, los valores de difusividad están entre 10^{-13} y $10^{-6} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ mientras que la mayoría (cerca del 92 %) caen entre 10^{-12} y $10^{-8} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$.

El efecto de la temperatura sobre la difusividad de humedad efectiva es generalmente expresada usando una relación tipo Arrhenius, donde la temperatura tiene un efecto significativo sobre el proceso de secado mayor que el contenido de humedad del producto.

$$D_{eff} = D_0 \exp \left(-\frac{E_a}{T_a \cdot R} \right) \quad (1.12)$$

donde la energía de activación (E_a) expresa el efecto de la temperatura de secado sobre la difusividad de humedad efectiva (Seremet *et al.*, 2015). El rango general para frutas y hortalizas se encuentra entre 12.7 – 110 kJ/mol (Aral & Beş, 2016).

Los valores de difusividad se ven afectados cuando no se considera cambios estructurales, como el encogimiento, en su estimación. El encogimiento determina una reducción en las rutas de difusión y por ende de la aceleración del secado lo que muchas veces es erróneamente atribuido a un incremento de la difusividad de hu-

medad cuando se considera volumen constante de las muestras (Hassini *et al.*, 2007).

Los parámetros de transporte en un alimento (D_m o K_m) se pueden determinar por alguno de los siguientes métodos; (i) determinación de la curva de pérdida de humedad en combinación con solución analítica capa plana de la misma curva (basada en ley de Fick), (ii) determinación de los perfiles del contenido de humedad sobre una muestra, destructiva o no destructiva obtenida por imagen, y combinando toda esta información con modelación inversa usando ley de Fick y (iii) por modelación numérica de transporte de agua a través del tejido celular a nivel microescala (Defraeye & Verboven, 2017).

Se encuentran disponibles soluciones para la ecuación de difusión en estado no estacionario en diferentes geometría para su aplicación a productos donde la transferencia de masa se puede reducir al caso más simple en una dimensión (ejemplo, placa plana, cilindro circular infinito y geometrías esféricas) o donde se puede aplicar el principio de superposición (ejemplo, paralelepípedo y cilindro circular finito) (Crank, 1979; Ruiz-López *et al.*, 2013). Aunque estas geometrías han sido favorecidas en muchos estudios, la forma exacta de muchos productos puede no ser descrita exactamente por estas geometrías lo que lleva a una sobre- o subestimación de las propiedades de transferencia de masa (Ruiz-López *et al.*, 2013). Diversos autores se han enfocado al estudio numérico de la transferencia de calor y masa durante el secado de productos con geometrías no tradicionales, no así en el desarrollo de soluciones analíticas o semi-analíticas para modelar el secado de sólidos con formas no tradicionales, las cual son limitadas. Algunos trabajos se han enfocado principalmente en geometrías desarrolladas a partir de un sistema de coordenadas esféricas tales como esferas concéntricas, hemiesfera y casco hemiesférico. Este sistema de coordenadas esféricas puede usarse para representar frutos en mitades o enteros como drupas, vegetales, algunos panes entre otros. Las mitades y cuartos producidos por cortes longitudinales de cilindros sólidos y anulares son adecuados al representar frutos como manzanas o piña sin el corazón o centro así como vegetales como la zanahoria, calabaza, rábano, pepino, entre otros (Bon *et al.*, 1997; De Lima *et al.*, 2002; Ruiz-López *et al.*, 2013). En la siguiente Tabla 1.3 se muestran algunos modelos de difusión para diversas geometrías empleadas en el secado de alimentos.

Azzouz *et al.* (2002) confirmaron que la utilización de los métodos analíticos no son justificados en el caso de uva el cual es fuertemente deformable por lo que existe una importante brecha entre el coeficiente de difusión identificado por método

Tabla 1.3. Modelos de difusión empleados para diversas geometrías durante secado convectivo

Geometría evaluada	Muestra	Solución analítica	Referencia
Placa	Mango, Camote	$MR = \frac{8}{\pi^2} \exp\left(-\frac{\pi^2}{4} \frac{Dt}{l(t)^2}\right)$	(Dissa <i>et al.</i> , 2008; Singh & Pandey, 2012)
Esfera	Uvas, Espino	$MR = \frac{6}{\pi^2} \exp\left(-\frac{\pi^2}{R^2} Dt\right)$	(Aral & Beşe, 2016; Azzouz <i>et al.</i> , 2002)
Cilindro	Calabaza	$MR = \frac{4}{b_1^2} \exp\left[-Dt \left(\frac{b_1^2}{R^2}\right)\right]$	Guiné <i>et al.</i> , 2011

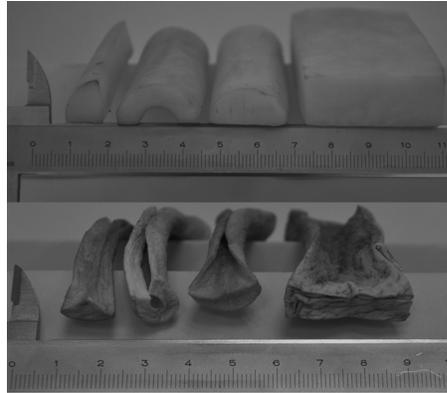
$$MR = \frac{X - X_{eq}}{X_0 - X_{eq}}$$

número y por el obtenido analíticamente.

Hassini *et al.* (2007) estimaron difusividad de humedad en rodajas de papa mediante dos métodos: analítico y numérico. Determinaron que, el método analítico corregido con encogimiento es más simple, rápido estimando difusividades de humedad aproximadas para materiales que encogen demasiado. Mientras que, el método numérico es considerado como referencia permitiendo determinaciones de difusividad de humedad correlacionando la temperatura y el contenido de humedad por simples funciones lineal y exponencial.

(Ruiz-López *et al.*, 2013) estudiaron el comportamiento del secado de productos con formas no tradicionales a través del modelado y la simulación del fenómeno de transferencia de masa en alimentos cortados en secciones longitudinales sólidas y geometrías cilíndricas anulares (Figura 1.4). Con base en un enfoque teórico-numérico desarrollaron soluciones analíticas aproximadas simples para la simulación o estimación de la difusividad del agua.

Los resultados de este trabajo sugieren que este enfoque es una herramienta poderosa para desarrollar expresiones simples y dar solución a problemas de transferencia de masa en productos descritos por geometrías que carecen de soluciones analíticas simples. En este estudio, la geometría cilindro medio-anular exhibió una velocidad de secado más baja que el cuarto de cilindro. La aplicación de un proceso de secado convectivo controlado por difusión puede ser generalizado al considerar resistencia externa a la remoción de agua o a describir transferencia de masa o calor



Fuente: Ruiz-López *et al.* (2013)

Figura 1.4. Formas iniciales y finales de productos secos (de Izquierda a Derecha: cuartos de cilindro, medio cilindro anular, medio cilindro y prisma rectangular).

en otros procesos como, deshidratación osmótica, calentamiento o enfriamiento.

La dependencia del contenido de humedad se ve afectada por la estructura del alimento y la fracción vacía que afecta la difusividad significativamente (Jangam *et al.*, 2010; Salim *et al.*, 2017). Se ha reportado que para materiales de baja porosidad el valor de D es muy cercano a la difusividad líquida mientras que para materiales porosos y granulares la humedad es transportada (Jangam *et al.*, 2010). Diversos estudios indican mejor estimación en los valores de difusividad, isotrópica y anisotrópica, si se toma en cuenta el efecto de encogimiento y deformación durante el secado (Pacheco-Aguirre *et al.*, 2014; Ruiz-López *et al.*, 2013).

1.3. Modelación y simulación del proceso de secado en alimentos

Los cambios dimensionales que sufren los alimentos durante el secado son importantes cuando se desea simular de manera correcta las curvas de secado o en la estimación confiable de las propiedades de transferencia de masa (Ruiz-López *et al.*, 2012).

El encogimiento o cambios estructurales de productos alimenticios puede ser modelado mediante el uso de ecuaciones matemáticas con relaciones empíricas o fun-

damentales, lineales o no lineales (Mayor & Sereno, 2004), su integración en los modelos permite subestimar la velocidad de secado (Dissa *et al.*, 2008; Hassini *et al.*, 2007; Liu *et al.*, 2012). En la modelación empírica el encogimiento es una función del contenido de humedad. Los modelos empíricos son adecuados para materiales con baja porosidad o materiales con porosidad uniforme desarrollada durante el secado. En contraste, los modelos fundamentales se derivan en base a balances de masa, densidad y porosidad; estos consideran, en muchos casos, aditividad de volumen en las diferentes fases del sistema. Los modelos fundamentales revelan datos del contenido de humedad y/o cambios de volumen sin complicados cálculos matemáticos, además de que no son necesarios datos experimentales como en el caso de los modelos empíricos (Mayor & Sereno, 2004).

Diversos autores propusieron modelos para evaluar procesos de secado en alimentos a partir de relacionar propiedades como el volumen y/o la densidad con el contenido de humedad, revelando en la mayoría de los casos que el volumen de encogimiento es aproximado al volumen de agua evaporada (Kilpatrick *et al.*, 1955; McMinn & Magee, 1997; Suzuki *et al.*, 1976; Zogzas *et al.*, 1994). Además, con considerar la composición del alimento se han establecido correlaciones empíricas generalizadas que predicen las características de encogimiento con solo conocer el contenido de humedad inicial (Zogzas *et al.*, 1994). Hasta este punto, los modelos propuestos solo se aplicaban bajo condiciones específicas de operación. Ratti (1994) propuso que las características de encogimiento de frutas y vegetales no son una función exclusiva del contenido de humedad, sino que, representan una dependencia sobre las condiciones de operación y geometría de la muestra. Aunque Zogzas *et al.* (1994) determinaron que los parámetros de encogimiento son independientes de las condiciones del aire de secado, de la temperatura y la humedad; estos también reconocieron que sus resultados no son concluyentes pues las condiciones de operación si pueden influir sobre el encogimiento.

De esta manera, se debe tomar en cuenta que no siempre existirá una correlación directa con la reducción del volumen y la cantidad de agua evaporada. Mas bien, considerar que el comportamiento del encogimiento volumétrico es específico del sistema y que depende del tipo de material, las características celulares y la estructura del tejido. En consecuencia, la fuerza mecánica del medio y la respuesta al estrés inducido es responsable de la disminución en volumen y los cambios asociados a la forma de la muestra (Mayor & Sereno, 2004).

La incorporación del encogimiento a modelos que describan la curva de secado del producto ha sido adecuada al correlacionar mejor con datos experimentales que aquellos modelos usando coeficientes de difusión constante (McLaughlin & Magee, 1998).

Los modelos empíricos, Pages, Pages modificado y Henderson & Pabis, han sido utilizados para simular curvas de secado sobre la reducción del contenido de humedad de diversos productos como zanahorias, higos, berenjena, papaya, calabaza y papa; siendo el modelo de Pages el que mejor ajuste presentó además de mostrar una marcada influencia del encogimiento sobre la velocidad de secado y valores de difusividades de agua (Dissa *et al.*, 2008; Guiné *et al.*, 2011; Singh & Pandey, 2012). Sin embargo, en etapas finales del secado, el modelo de Pages tiende a dar valores muy alto que los mostrados experimentalmente por lo que otros modelos como Newton, Henderson y Pabis o Logarítmico muestran mejor ajuste (Guiné *et al.*, 2011).

Las Tablas 1.4, 1.5, muestran ejemplos de modelos empíricos y fundamentales usados para evaluar el encogimiento de alimentos (Jangam *et al.*, 2010; Mayor & Sereno, 2004).

Tabla 1.4. Modelos empíricos lineales para describir el encogimiento.

Tipo de Modelo	Geometría	Dimensión reducida	Material	Referencia
$D_R = k_1 X + k_2$	Cilindro	Volumen	Manzana	Lozano et al. (1980)
	Cilindro	Volumen	Zanahoria	Ratti (1994)
	Esfera	Volumen	Papa	McLaughlin & Magee (1998)
	Cilindro	Volumen	Manzana	Moreira et al. (2000)
	Cilindro	Volumen	Zanahoria	Hatamipour & Mowla (2003)
	Esfera	Volumen	Cereza	Ochoa et al. (2002)
$D_R = k_3 + k_4 X$ para $X \geq X_c$	Cilindro	Volumen	Manzana, Papa	Ratti (1994)
$D_R = 1 + \beta X$	Cubo	Volumen	Manzana, zanahoria, papa	Zogzas <i>et al.</i> (1994)
$D_R = (k_5 T + k_6) + (k_7 T + k_8) X$	Cilindro	Volumen	Papa	McMinn & Magee (1997)
$S = k_9 [\exp(k_{10} X)]$	Aros	Volumen	Manzana	Bai <i>et al.</i> (2002)
$S = \frac{V_s}{V_0} + \frac{V_s}{V_0} \beta \bar{X}$	Placa	Volumen	Papa	(Hassini <i>et al.</i> , 2007)
$MR = \exp(-k_{11} t^n)$	Placa	Volumen	Mango	Dissa <i>et al.</i> (2008)
$MR = \exp[-(k_{12} t)^n]$	Cilindros	Volumen	Calabaza	Guiné <i>et al.</i> (2011)
$MR = \exp(-k_{13} t)$				
$MR = k_{14} \exp(-k_{15} t)$	Cubos	Volumen	Papa	Singh & Pandey (2012)
$D_R = k_{16} \exp[k_{17} (\%S)] + k_{18}$	Cubos	Volumen	Zanahoria	Sansiribhan <i>et al.</i> (2012)
$MR = k_{19} \exp(-k_{20} t^n) + k_{21} t$	Placa	Volumen	Manzana	Beigi (2016)

Tabla 1.5. Modelos empíricos no lineales para describir el encogimiento.

Tipo de Modelo	Geometría	Propiedad evaluada	Material	Referencia
$\frac{L}{L_0} = \Delta L_f + (1 - \Delta L_f) \frac{X}{X_0}$ donde $\Delta L_f = \exp^{-nL_0}$	Placa	Grosor	Mango	Hernandez <i>et al.</i> (2000)
$D_R = k_{22} + k_{23} \frac{X}{X_0} + k_{24} \left(\frac{X}{X_0}\right)^2$	Cilindro, lámina	Volumen	Manzana, zanahoria, papa, calamar	Mayor & Sereno (2004)
	Cubos	Volumen	Zanahoria	Panyawong & Devahastin (2007)
$S = k_{25} + k_{26} \frac{X}{X_0}$	Esfera	Volumen	Cerezas	Ochoa <i>et al.</i> (2002)
$D_R = k_{27} \exp(k_{28} \frac{X}{X_0})$	Cilindro, lámina	Volumen	Manzana, zanahoria, papa, calamar	Mayor & Sereno (2004)
$D_R = -S_b^{-2/3} \frac{dX}{dt}$	Rebanadas	Densidad	Mango	Dissa <i>et al.</i> (2008)
$\frac{A_t}{A_0} = [k_{29} X_t + k_{30}]^n$ donde $k_{29} = a = \frac{\rho_0}{(X_0+1)}$; $k_{30} = b = 1 + k_9 - \rho_0$	Cubos	Área Superficial	Papaya	Kurozawa <i>et al.</i> (2012)

Ruiz-López *et al.* (2012) desarrollaron un modelo analítico basado en la segunda ley de de difusión de Fick; con la finalidad de evaluar propiedades de transferencia de masa y describir la cinética de secado de alimentos que presentan encogimiento. El modelo que propusieron fue validado con datos de secado experimental de rebanadas de chayote obtenidas a diferentes temperaturas (40-70°C). Los resultados de este trabajo muestran que el modelo puede ser aplicado para la evaluación de difusividades que cambian con el tiempo las cuales pueden ser relacionadas con el contenido de humedad promedio además de usarlo para una correcta simulación del secado. Los autores concluyeron que, la solución analítica es factible y simple para la estimación de las propiedades de transferencia de masa y simulación de secado en productos con encogimiento.

Defraeye (2014) realizó una revisión exhaustiva de los modelos disponibles para la transferencia de calor y masa con enfoque para la simulación de procesos de

secado. Los modelos disponibles se pueden clasificar en tres categorías:

1. Modelos empíricos y de parámetros agrupados que no toman en cuenta la física subyacente, son producto y proceso específico.
2. Formulaciones de difusividad efectiva que agrupan todos los modos prevalentes de transporte en un solo coeficiente de difusión.
3. Multifase, multicomponente, con transferencia de masa y calor que considera a los alimento como un medio poroso.

Este ultimo enfoque proporciona una gran ventaja sobre otras modelos, ya que es fundamental en la naturaleza y por lo tanto se puede tomar en cuenta una variedad de productos y procesos sin necesidad de reformulaciones importantes (Gulati & Datta, 2015).

Curcio & Aversa (2014) propusieron un modelo de transporte multifase (transferencia simultánea de momento, calor y masa) que pudiera predecir la influencia de las condiciones de operación de alimentos, que sufren encogimiento, así como al procesos de secado. El encogimiento se determinó a partir de las dimensiones de cilindros de papa con respecto al tiempo. Los resultados de la simulación ajustaron de manera precisa con los datos experimentales, en términos de las dimensiones del alimento y contenido de humedad en base seca. Con respecto al encogimiento de las muestras, los autores concluyeron que existe una fuerte influencia de este sobre los fenómenos de transporte por lo que no debe despreciarse el encogimiento cuando se intente formular modelos de secado de alimentos.

Al igual que los modelos de transporte, los modelos matemáticos para deformación en alimentos pueden clasificarse en diferentes categorías:

1. Método de seguimiento libre en el cual se asume que el encogimiento/expansión es debido únicamente a la pérdida/ganancia y las ecuaciones de transporte son resueltas en una frontera móvil cuya posición en un momento dado se relaciona con los cambios en el contenido de humedad experimental.
2. Modelos semi-empíricos que usan encogimiento/coeficientes de expansión obtenido de mediciones experimentales, miden los cambios de volumen y relacionan a este con su deformación volumétrica.

3. Modelos de deformación que incluyen balance de momento lineal del material y uso de la ley de Hooke como la relación constitutiva entre estrés y deformación del alimento.
4. Enfoque poromecánico en el cual diferentes modos de deformación están separados unos de otros de las diferentes fases que existen dentro el sistema y la deformación del material es caracterizada por leyes constitutivas apropiadas para el sólido deformado (Gulati & Datta, 2015).

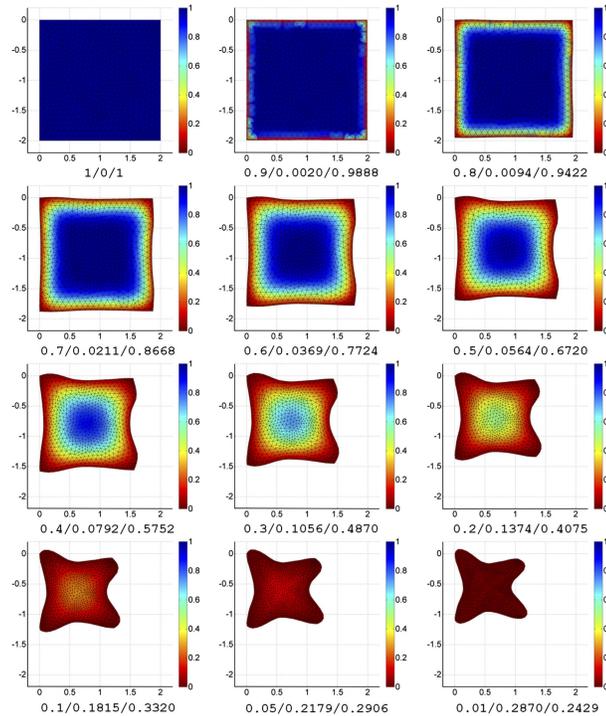
El modelo poromecánico incluye transporte multifase (matriz sólida/agua líquida/vapor) y deformación usando la relación constitutiva hiperelástica entre el estrés y la tensión. Este modelo presenta alta versatilidad para predecir textura a partir de una variedad de observaciones experimentales (encogimiento, porosidad, densidad aparente, grado de formación de costra y agrietamiento) que involucren distintas condiciones de secado (Gulati & Datta, 2015). Los autores consideraron un modelo fundamental basado en el acoplamiento físico de transporte y, el encogimiento fue desarrollado tomando en cuenta la transición de fases gomoso-vítreo durante el secado de alimentos.

En otro estudio (Aprajeeta *et al.*, 2015), enfocado en el secado convectivo de rebanadas papas a 62 °C por 7 h, buscaron la predicción y validación de los cambios de encogimiento y porosidad que ocurren junto con coeficientes de transferencia de calor y masa. Los resultados mostraron que la porosidad es menos dominante que el encogimiento pero que la combinación de estos muestran una mayor influencia en la predicción de la humedad. Por lo tanto el modelo que proponen Aprajeeta *et al.* (2015), puede ser adecuado para materiales altamente porosos como lo es la manzana.

Un modelo de secado efectivo debería reproducir tanto la forma final del producto como la velocidad en el cual un comportamiento de encogimiento-deformación ocurre. Esto lo expusieron Pacheco-Aguirre *et al.* (2015) en cuyo trabajo evaluaron un modelo de secado adimensional por actualización de malla continua basado sobre la estimación de la configuración de discrepancia mínima (ecuación 1.13) en el que se incluyó el efecto del Encogimiento-Deformación de muestras de papa sometidas a secado convectivo.

$$\frac{\ell_{ij}}{\ell_{ij0}} = (1 - s_{ij}) + s_{ij} \exp(-k\tau^n) \quad \text{para } \ell_{ij} \in \ell_{ij} \quad (1.13)$$

Para la simulación del proceso se generó una geometría inicial asumiendo un prisma cuadrado infinito con medios lados de longitud unitaria. El modelo permitió reproducir el encogimiento y deformación del producto desde el inicio del secado y hasta bajos contenidos de humedad, de acuerdo con datos experimentales finales de secado, como se muestra en los perfiles de humedad obtenidos mediante visión por computadora (Figura 1.5). La inclusión del comportamiento Encogimiento-Deformación en los modelos de secado es importante para una correcta descripción del secado siempre considerando las características del producto a evaluar (Pacheco-Aguirre *et al.*, 2015).



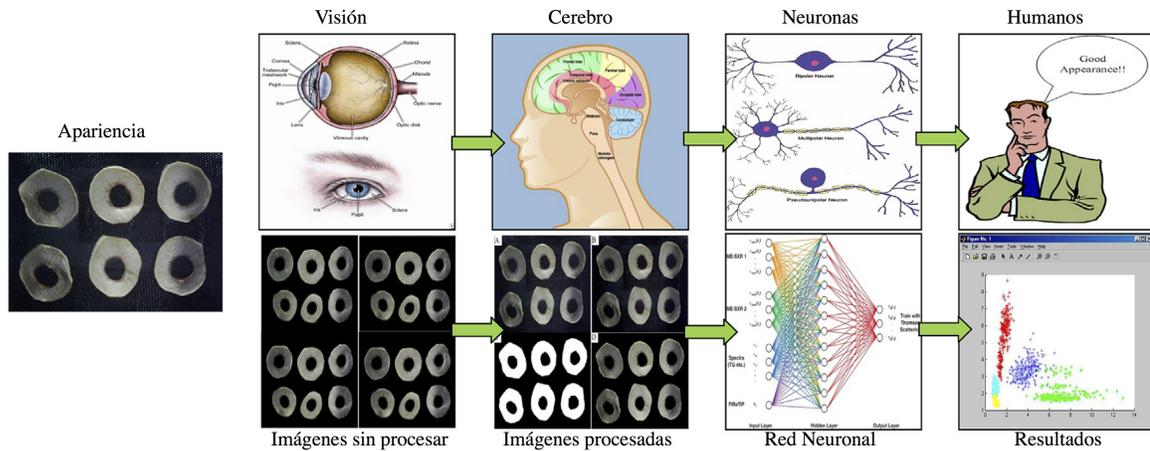
Fuente: Pacheco-Aguirre *et al.* (2015)

Figura 1.5. Perfiles de humedad predichos por el modelo de encogimiento-deformación en tiras de papa secas. Los números de abajo de cada grafica representan la fracción de humedad libre promedio (Ψ) / tiempo de secado adimensional (τ) / Área transversal normalizada (A/A_0).

1.4. Visión por computadora (VC)

El concepto de “visión” consiste en múltiples tareas del cual la identificación de objetos es solamente uno de ellos. Los problemas de visión y la identificación de objetos comparten un conjunto de mecanismos computacionales. Una definición amplia de visión por computadora debe asegurar que esta sea empleada en comportamientos generales guiados visualmente así como la identificación de objetos (Stone, 1993). Hoy en día, los sistemas de inspección automáticos basados principalmente en el uso de tecnología cámara-computadora es empleada en análisis sensorial y control de calidad de productos agrícolas y alimenticios además de que, puede cuantitativamente caracterizar tamaños complejos, formas, color y propiedades de textura de alimentos. Este sistema conocido como visión por computadora ha resultado exitoso para evaluar estos productos (Moreda *et al.*, 2012; Narendra & Hareesha, 2010; Rafiq *et al.*, 2013; Saldaña *et al.*, 2013). Los términos en inglés “machine vision”, “computational vision”, “image understanding”, “robot vision”, “scenes analysis” y hasta “image analysis” están siendo desplazados por “computer vision” (visión por computadora) (Mery, 2004). Por otra parte, visión por computadora (VC) es una tecnología ingenieril que combina mecánica, instrumentación óptica, sensores electromagnéticos, video digital y tecnología de procesamiento de imagen (Patel *et al.*, 2012). Es empleada para adquirir y analizar una imagen de una escena real por computadora u otro dispositivo con el fin de obtener información y control de máquinas o procesos intentando imitar el procesamiento y comportamiento de los sistemas biológicos; una analogía de los sistemas biológicos y artificiales se presenta en la Figura 1.6 (Aghbashlo *et al.*, 2014; Narendra & Hareesha, 2010). En el trabajo de Mery (2004) se define esta tecnología de la siguiente manera:

- Ciencia que desarrolla las bases teóricas y algorítmicas para obtener información sobre el mundo real a partir de una o varias imágenes.
- Disciplina que desarrolla sistemas capaces de interpretar el contenido de escenas naturales.
- Disciplina propia basada principalmente en las matemáticas y ciencias de la computación, consiste en hacer que un computador vea. Esto, sin embargo, es todavía un problema sin resolver.

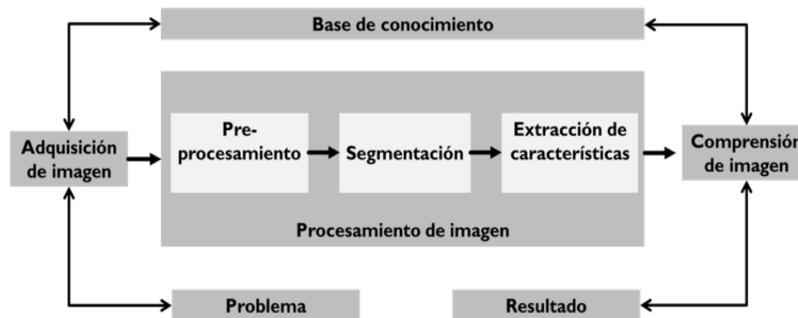


Fuente: Aghbashlo *et al.* (2014)

Figura 1.6. Analogía entre sistemas biológicos y visión por computadora .

El potencial de visión por computadora en la industria de los alimentos ha sido reconocida pero, la mayor barrera es la restricción presupuestaria. Para satisfacer la demanda de sistemas de procesamiento de imagen multipropósito, recientes avances en hardware y software han ayudado a esta expansión al ofrecer potentes soluciones de bajo costo, flexibles y repetitivos lo que lleva a un mayor número de estudios sobre el desarrollo de sistemas de visión por computadora lo que permite además, altos rendimientos en la industria sin comprometer la precisión. Estos avances se deben al desarrollo adecuado, eficiente y preciso de algoritmos de procesamiento de imagen que aceleran su velocidad. Actualmente, los sistemas de visión por computadora se están desarrollando como parte integral de las plantas de procesamiento de alimentos para evaluación de la calidad en línea, tiempo real y control de calidad. Visión por computadora incluye la captura, procesamiento y análisis de imagen como pasos esenciales facilitando la medición objetiva y no destructiva de las características visuales de calidad en productos alimenticios (Figura 1.7). El procesamiento de imagen involucra una serie de operaciones de imagen para mejorar la calidad de la misma (Brosnan & Sun, 2004; Du & Sun, 2004; Timmermans, 1995; Vyawahare *et al.*, 2013). Gunasekaran (1996) define esta serie de pasos de la siguiente manera: adquisición de imagen, preprocesamiento, segmentación, representación y descripción así como reconocimiento e interpretación. Mientras que Du & Sun (2004) mencionan que el procesamiento de imagen consta de 5 pasos funda-

mentales los que son: adquisición de imagen, preprocesamiento, segmentación de imagen, medición del objeto y clasificación. A raíz de su origen en los años 60's, la visión por computadora ha experimentado crecimiento con sus aplicaciones, expandiéndose en diversos campos no solamente en la medición de color sino también en la automatización de procesos, diagnóstico médico por imagen, automatización de fábricas, teledetección, análisis forense, etc. (Tabla 1.6) (Brosnan & Sun, 2004; Gunasekaran, 1996; Patel *et al.*, 2012).



Fuente: Narendra & Hareesha (2010)

Figura 1.7. Niveles de procesamiento de imagen.

Los sistemas de visión por computadora son una poderosa herramienta en la inspección de color, textura, tamaño, forma y algunos defectos relativamente obvios pero; tiene menos efectividad en la detección de defectos que no son claramente visibles. La visión por computadora multispectral e hiperespectral fortalecen el sistema tradicional al proveer las herramientas para detectar algunos defectos que son imposibles o difíciles de detectar (Du & Sun, 2004; Zhang *et al.*, 2014).

Son diversas las funciones de un sistema de visión por computadora, a continuación se detallan las principales:

1. Calibrar: realización de mediciones dimensionales precisas.
2. Verificación: cualitativamente asegurar que una o más características deseadas estén presentes o una o mas características indeseadas estén ausentes.
3. Detección de fallas: encontrar y discriminar características no deseadas de tamaño desconocido, localización y forma.

Tabla 1.6. Aplicaciones de la visión por computadora en diferentes áreas.

Áreas de aplicación	Propósitos
Automatización industrial y procesamiento de imagen	Control de procesos, control de calidad, mediciones geométricas. Lectura de código de barra y etiqueta de empaque, selección de objetos. Identificación de partes en líneas de ensamble, defectos e inspección de fallos. Inspección de placas de circuitos impresos e integrados.
Análisis médico de imagen	Detección de tumores, medición de tamaño y forma de organos internos, contador de células de sangre. Inspección de rayos X.
Robótica	Retiro de obstáculos por reconocimiento e interpretación de objetos en una escena, monitoreo de maquinaria. Determinación de riesgos.
Imagen de radar	Detección e identificación de objetivos, dirección de helicópteros y aviones en campo, dirección de vehículos pilotados de manera remota (RPV), dirección de misiles y satélites de señales visuales.
Industria de alimentos	Selección de vegetales y frutas, localización de defectos, ejemplo: localización de contaminantes e insectos en cereales.
Análisis de documentos	Reconocimiento de caracteres escritos a mano, reconocimiento de diseños y gráficos.

Fuente: Patel *et al.* (2012)

4. Identificación: determinar la identidad de un objeto a partir de símbolos, incluyendo caracteres alfanuméricos.
5. Reconocimiento: determinar la identidad de un objeto a partir de las características observadas del mismo.
6. Localización: determinar la localización y orientación de un objeto.

Las ventajas y desventajas de la visión por computadora se detallan en la Tabla 1.7, de acuerdo a lo expuesto por Brosnan & Sun (2004).

Un sistema de visión por computadora consiste de algunos componentes básicos los cuales son: dispositivos para adquisición de imagen, iluminación y captura de

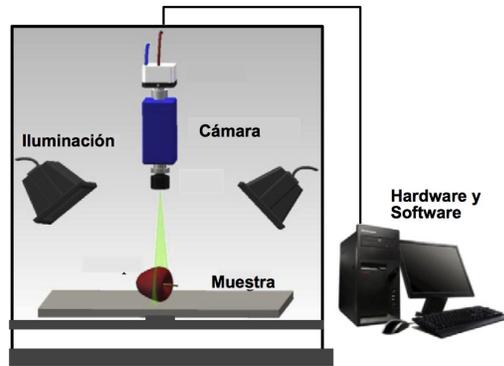
Tabla 1.7. Beneficios e inconvenientes del sistema de visión por computadora.

VENTAJAS
Generación de datos descriptivos precisos
Reducción en la participación del hombre
Consistente, eficiente y costo efectivo
La automatización de muchos procesos de trabajos intensivo
Fácil, rápido y consistente
Robusto y técnica de detección a precio accesible
Registro permanente lo que permite un análisis posterior
DESVENTAJAS
Identificación de objetos siendo considerablemente más difícil en escenas estructuradas
Iluminación artificial necesaria para condiciones de poca luz u oscuridad

imagen así como, hardware y software para el análisis de imagen. Un típico arreglo de laboratorio para procesamiento de imagen se muestra en la siguiente figura 1.8. En el se incluye: un sistema de iluminación, un conjunto de cámaras CCD (dispositivos de carga acoplada a la cámara en estado sólido) para la adquisición de la imagen, un grabador de imagen para mejorar la conversión analógico a digital (A/D) de pixeles digitalizados en coordenadas N (filas) por M (columnas) de la imagen (Brosnan & Sun, 2004; Du & Sun, 2004; Fernandez *et al.*, 2005; Narendra & Hareesha, 2010; Saldaña *et al.*, 2013).

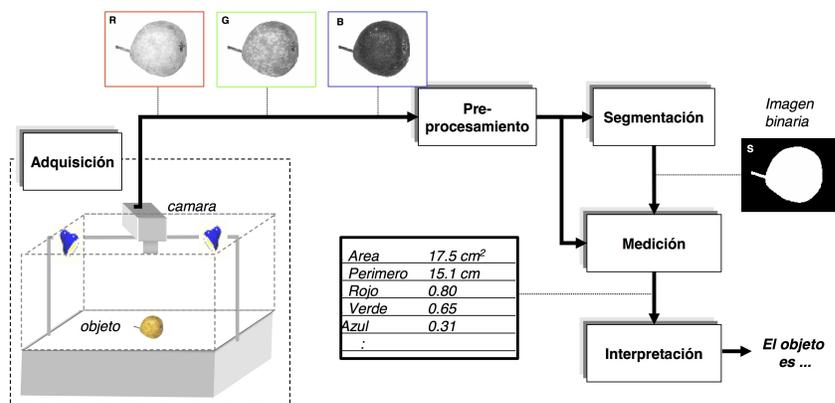
1.4.1. Adquisición de Imagen

La adquisición de una imagen es la captura de esta a su forma digital mediante el apoyo de sensores. Para una aplicación típica de la visión por computadora en la industria alimentaria, los elementos clave o básicos son los motivos visuales o descripciones de productos alimenticios en imágenes. Para propósitos de medición, primeramente la imagen de la muestra es adquirida con una calidad aceptable, este es un importante paso porque una imagen deficiente no puede proveer resultados útiles aun con la mejor infraestructura de procesamiento de imagen (Chen *et al.*, 2013; Du & Sun, 2004).



Fuente: Brosnan & Sun (2004)

Figura 1.8. Componentes de visión por computadora.



Fuente: Mery (2004)

Figura 1.9. Esquema de un proceso de análisis de imagen.

Una imagen es un arreglo o matriz de pixeles cuadrados (elementos de imagen) dispuestos en columnas y filas. Los pixeles son los componentes básicos de las imágenes. Dos tipos de información están contenidos en cada pixel, es decir, el valor de brillo y la ubicación en las coordenadas que se asignan en la imagen (Rafiq *et al.*, 2013).

Las tecnologías de imagen son herramientas invaluable en todas las áreas de mayor aplicación, particularmente por los desarrollos tecnológicos disponibles en la tecnología de cámara y poder de procesamiento del hardware de una computadora (Chen *et al.*, 2013). Las técnicas para obtención de imágenes pueden ser imágenes hiperespectrales, imagen por resonancia magnética, imagen por rayos X, imagen por

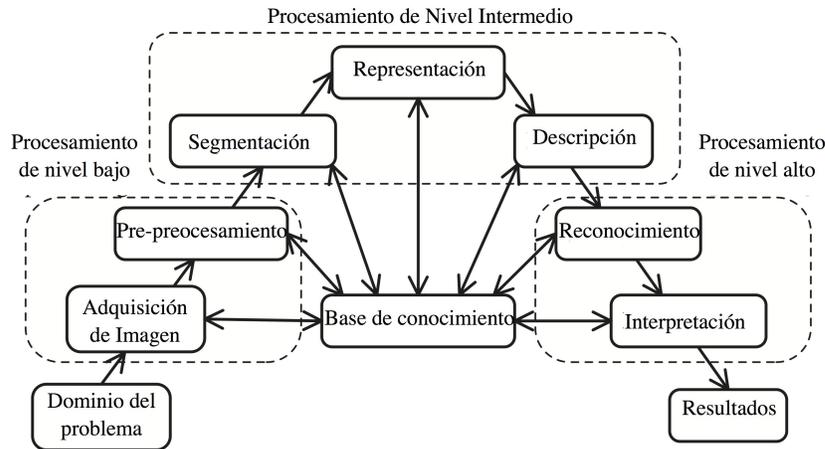
ultrasonido, imagen térmica, imagen fluorescente e imagen por olor adquiridas con CCD, imagen por resonancia magnética (MRI), tomografía computarizada (CT) y eléctrica (ET), ultrasonido, refráctómetros, etc. Los dispositivos CCD son usualmente empleados para capturar atributos externos mientras que los dispositivos MRI, Ultrasonido, CT y ET son utilizados para inspeccionar estructura interna. (Chen & Linus, 2013; Du & Sun, 2004; Gunasekaran, 1996).

Cámaras digitales Las cámaras digitales tienen incorporado un ordenador y todas ellas graban imágenes electrónicamente. En primer lugar la luz refleja en un objeto que pasa a la cámara, a través de un conjunto de lentes y sobre un espejo. De ahí, la luz llega en un pentaprisma (prisma de 5 lados). Una vez que la luz entra al pentaprisma, esta es reflejada alrededor hasta que pasa a través de un ocular y entra a nuestro ojo. al igual que una cámara convencional, se tiene una serie de lentes que enfocan la luz para crear la imagen de un objeto. Pero en lugar de centrarse esta luz en un pedazo de película, esta se centra en un dispositivo semiconductor que registra la luz electrónicamente. Entonces una computadora obtiene esa información y la convierte en datos digitales. La tecnología subyacente de la cámara digital es un sensor de luz y un programa. El sensor de luz es más a menudo un dispositivo de carga acoplado de estado sólido (CCD) y el programa es el firmware que está incrustado directamente en la placa de circuito de la cámara. El CCD es como una red de millones de pequeños cuadrados, cada una como una especie de celda solar. Cada uno de esos pequeños cuadrados en el CCD toma energía de la luz y la convierte en energía eléctrica. Cada condición de la luz - como el brillo y la intensidad - genera una carga eléctrica específica. Estas cargas para cada pequeña cuadro son transportados a través de una de gama de productos electrónicos a donde puede ser interpretado por el firmware. El firmware sabe lo que significa cada carga específico y traduce la información que incluye el color y otras cualidades de la luz que el CCD registró. Este proceso se realiza para cada una de las casillas de la cuadrícula del CCD. El siguiente paso es que el firmware registre la información que obtuvo en código digital. Ese código puede ser utilizado para reproducir con precisión la imagen en tiempo y así sucesivamente. Ahora, este código se pasa a la pantalla de la cámara, a un monitor o a una impresora para la reproducción. En esencia, una imagen digital es sólo una larga serie de 1s y 0s que representan todos los pequeños puntos de color - o pixeles - que en conjunto conforman la imagen (Vyawahare

et al., 2013). El número total de píxeles está determinado por el tamaño de arreglo en 2D usado en la cámara. Las cámaras más comúnmente usadas son aquellas con una resolución espacial de 512×480 o de 640×480 . Para óptimos resultados es importante igualar la resolución espacial de la cámara con la tarjeta del procesador del sistema de visión (Gunasekaran, 1996). Se recomienda una cámara digital con una mínima resolución de 1600×1200 píxeles, lo que es equivalente a una cámara de 2.1 megapíxeles o superior. La cámara también debe tener función macro y el zoom. Una tarjeta de memoria de al menos 32 Mb y un lector de película digital también son útiles para almacenar los archivos de imagen y transferirlos al ordenador (Yam & Papadakis, 2004). Al igual que con el ojo, los sistemas de visión se ven afectados por el nivel y la calidad de la iluminación. Por lo tanto, el rendimiento del sistema de iluminación puede influir en gran medida la calidad de imagen y juega un papel importante en la eficiencia global y la precisión del sistema (Vyawahare *et al.*, 2013). El formato de las imágenes, que serán almacenadas para procesamiento subsecuente, puede afectar el análisis de las mismas. Los formatos de compresión tales como grupo mixto fotográfico (JPEG), toma ventajas de las limitaciones inherentes del ojo humano para rechazar información no apreciable esto lo hace útil en aplicaciones donde el tamaño de la memoria de almacenamiento es relevante. Sin embargo, este formato genera algo de ruido reduciendo la información disponible en la imagen, esto dificulta el procesamiento de la imagen. Formatos que no reducen la calidad de la imagen son Formato de archivo informático para imágenes (TIFF) o formato de mapa de bits (BMP), son recomendables donde la pérdida de información es un factor importante (Saldaña *et al.*, 2013).

1.4.2. Análisis y procesamiento de la imagen

Después de la adquisición de imágenes, el proceso de conversión de estas a la forma numérica se llama digitalización. En este proceso, una imagen se divide en una cuadrícula bidimensional de pequeñas regiones que contienen elementos de imagen definidos como píxeles mediante el uso de una placa de procesamiento de visión llamado, digitalizador o capturadora. La selección de la captura de imágenes se basa en la salida de la cámara o escáner, nivel de resolución gris y espacial requerida así como la capacidad de procesamiento de la propia placa del procesador. Dos métodos de preprocesamiento de imagen: pixel y pre-procesamiento local,



Fuente: Zhang *et al.* (2014)

Figura 1.10. Diferentes niveles de procesamiento de imagen.

pueden ser utilizados para mejorar la calidad de una imagen. También, adquisición y pre-procesamiento de imagen son clasificados por algunos autores como procesamiento de bajo nivel mientras que el procesamiento de nivel intermedio y alto son las etapas posteriores para integrar las etapas de pre-procesamiento en un dispositivo de aplicación de grado o clasificación (Figura 1.10) (Brosnan & Sun, 2004; Du & Sun, 2004; Gunasekaran, 1996; Narendra & Hareesha, 2010; Vyawahare *et al.*, 2013; Zhang *et al.*, 2014). El procesamiento de nivel bajo se trabaja directamente con las imágenes para extraer propiedades como orillas, gradiente, profundidad, textura, color, entre otras (Sucar & Gómez, 2011). El pre-procesamiento de la imagen implica reducción de ruido, corrección geométrica, corrección del nivel de grises y corrección de desenfoque (Brosnan & Sun, 2004; Gunasekaran, 1996; Zhang *et al.*, 2014).

El procesamiento de nivel intermedio involucra a la segmentación, representación y descripción de los elementos de la imagen obtenidos en el nivel bajo. la segmentación de imagen representa el proceso de cortado, adición y análisis de las características de la imagen destinadas a dividir esta en regiones o contornos que tienen fuerte correlación con objetos o áreas de interés usando el principio de análisis de matriz. La segmentación puede ser realizada por las siguientes técnicas: umbralización, segmentación basada en frontera, segmentación basada en regiones y segmentación basada en la clasificación. La técnica de umbralización es usada para caracterizar regiones de la imagen basadas en reflectividad constante o absorción

de luz en la superficie. Este muestra que regiones con las mismas características son agrupadas y extraídas de manera simultánea. La figura muestra el proceso de umbralización donde solamente la región mas oscura es de interés, las otras regiones son convertidas al color del fondo de la imagen. Este proceso es usado en la clasificación de alimentos basada en color (para madurez) y características (como defectos o detección de daños) (Brosnan & Sun, 2004; Du & Sun, 2004; Moreda *et al.*, 2012; Narendra & Hareesha, 2010; Zheng *et al.*, 2006).

La segmentación basada en frontera se apoya de la detección por operadores contorno a contorno, el cual detecta discontinuidad en el nivel de grises, pixel, color, textura, etc. La detección por contorno se usa en la selección de alimentos por forma y tamaño. La segmentación basada en regiones o áreas, agrupa y extrae de manera conjunta pixeles de algun espacio de color para formar regiones que representen objetos individuales dentro de la imagen . Este proceso elimina las otras regiones dejando solo las de interés (Du & Sun, 2004; Narendra & Hareesha, 2010). En la Figura 1.11 se ejemplifica la segmentación de imagen basada en umbral, frontera y región.

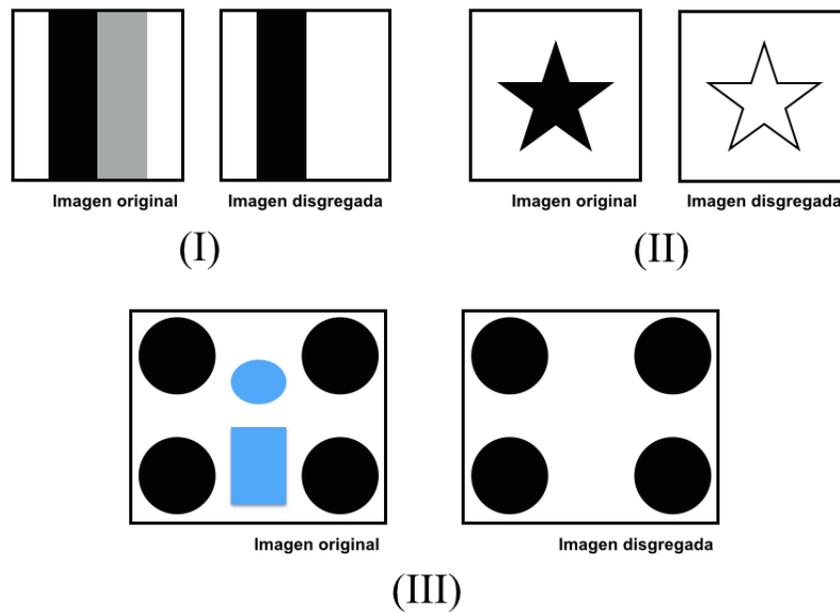
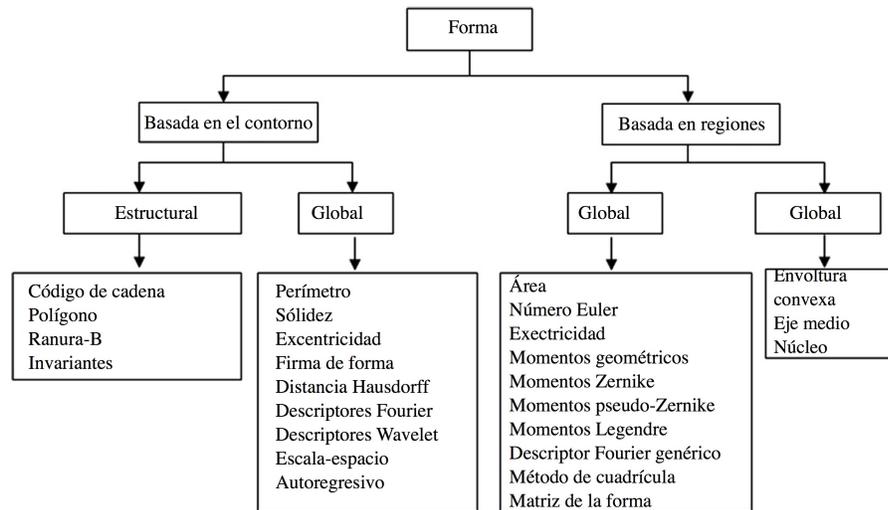


Figura 1.11. Segmentación basada en umbralización(I), frontera (II) y regiones (III).

La descripción de la forma en dos dimensiones y técnicas de representación pueden ser ampliamente divididas en “basada en contorno” y “basada en región” (Fi-

gura 1.12). La primera técnica requiere que la forma tenga un límite continuo y por lo tanto, extraer sus características a partir de esta frontera. Mientras que, la técnica basada en región relaciona la forma con el contenido interno. Algunas de las técnicas basadas en región son momentos y transformada del eje medio (MAT); para las técnicas basadas en el contorno o límite se tiene las siguientes: curvas Bézier, curvas de Fourier, ondícula y análisis fractal (Moreda *et al.*, 2012).



Fuente: Moreda *et al.* (2012)

Figura 1.12. Clasificación de representación de forma en 2D y técnicas de descripción.

La técnica de segmentación basada en clasificación divide la imagen de acuerdo a métodos estadísticos asignando cada pixel a diferentes objetos. En la inspección de calidad de frutas y vegetales, esta técnica tiene aplicaciones limitadas debido a su sensibilidad de variaciones de escala y rotación desde un punto de vista estructural (Du & Sun, 2004; Zhang *et al.*, 2014).

El procesamiento de alto nivel de acuerdo con el reconocimiento e interpretación, típicamente usa clasificadores estadísticos y redes neuronales de regiones de interés. Estos pasos proveen información necesaria para el proceso o control de equipos y en la calidad de selección y clasificación (Brosnan & Sun, 2004; Narendra & Hareesha, 2010).

Los prerequisites de cualquier aplicación de sistemas de VC deben permitir que las características a medir puedan ser mostradas en la imagen. Un sistema de ilu-

minación bien diseñado puede ayudar a mejorar la precisión y éxito del análisis de imagen al mejorar el contraste de la imagen. Adecuada iluminación permite mejorar la discriminación de características, reducir el tiempo de procesamiento y así como los requerimientos de procesamiento del hardware. Muchas aplicaciones generales de visión por computadora son implementados usando, iluminación incandescente o fluorescente (Gunasekaran, 1996). Cuando el objeto bajo inspección es traslucido o cuando la información es obtenida de un análisis de su contorno se puede emplear el método de contraluz el cual consiste en colocar el objeto entre la luz y la cámara (Saldaña *et al.*, 2013).

Más de un software puede ser empleado para analizar un archivo de imagen que se genera después del escaneo digital o toma de fotografía tanto para los parámetros de color y para la reflectancia como la luminosidad (Tillett, 1990; Timmermans, 1995). Los avances en la fotografía digital, escáneres de escritorio y el software para el procesamiento de imágenes en color proporcionan un método rápido, imparcial y automatizado para la estimación de los parámetros colorimétricos de muestras coloridas. Algunos de los softwares que se utilizan en el secado de alimentos son: Matlab (Hosseinpour *et al.*, 2015; Ortiz-García-Carrasco *et al.*, 2015; Pacheco-Aguirre *et al.*, 2015), Imaje J (Kurozawa *et al.*, 2012), Compsol Multiphysics (Defraeye, 2017; Defraeye & Verboven, 2017; Gulati & Datta, 2015), Visual Basic (Yadollahinia *et al.*, 2009).

Las cuatro clases más comunes empleadas en la determinación de características de objetos a partir de una imagen son tamaño, forma, color y textura. Mientras que para reflejar el tamaño de un producto, el área, perímetro, longitud y ancho son las medidas empleadas para ello. Las características de forma pueden ser independientes, o una combinación de las mediciones de tamaño. Los descriptores de Fourier y momentos invariantes son dos categorías usadas para describir la forma los cuales, son independientes de la medición de tamaño. Estadísticos son los principales métodos para describir textura mientras que otros métodos se basan en espectro de Fourier, transformada wavelet y fractal (Du & Sun, 2004).

El color juega un papel muy importante en la percepción visual. El ojo humano puede discernir miles de tonos de color e intensidades en comparación con sólo 24 tonos de gris, aproximadamente. Visión por computadora se beneficia de la información de color, sobre todo al reconocer escenas naturales. En los análisis de imagen automatizados, el color es un poderoso descriptor que frecuentemente simplifica la

identificación de objetos y la extracción de una escena (Gunasekaran, 1996).

Tres modelos de color pueden ser usados para definir el color. El modelo RGB (rojo, verde y azul), el modelo CMYK (cyan, magenta, amarillo y negro) y el modelo $L * a * b^*$. Mientras estos modelos de color son útiles, sus limitaciones deben ser comprendidas (Vyawahare *et al.*, 2013). Los modelos RGB y $L * a * b^*$ son comúnmente aplicados en la cuantificación de colores estándares de alimentos (Saldaña *et al.*, 2013).

Algunos autores han empleado el uso de cámaras digitales en asociación con software para obtener datos que conlleven a calcular el datos estructurales como el encogimiento de frutas y vegetales que son sometidos a secado convectivo. Kurozawa *et al.* (2012) emplearon una cámara digital y el software imageJ para obtener datos de encogimiento. Los autores analizaron las imágenes por segmentación, acorde a los siguientes pasos: a) conversión del color de la imagen a escala de grises; b) conversión en imagen binaria, necesaria para identificar el área medida por el software. En la siguiente sección se comenta más a detalle el trabajo de estos autores así como una evaluación de otros trabajos donde se emplea VC durante procesos de secado convectivo en alimentos.

1.5. Determinación de cambios estructurales en alimentos mediante visión por computadora (VC)

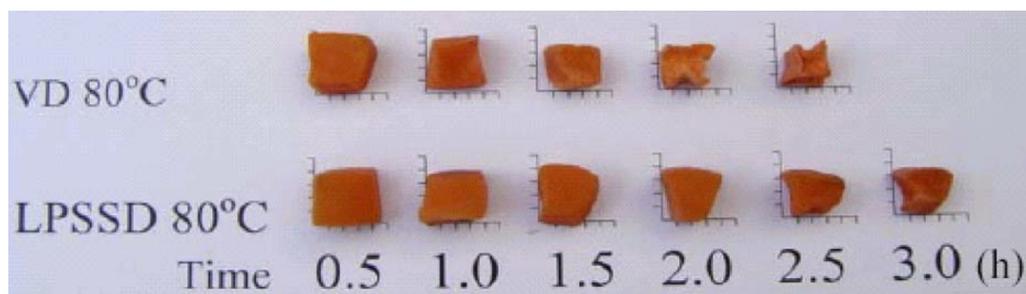
Cualquier intento para caracterizar el comportamiento en el secado debe inevitablemente medir parámetros de estructura así como de composición del producto a secar. La determinación de parámetros y/o características de los alimentos pueden determinarse por mediciones directas o por protocolos de visión por computadora.

Diversos trabajos relacionados con el secado convectivo de alimentos han establecido protocolos de VC para determinar y evaluar características y propiedades del producto en cuestión como función del contenido de humedad. Un sistema de adquisición de imagen estandarizado fue desarrollado por Fernandez *et al.* (2005) como apoyo en el análisis del efecto de secado sobre el encogimiento, color y textura de discos de manzana. El método de visión por computadora fue adecuado para representar factores de calidad más que parámetros de proceso (velocidad de secado y contenido de humedad). Los autores emplearon dos cámaras digitales pa-

ra la obtención de imágenes de las muestras las cuales estuvieron colocadas sobre un fondo negro. Las imágenes, con una resolución de 1024×768 pixeles y escala 165 pix : 1 cm, fueron almacenadas en formato JPEG.

La viabilidad de un sistema de visión por computadora (SVC) como una herramienta en línea precisa para un secado de alimentos ha sido demostrada en el trabajo de Martynenko (2006). Los autores evaluaron variables de estado como el encogimiento, color y textura además de la relación encogimiento/contenido de humedad de raíces de ginseng empleando para ello un CCD compacto y portable y el análisis de imagen se realizó con el software LabView 7.0 y IMAQ™ 6.1. las imágenes obtenidas después del secado fueron segmentadas por umbralización y convertidas a imágenes binarias. El área de encogimiento fue identificada por atributos morfológicos presente en la imagen. En general, los datos extraídos del análisis de imágenes representan tanto los factores de calidad percibidos por los consumidores (color, textura) como los parámetros del proceso (contenido de humedad, velocidad de secado), importantes para el desarrollo de tecnologías de secado "inteligentes".

Otros trabajos describen el encogimiento de alimentos solamente en términos de su magnitud pero fallan al describirlos en términos de patrones, en otras palabras, de como la deformación ocurre en el alimento durante el secado. De acuerdo a esto, tanto las condiciones como el método de secado influyen sobre los patrones de encogimiento o deformación. La conclusión de Panyawong & Devahastin (2007), refleja un interés en refinar la técnica para evaluar el área proyectada de las muestras de secado. Técnicas como el análisis de imagen resultan mas útil y con resultados más precisos.



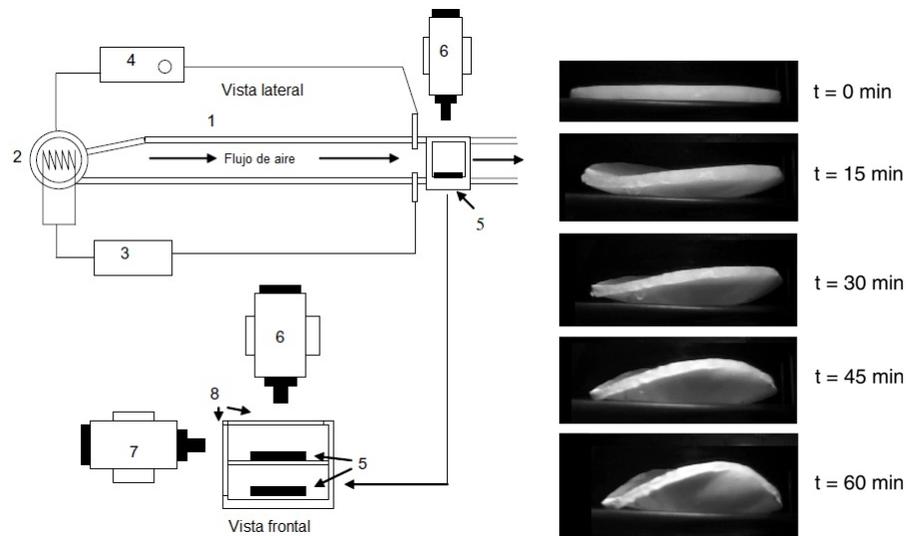
Fuente: Panyawong & Devahastin (2007)

Figura 1.13. Secado de cubos de zanahoria sometidos a secado al vacío y vapor sobrecalentado a baja presión a temperatura de 80 °C.

La dimensión fractal es una alternativa para caracterizar una imagen digital de alimentos durante el secado. Campos-Mendiola *et al.* (2007) evaluaron esta alternativa para obtener información del encogimiento no-isotrópico en placas de papa durante el secado convectivo así como los perfiles de interfase sólido-gas generados por medio de un análisis de imagen y geometría fractal. Las placas de papa (rodajas) fueron sometidas a secado convectivo, previa inmersión en solución de escaldado, con un diseño experimental de tres factores: temperatura (40-70 °C), velocidad de aire (1-2.5 m/s) y grosor (1 - 4 mm). Ellos estimaron el encogimiento/deformación mediante captura de imágenes digitales de las vistas lateral y superior de la muestra empleando para ello dos cámaras (Figura 1.14a). Se registraron valores adimensionales del área proyectada lateral de placas de papa ($A_{lat t} / A_{lat 0}$) como indicador de un comportamiento encogimiento/deformación no isotrópico y el valor fue correlacionado con la pérdida de humedad de la muestra. La dimensión fractal se calculó a partir de la imagen superior el cual mostró un perfil de interfases sólido-aire. Los resultados de este trabajo arrojaron valores altos del área lateral proyectada (A_{lat}) en comparación con el área de muestra inicial ($A_{lat 0}$); en las imágenes laterales obtenidas durante el secado se aprecia una forma rectangular elongada el cual presenta una curva desde los 15 min de secado (Figura 1.14b). El análisis de imagen resulta ser un excelente apoyo en la obtención de valores de encogimiento de alimentos sometidos a secado convectivo pero la captura y análisis de imagen en proyecciones donde no es dominante la transferencia de masa no es recomendable como indicador de una deformación del alimento.

Santacruz-Vázquez *et al.* (2008) en su trabajo de secado de rodajas de manzana emplearon el análisis fractal para la determinación de datos, en el cual se encontró que las temperaturas, velocidad del aire y tiempo de secado influyeron sobre la deformación y generaron encogimiento macroscópico no lineal asociado a daño microestructural irregular. Aunque el análisis de imagen y dimensión fractal provee ciertas ventajas para estudiar procesos de hidratación así como como para estudiar el encogimiento y fenómeno de deformación durante el secado de tejidos vegetales, una serie de fenómenos como el proceso de transferencia de masa que toma lugar en diferentes direcciones de la rodaja presentan un comportamiento mas fractal (irregular) de las muestras.

La comparación de diversos métodos de medición del volumen para la determinación de encogimiento, durante el secado de plátano, piña y rebanadas de mango



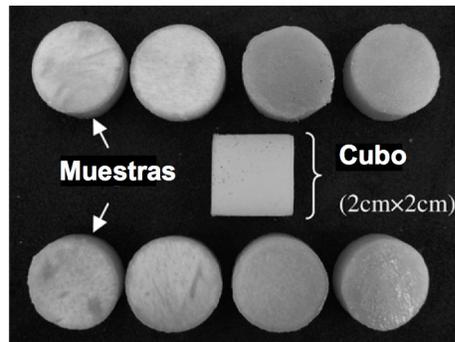
- (a) 1. Secador de túnel; 2. Ventilador y calentador; 3. Controlador de temperatura del flujo del aire; 4. Flujo de aire; 5. Sección de prueba y muestra; 6. Cámara digital superior; 7. Cámara digital lateral y 8. Ventana para captura de imágenes.
- (b) Imagen lateral de una placa de papa a diferentes tiempos de secado ($T = 55^\circ\text{C}$, $u = 1.7\text{ m/s}$, $L = 2.5\text{ mm}$).

Fuente: Campos-Mendiola *et al.* (2007)

Figura 1.14. Diagrama de secador experimental e imagen lateral de placa de papa implementados en la metodología SAFES.

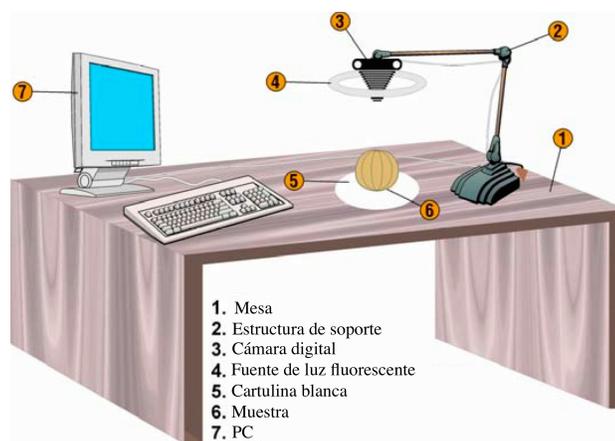
fue reportada por Yan *et al.* (2008). Mediante un análisis de imagen se obtuvieron los valores del diámetro y perímetro de las muestras así como la descripción de cambios estructurales de frutas durante el secado. Un cubo de dimensiones conocidas ($2 \times 2\text{ cm}$) fue fotografiado junto con las muestras con la finalidad de poder realizar la conversión de píxeles a cm.

En la determinación de volumen de melón, Rashidi *et al.* (2010) midieron este a partir del desplazamiento de agua y procesamiento de imagen. Para el método de procesamiento de imagen se empleó una cámara digital, luz fluorescente como iluminante, y una computadora personal equipada con software de procesamiento de imagen (Adobe Photoshop y Visual Fortran) (Figura 1.16). El color RGB de la imagen original se convirtió a escala de grises y después a blanco y negro mediante la técnica de umbral. El contorno de la imagen se obtuvo mediante la técnica de segmentación basada en frontera. A partir del contorno, los autores calcularon el volumen usando la técnica de disco.



Fuente: Yan *et al.* (2008)

Figura 1.15. Rebanadas de piña y objeto de referencia empleados en el trabajo de Yan *et al.* (2008)



1. Mesa
2. Estructura de soporte
3. Cámara digital
4. Fuente de luz fluorescente
5. Cartulina blanca
6. Muestra
7. PC

(a) I



(b) II

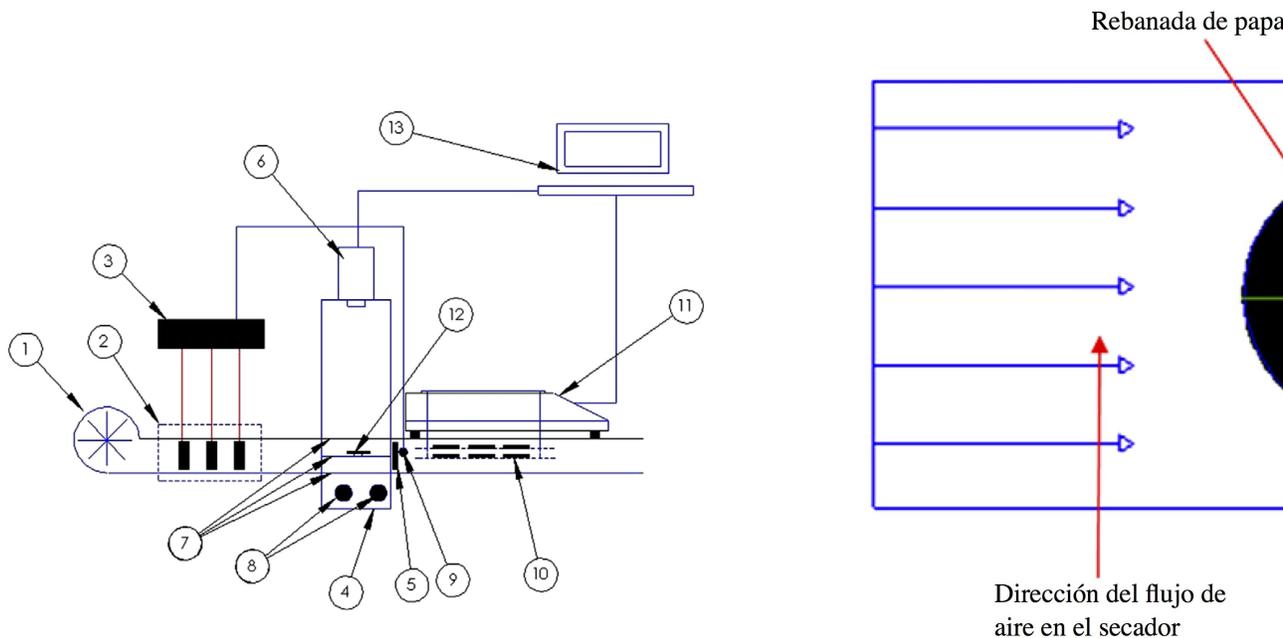
Fuente: (Rashidi *et al.*, 2010)

Figura 1.16. Sistema de adquisición de imagen (I) y procesamiento de imagen en muestras de melón (II)

Los autores concluyeron que el procesamiento de imagen provee un método adecuado, simple, rápido y no invasivo para estimar el volumen de muestras, en este caso, melón. Además de emplearse en el monitoreo del crecimiento y clasificación de frutas durante el proceso de postcosecha. La diferencia entre los métodos fue de un 7.6 % en promedio.

El encogimiento de frutas ha sido estudiado por muchos investigadores pero solo algunos documentos de estas investigaciones se enfocan en la determinación del encogimiento dimensional lineal. Yadollahinia & Jahangiri (2009) evaluaron, de manera continua durante el secado, la influencia de la temperatura y velocidad de aire sobre el encogimiento de rebanadas de papa. Durante el experimento de secado a 60-80 °C y 0.5-1 m/s, el encogimiento de la superficie fue capturada en imágenes de manera continua, usando protocolos de visión por computadora (Figura 1.17a). Después del secado todos los parámetros relacionados a la forma fueron determinados por un software de procesamiento de imagen (Visual Basic). Los autores concluyeron que la temperatura del aire tuvo un efecto directo sobre la velocidad y tiempo de secado mientras que, la velocidad de aire solo afectó la velocidad de secado al inicio del proceso. El área y perímetro se relacionaron casi linealmente con el contenido de humedad y fueron independientes de la temperatura debido a que se presentó un doblez hacia arriba de la rebanada, lo que causó que el área disminuyera más rápido y por ende presentará una forma irregular. Aunque se encontraron diferencias significativas a 60 y 70 °C para los valores de diámetro, los resultados no muestran una aplicación posterior debido a que la proyección de los diámetros se tomaron en una dirección perpendicular al transporte de masa (Figura 1.17b).

Por su parte, Gumeta-Chávez *et al.* (2011) evaluaron la influencia del tipo de corte de rebanadas de *Agave* sobre los cambios macro y microestructurales y el efecto de estos sobre la transferencia de humedad durante el secado. Secaron cortes transversales (CT) y longitudinales (CL) de discos de *Agave* posterior a los cuales se les evaluó el grosor, volumen y contenido de humedad. El encogimiento y la deformación durante el secado fueron evaluados por análisis de imágenes a partir de videocámaras conectadas a una computadora (Figura 1.18a). Los autores evaluaron, la relación del volumen con el grosor de las muestras a partir de un exponente fractal, el cual presentó un encogimiento no isotrópico tanto para los CT como para los CL. Los resultados reflejaron que los CL tuvieron mayor velocidad de secado que los CT; esto debido al papel que desempeña el arreglo de fibras en relación a



(a) 1. Ventilador; 2. Elementos de calefacción; 3. Controlador de temperatura; 4. Cámara de iluminación; 5. Sensor de velocidad del aire; 6. Cámara digital; 7. Vidrio; 8. Lámparas fluorescentes (40 W); 9. Sensor de temperatura; 10. Bandeja; 11. Balanza digital; 12. rebanada de papa; 13. PC.

Fuente: Yadollahinia *et al.* (2009)

Figura 1.17. Esquema de secado experimental y Diagrama de proyección del diámetro de la rebanada perpendicular y paralela a la dirección del flujo de aire.

la orientación del corte sobre el eje principal. El arreglo estructural de las muestras influyó sobre el encogimiento y cambio de forma, los CL fueron más resistentes a la deformación y colapso que los CT de *Agave*. De acuerdo a estos cambios los autores concluyeron que existe una relación directa de los cambios de forma con el tamaño de las células (Figura 1.18b).

El uso de un indicador general que pueda describir los cambios morfológicos de alimentos durante el proceso ha sido una propuesta de trabajo de algunos autores. Como fue el caso de Panyawong & Devahastin (2007) que emplearon el factor de forma de Heywood para determinar la deformación en cubos de zanahoria sometidos a dos métodos de secado. De la misma manera, Sansiribhan *et al.* (2012) se enfocaron en la posibilidad de desarrollar un indicador generalizado que pue-

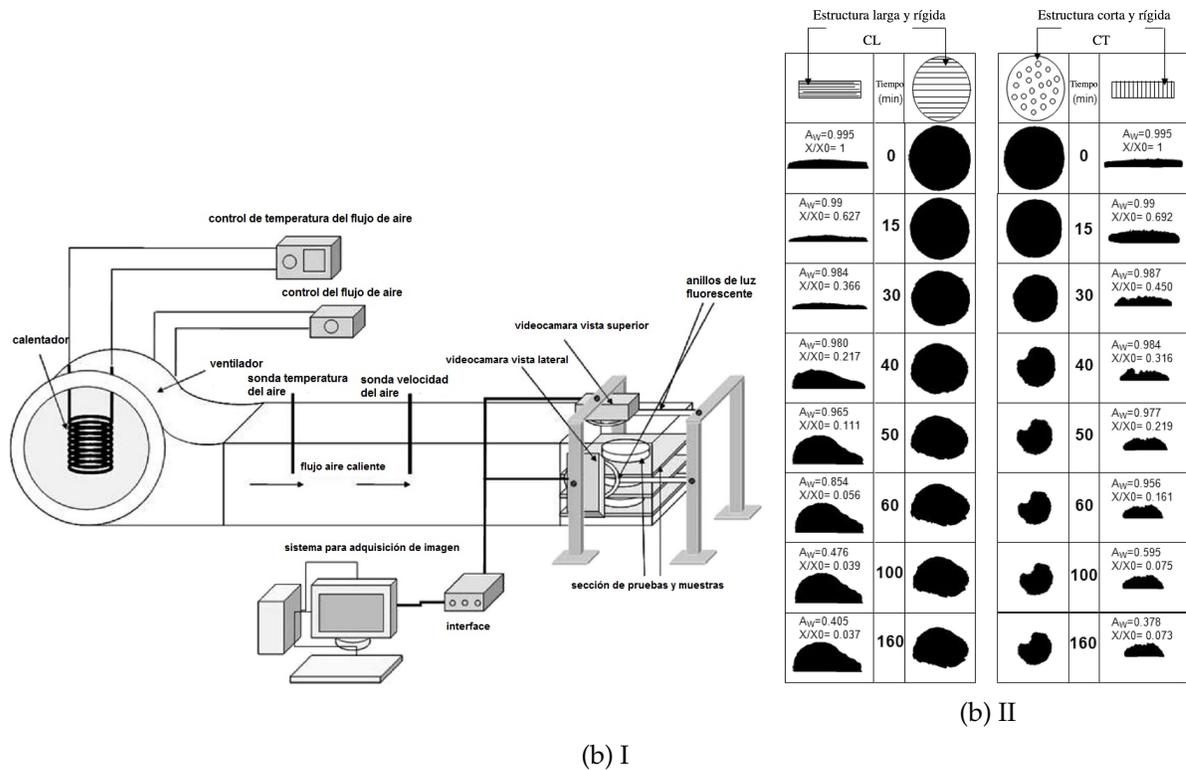


Figura 1.18. Diagrama del secador experimental convectivo (I) y galería de imágenes de discos de *Agave* como una función del tiempo de secado (II).

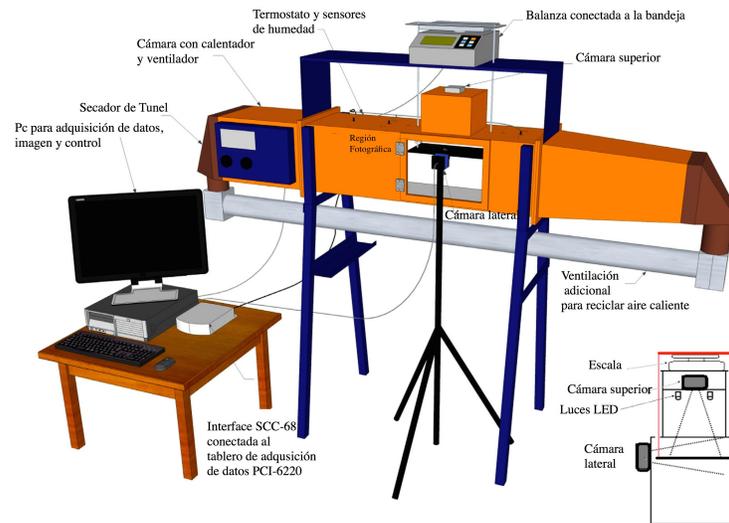
da monitorear los cambios en la microestructura de cubos de zanahoria bajo tres diferentes métodos de secado (secado por aire caliente (HAD), al vacío (VD) y con vapor sobrecalentado a baja presión (LPSSD)). El trabajo de estos autores muestra que, el indicador más generalizado en calidad-estructura fue $\Delta FD/FD_0$ con una correlación similar en los tres métodos de secado lo que resulta en un uso adecuado para monitorear en línea el proceso de secado. Además, esto permitiría que la evaluación del encogimiento volumétrico de muestras de alimentos por VC, los datos de encogimiento no solo se empleen para evaluar el contenido de humedad sino que además se determinen cuantitativamente otros datos como, dureza y cambios microestructurales. La validación y prueba de aplicabilidad del indicador deberá evaluarse con otras condiciones de secado, como la temperatura así como otros modelos alimenticios.

La influencia de la T_g sobre el encogimiento ha quedado demostrado en diversos trabajos, como lo fue el de Kurozawa *et al.* (2012), donde cubos de papaya fueron

sometidos a secado convectivo. El encogimiento fue determinado empleando para ello una cámara digital y el software ImageJ para su análisis. En este trabajo se demostró la influencia que tuvo la temperatura del aire de secado sobre T_g y encogimiento la cual fue significativa a altas temperaturas. A 70°C , $(T_p - T_g)$ es mayor por lo que en etapas iniciales del secado, donde la concentración de agua es mayor en las muestras de papaya, existe un mayor grado de encogimiento debido a la movilidad de la matriz sólida en estado gomoso. A 40°C , las muestras, inicialmente en estado gomoso, sufrieron transición de fase hacia el estado vítreo en el cual el producto se volvió rígido; la reducción de volumen fue en gran parte restringida.

El uso de VC como alternativa en la determinación de encogimiento a través de mediciones físicas también fue investigado por Sampson *et al.* (2014). Los autores emplearon un sistema dual de visión por computadora de bajo costo con iluminación estándar y lentes “ojo de pescado” como una alternativa (Figura 1.19) al método tradicional de medición (uso del vernier); para la determinación de volumen en rebanadas de manzana sometidas a secado convectivo (40 , 60 y 80°C). Las correlaciones entre el sistema de visión por computadora y las mediciones físicas (como área y grosor) fueron determinadas usando objetos inertes (como lo hicieron Yan *et al.* (2008)) para obtener mediciones correctas de las propiedades geométricas. El método de VC puede ser usado para medir el volumen de las rebanadas de manzana, aunque el volumen no fue un buen indicador del término del proceso de secado debido al desarrollo de porosidad.

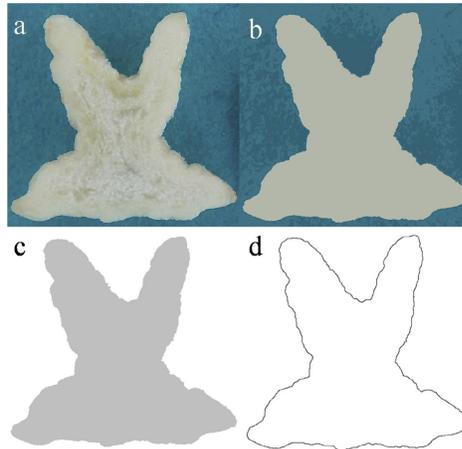
Ortiz-García-Carrasco *et al.* (2015) en su trabajo de secado de tiras de papa, validaron protocolos de VC para determinar comportamiento E-D así como simulación del proceso de secado y estimación de la difusividad de agua. Los autores desarrollaron una nueva metodología basada en análisis de imagen para determinar el encogimiento-deformación durante el proceso de secado. Ellos emplearon tiras de papa y las sometieron a secado convectivo ($50 - 80^\circ\text{C}$) a una velocidad de aire de 2 m/s . Las tiras se secaron considerando las direcciones dominantes a la transferencia de masa. Se procesaron imágenes digitales de rebanadas perpendiculares (Figura 1.20) para evaluar los cambios en forma del contorno, perímetro y área transversal y específica de las muestras (Figura 1.21). Con los datos de las curvas de secado y encogimiento, los autores estimaron la difusividad del agua en el alimento mediante una solución analítica previamente reportada por Ruiz-López *et al.* (2012). Se demostró que la temperatura de secado no afectó el comportamien-



Fuente: ?

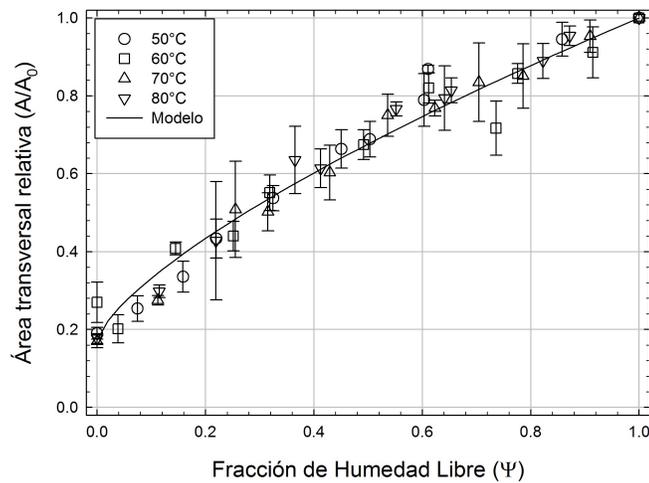
Figura 1.19. Esquema de un aparato de secado, sensores y equipos de formación de imágenes con vista en sección transversal de la región de obtención de imágenes.

to encogimiento-deformación bajo las condiciones analizadas. Los resultados cualitativos del análisis de forma del contorno promedio mostraron un encogimiento desde el inicio del secado mientras que la deformación ocurrió en las etapas finales (Figura 1.22). Ortiz-García-Carrasco *et al.* (2015) demostraron que las características de encogimiento-deformación de productos secos deben ser combinados en un solo perfil representativo y aplicarlo en simulaciones detalladas. El protocolo de VC demostró ser eficiente para determinar cambios estructurales en papa por lo que se espera reproducir este protocolo en otros modelos alimenticios además de evaluar cuantitativamente la deformación la cual no se realizó en este trabajo.



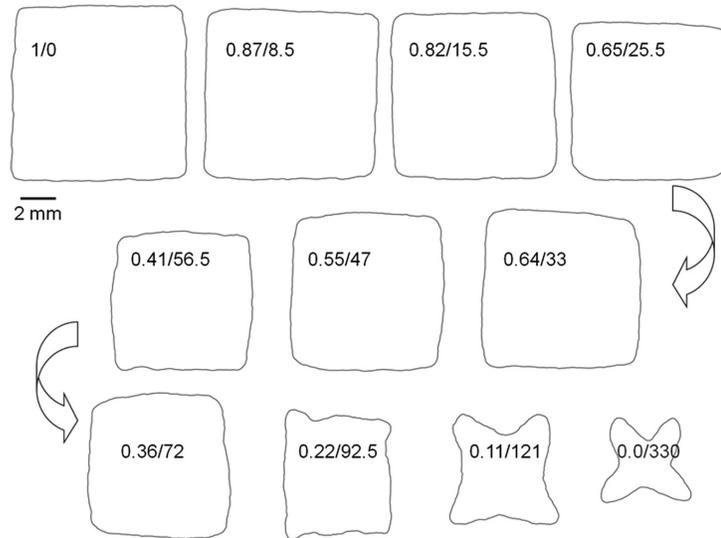
Fuente: Ortiz-García-Carrasco *et al.* (2015)

Figura 1.20. Pasos para el análisis de imagen usados para determinar deformación: (a) imagen original, (b) imagen simplificada con tres grupos de color, (c) imagen en escala de grises después de remover los grupos de color del fondo y (d) contorno del producto. Imágenes correspondientes a una rebanada de tira de papa seca en equilibrio a 50 °C (440 min). La forma del contorno inicial corresponde a un cuadrado.



Fuente: Ortiz-García-Carrasco *et al.* (2015)

Figura 1.21. Efecto del contenido de humedad sobre el área transversal relativa de tiras de papa secas.



Fuente: Ortiz-García-Carrasco *et al.* (2015)

Figura 1.22. Deformación del contorno promedio de rebanadas de tiras de papa seca (80 °C). Los números internos representan la fracción de humedad libre alcanzada en el producto/tiempo de secado transcurrido (min).

II.JUSTIFICACIÓN

Los cambios morfológicos que ocurren en un alimento durante procesos de secado se pueden determinar de manera cuantitativa mediante el uso de mediciones directas (uso del vernier, desplazamiento de volumen entre otras) así como nuevos protocolos que involucran la captura, análisis y procesamiento de imagen. Estos protocolos permiten la determinación de características y propiedades físicas para evaluar el encogimiento y cambios de forma y de esta manera poder integrarlos en el modelamiento y simulación del secado convectivo; lo que evitaría la sobreestimación de coeficientes de transferencia de masa como la difusividad y la subestimación de la velocidad de secado. La deformación del producto durante los procesos de secado impone una dificultad adicional para cuantificar su reducción de tamaño: ninguna muestra de alimento se encoge y se deforma de la misma manera, incluso en las condiciones más controladas. Indicadores de forma permiten corroborar cuantitativamente la deformación que es mostrada en imágenes.

Muchas de las metodologías reportadas no persiguen una aplicación posterior de los datos de ED en la modelación y simulación del proceso de secado. Por ejemplo, la proyección del área se mide en direcciones donde la transferencia de masa no es dominante (parte superior de rebanadas planas) o se ve afectada por la curvatura del producto en las vistas laterales de las muestras (Yadollahinia & Jahangiri, 2009; Yadollahinia *et al.*, 2009). El uso de objetos como referencia geométrica de las muestras a evaluar por VC durante el secado permiten mejorar la estimación de parámetros estructurales el cual contribuye a que la diferencia entre métodos convencionales y análisis de imagen sea menor al 8% (Rashidi *et al.*, 2010; Sampson *et al.*, 2014; Yan *et al.*, 2008).

Cabe mencionar que el desarrollo de este tema de tesis forma parte de una colaboración entre el Dr. Miguel Ángel García Alvarado del Instituto tecnológico de Veracruz y el Dr. Irving Israel Ruiz López de la Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, como parte del proyecto de Ciencia Básica “Efecto del encogimiento y deformación de micro y macro estructura sobre la evaluación de propiedades de transporte de materia en alimentos sometidos a procesos de deshidratación” y el grupo de trabajo cuenta con suficiente experiencia en la modelación, simulación y el

análisis de las operaciones propuestas (Herman-Lara *et al.*, 2010,1; Lagunez-Rivera *et al.*, 2007; Pacheco-Aguirre *et al.*, 2014; Ruiz-López & García-Alvarado, 2007; Ruiz-López & Herman-Lara, 2009; Ruiz-López *et al.*, 2004,1,1,1,1; ?; ?). Aún se desconocen varios aspectos de los fenómenos de encogimiento y deformación, como: el efecto de la geometría inicial y tipo de producto, el efecto del tipo de deshidratación, el efecto de las condiciones de proceso, si es posible predecir el mapa de deformación a través del conocimiento de una propiedad del alimento. De allí, surgen los objetivos del presente proyecto, los cuales se presentan a continuación.

III.OBJETIVOS

3.1. Objetivo general

Evaluar la dinámica de las características morfológicas de alimentos sometidos a diferentes procesos de deshidratación mediante las propiedades del producto y mapas de deformación.

3.2. Objetivos específicos

1. Caracterizar y modelar las propiedades de encogimiento y deformación de alimentos sometidos a procesos de deshidratación mediante técnicas convencionales y de análisis de imagen.
2. Evaluar el impacto de la geometría inicial, tipo de producto y condiciones de procesamiento sobre el mapa de deformación de alimentos y sistemas modelo y evaluar sus propiedades de transporte de masa.
3. Formular un algoritmo predictivo para la deformación de alimentos a partir de sus propiedades físicas.

IV.MATERIALES Y MÉTODOS

4.1. Materia prima

Para el estudio de las características de encogimiento y deformación se utilizaron diversas matrices alimenticias (Figura 4.1) como lo son: camote (*Ipomoea batata* var. Arapey), sistemas modelo en gel (SMG), mortadela (Chimex, México), papaya (*Carica papaya* L.); tanto el camote como la papaya se emplearon en fresco y con madurez comercial. El tipo del camote empleado presenta un interior de color naranja y cáscara morada. El camote y papaya se obtuvieron en el mercado local (Puebla, Pue. México) y se seco el mismo día en que fue adquirido.

4.2. Preparación de las muestras

La materia prima se lavó y seco con una toalla para después cortarla en la geometría deseada (Tabla 4.1 . Para el caso de prismas, todas las matrices antes mencionadas pasaron por un cortador de vegetales (Orion, México; 9.525 mm de abertura; Figura 4.1E) mientras que para geometrías de medios y cuartos de cilindro se emplearon tubos de PVC (SMG) y cortador de corcho de $15/16$ pulgadas (muestras de papaya). En el caso de SMG, estos se prepararon al disolver 5 % (p/p) de agar (MCD Lab., México) y 20 % (p/p) de sacarosa en agua destilada. Las soluciones fueron homogenizadas con agitación baja por 15 minutos a 50°C. El calentamiento final de la solución de agar se llevo a cabo usando una olla de presión por 15 min a 121°C. La solución caliente fue vertida en moldes, se dejo enfriar a temperatura ambiente y posteriormente se cortaron en las geometrías deseadas (ver Figura 4.2) para después prepararlos para secarlos el mismo día.

4.3. Experimentos de secado

Los experimentos de secado se llevaron a cabo empleando 25 muestras que fueron colocadas en una bandeja abierta de malla soldada de acero inoxidable (dimensiones: 25 cm×20 cm, abertura: 0.45 cm × 0.50 cm, diámetro del alambre: 0.07 cm)

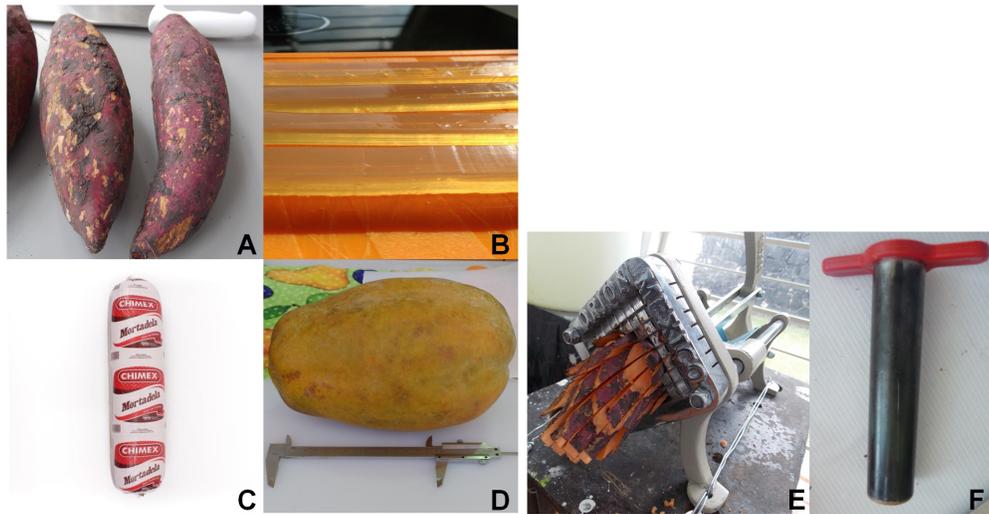


Figura 4.1. Matrices alimenticias y herramientas de corte empleadas: A=Camote; B=SMG; C=Mortadela; D= Papaya; E=Cortadora de vegetales; F=Perforador de corcho No. 8.

Tabla 4.1. Geometrías y dimensiones establecidas durante la preparación de muestras.

Matriz alimenticia	Geometría	Dimensiones
Camote	Prismas	9.53 mm × 9.53 mm × 80 mm
	Prismas	9.53 mm × 9.53 mm × 80 mm
SMG	Medio cilindro	12.7 mm diámetro × 140 mm de longitud
	Cuarto de cilindro	
Mortadela	Prismas	9.53 mm × 9.53 mm × 80 mm
	Prismas	9.53 mm × 9.53 mm × 70 mm
Papaya	Medio cilindro	24 mm diámetro × 70 mm de longitud
	Cuarto de cilindro	

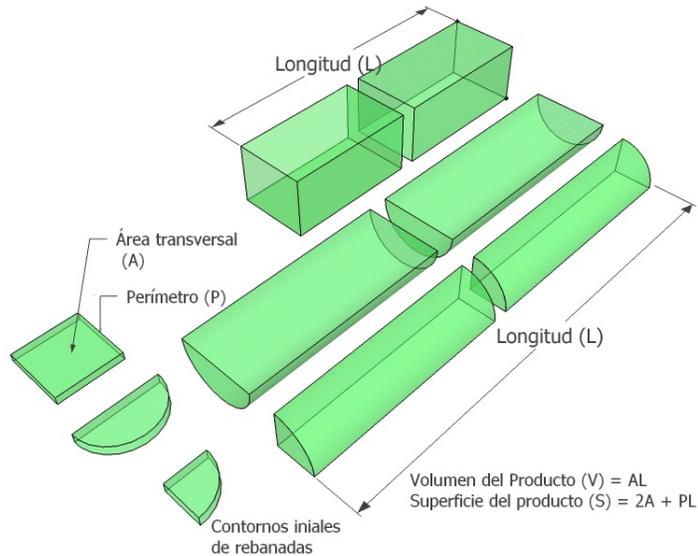


Figura 4.2. Vista esquemática de las geometrías empleadas y características relevantes.

en un secador de tunel (Armfield UOP8, Ringwood, UK) con flujo de aire paralelo a la dimensión mas larga del producto (Figura 4.3). Todas las geometrías se secaron de acuerdo a lo establecido en la Tabla 4.2, con una velocidad de aire de 2 m/s (humedad relativa = 5%). La velocidad de aire y dimensiones del producto fueron seleccionadas de acuerdo a lo siguiente: (1) un proceso de difusión controlado (resistencia externa despreciable a la transferencia de masa) acorde al analisis presentado por Pavón-Melendez *et al.* (2002) y (2) transferencia de masa en dos dimensiones con encogimiento el cual ocurre casi exclusivamente a lo largo de las menores dimensiones del producto. El uso de una velocidad de aire alta también favorece la suposición de propiedades del aire constante. Dos grupos de experimentos de secado fueron conducidos para obtener el comportamiento Encogimiento-Deformación (ED) como una función de su contenido de humedad. Las curvas de secado fueron obtenidas con el primer grupo de experimentos donde la evolución de la humedad fue calculada por registro continuo del peso del producto en todo el proceso. Los tiempos de muestreo fueron calculados para cada fracción de humedad libre alcanzada ($\Psi = 0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 0.6, 0.7, 0.8$ and 0.9) por interpolación a partir de las curvas de secado. En el segundo grupo de experimentos, se secaron grupos de 5 muestras durante un tiempo de muestreo predeterminado (estimado durante el primer grupo de experimentos). Después, una rebanada transversal (perpendi-

cular a la dimensión más larga) de aproximadamente 1 mm de grosor fue cortada con una cuchilla afilada en la parte central de la muestra e imágenes digitales de las rebanadas obtenidas fueron inmediatamente obtenidas. Porciones sobrantes de los productos se emplearon para determinar su contenido de humedad. El procedimiento anterior también se aplicó a muestras frescas ($\Psi=1$) y secas en equilibrio ($\Psi=0$). Un total de 11 grupos de 5 muestras (55 especímenes) se analizaron de esta manera para evaluar los cambios en la forma del producto a lo largo del secado para cada geometría y/o temperatura.

El contenido de humedad requerido fue determinado al secar muestras en una estufa (Binder ED 53, Alemania) a 105°C hasta peso constante. El contenido de humedad inicial de los productos se muestran en la Tabla 4.2 (media \pm s.d.).

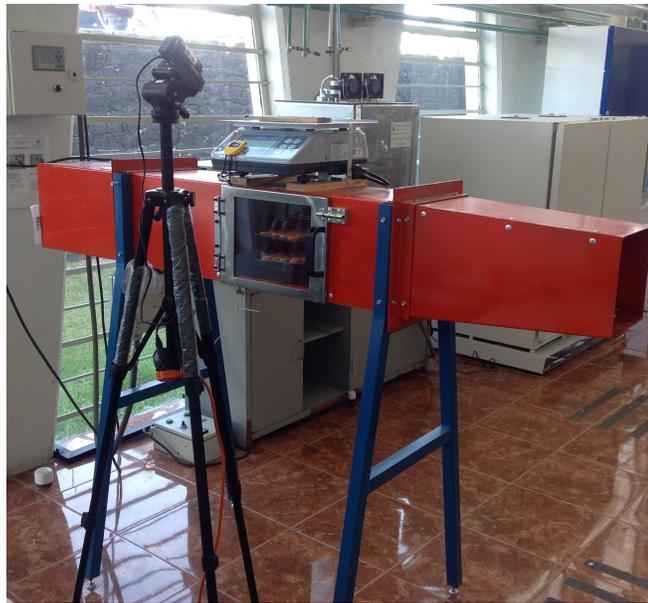


Figura 4.3. Montaje empleado para obtener cinéticas de secado.

4.3.1. Adquisición y análisis de imagen

Las rebanadas de muestras fueron colocadas en un papel azul para mejorar el contraste y así dar paso a la extracción del fondo. Como objeto de referencia, se usó una arandela de metal anodizado negro (0.58 cm de diámetro). No se utilizó iluminación especial ya que no era necesaria la estandarización de los colores entre

Tabla 4.2. Condiciones de secado: temperatura, tiempo y humedad inicial de muestras.

Matriz alimenticia	Temperatura (°C)	Tiempo (min)	Humedad inicial (g de agua/100 g de producto)
Camote	60, 70 y 80	330-450	68.40±0.95
SMG	70	380-500	72.69±2.02
Mortadela	60, 70 y 80	905-1280	63.34±0.58
Papaya	70	380-470	92.67±0.55

las imágenes. Una cámara digital (Coolpix L810, Nikon Corp., Japan) fue colocada con su línea de visión normal a la superficie del producto. Se utilizó una distancia focal de aproximadamente 10 cm, ajustes automáticos y modo macro (Figura 4.4). Las imágenes digitales fueron almacenadas en formato JPEG a la máxima resolución disponible (4608 × 3456 píxeles). Un esquema de la configuración experimental para la adquisición de imágenes es descrita en un trabajo previo (Ortiz-García-Carrasco *et al.*, 2015). La información de color obtenida de las imágenes fue transformada a un espacio de color CIELAB para su análisis. La extracción del fondo se llevó a cabo mediante la cuantificación de los datos de color a 3 colores descriptivos dominantes utilizando el algoritmo de agrupación de k-medias (Press *et al.*, 2007) además de aplicar una máscara en primer plano a la imagen resultante. La imagen cuantificada sin fondo se transformó a un formato de escala de grises para después obtener las coordenadas límites del producto (400-600 puntos) que integran la imagen del contorno. El área transversal y perímetro se calcularon para cada muestra. Todas las operaciones de análisis de imagen fueron realizadas con la herramienta de procesamiento de imagen 7.0 de Matlab (Matlab R2010a, MathWorks Inc., Natick, MA, USA).

4.4. Modelado de las características de encogimiento

La modelación de las características de encogimiento se llevó a cabo considerando un área de sección transversal constante (A) a lo largo de la mayor dimensión (L). El volumen se estimó como la cantidad AL (Figura 4.2). También se cálculo la

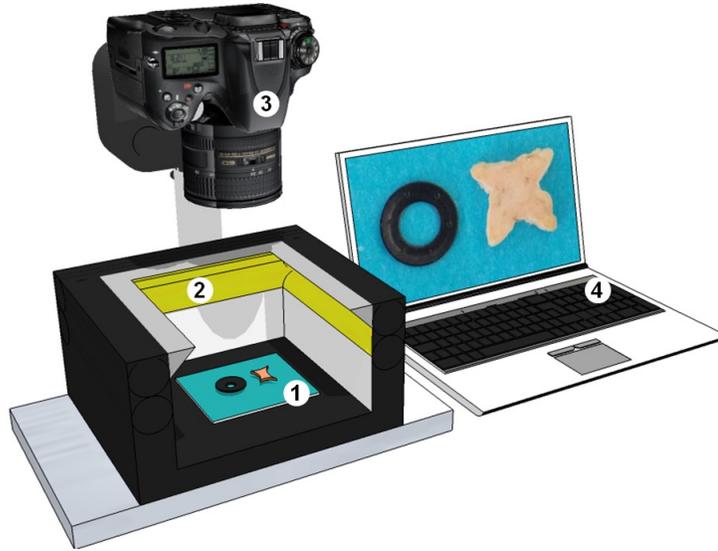


Figura 4.4. Sistema de visión por computadora para adquisición de imagen: (1) muestra y objeto de referencia, (2) sistema de iluminación, (3) cámara digital y (4) software y hardware.

superficie total de la muestra (S), la cual se expresa como la suma de las caras lateral (PL) y menores ($2A$). La siguiente ecuación se puede utilizar para estimar el área específica (considerando que $PL \gg 2A$).

$$a = \frac{S}{V} = \frac{PL + 2A}{AL} \approx \frac{PL}{AL} = \frac{P}{A} \quad (4.1)$$

De esta forma, los cambios en las variables P y A son proporcionales a la superficie de transferencia de masa y al volumen del producto si el encogimiento se hace despreciable a lo largo de la mayor dimensión, así que

$$\frac{S}{S_0} \approx \frac{PL}{P_0L_0} \approx \frac{P}{P_0} \quad (4.2)$$

$$\frac{V}{V_0} \approx \frac{AL}{A_0L_0} \approx \frac{A}{A_0} \quad (4.3)$$

Se propusieron los siguientes modelos los cuales relacionan los cambios de di-

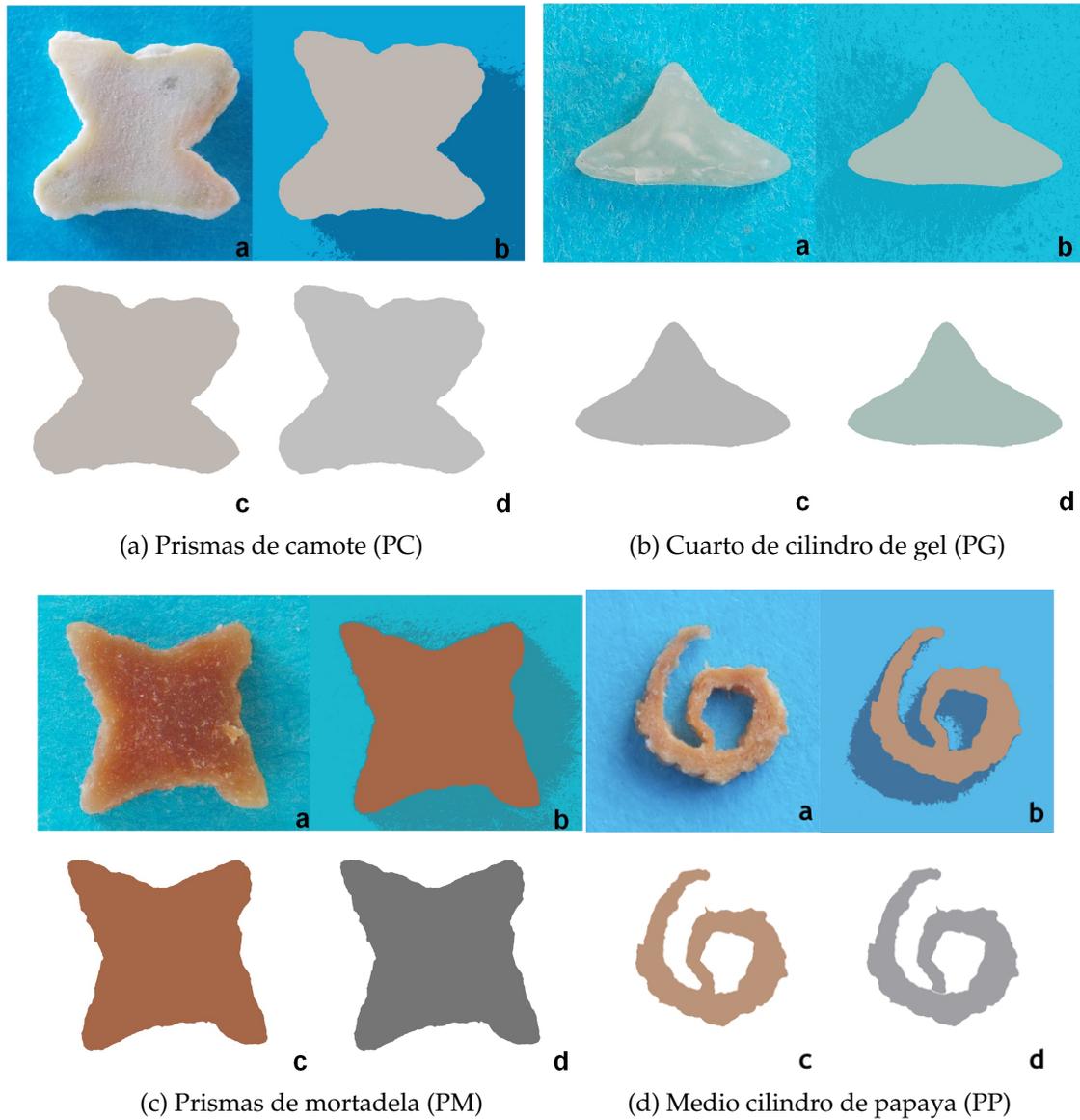


Figura 4.5. Pasos del análisis de imagen usados para determinar la deformación del producto. En las imágenes se presenta la imagen original (a), agrupamiento de colores en la imagen (b), imagen sin fondo (c) e imagen en escala de grises(d).

mensionen del producto con el contenido de humedad.

$$\frac{A}{A_0} = \Delta_A + (1 - \Delta_A) \Psi^{n_A} \quad (4.4)$$

$$\frac{P}{P_0} = \Delta_P + (1 - \Delta_P) \Psi^{n_P} \quad (4.5)$$

$$\frac{P}{P_0} = \Delta_P + (1 - \Delta_P) \exp^{(-k(1-\Psi)^{n_P})} \quad (4.6)$$

$$\frac{a}{a_0} = 1 + \Delta_a \exp^{-k\Psi^{n_a}} \quad (4.7)$$

Diversos autores (Ruiz-López *et al.*, 2012) han empleado las ecuaciones 4.4, 4.5 y 4.6 para expresar el comportamiento de encogimiento de alimentos durante el secado. Los parámetros n_A y n_P controlan las desviaciones al comportamiento de una línea recta, mientras que Δ_A y Δ_P representan las fracciones finales del área de sección transversal y perímetro al final del secado, respectivamente. La ecuación 4.7 es un modelo de decaimiento exponencial similar al modelo de Page usado para describir cinéticas de secado en donde Δ_a controla el incremento relativo de área específica y k y n_a definen la velocidad de decaimiento o descenso y la forma de la curva, respectivamente.

4.5. Comportamiento encogimiento-deformación promedio

Se siguió la metodología de Ortiz-García-Carrasco *et al.* (2015) para evaluar las características relevantes del comportamiento de encogimiento-deformación tomando en consideración que todas las muestras se encogen y deforman de manera diferente. Las características relevantes de la deformación del producto para cada con-

tenido de humedad de la muestra se lograron por combinación de los contornos del producto para generar una sola forma (Figura 4.6). Los contornos fueron orientados y alineados con respecto a un punto de referencia por reducción de la suma acumulada del cuadrado de las distancias Euclidianas entre sus coordenadas. En el caso de contornos de SMG y papaya, estos fueron utilizados para generar las mallas inicial y final durante la simulación detallada del producto. La redondez y compactibilidad (o cociente isoperimétrico) fueron usados como factores de forma (Du & Sun, 2004) capaces de detectar la apariencia de deformación del producto con estos contornos:

$$\text{Redondez (R)} = \frac{\text{área transversal del producto}}{\text{área del círculo mínimo que encierra el contorno del producto}} = \frac{A}{A_c} \quad (4.8)$$

$$\text{Compactibilidad (C)} = \frac{\text{área transversal del producto}}{\text{área de un círculo que tenga el mismo perímetro que el producto}} = \frac{4\pi A}{P^2} \quad (4.9)$$

Ambos índices poseen la característica común de que se mantienen constantes aunque el tamaño del producto cambie. Estos índices se evaluaron a partir del área y perímetro de la muestra. Esta modificación obedece a un empleo de las características de las imágenes segmentadas establecidas en modo de gris y la obtención del área circular aproximada.

4.6. Modelación de datos de secado

La modelación de los datos de secado se llevó a cabo utilizando el modelo de difusión en estado no estacionario reportado por Ortiz-García-Carrasco *et al.* (2015) y Pacheco-Aguirre *et al.* (2015), donde se considera lo siguiente:

1. Transferencia de calor insignificante.
2. Propiedades constantes del aire de secado.

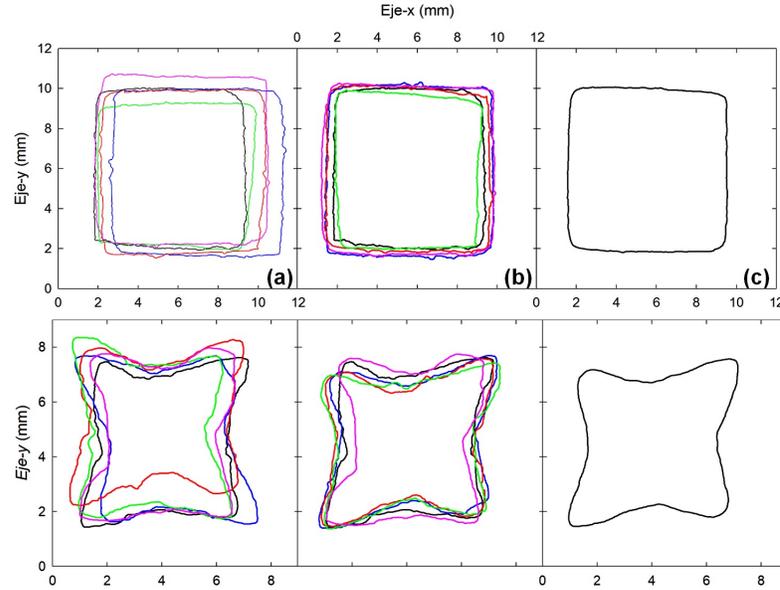


Figura 4.6. Pasos para determinar un patrón representativo de la deformación del producto: (a) original, (b) alineada y (c) contornos promedio. Los gráficos corresponden a contornos de muestras de mortadela frescas y secas en equilibrio a 70°C.

3. Concentración volumétrica de sólidos secos constante en el producto.
4. Distribución inicial uniforme de agua en el producto.
5. Transferencia de masa del producto en dos dimensiones.
6. Encogimiento isotrópico del producto (el producto se encoge en la misma proporción en cada una de las direcciones de transporte de masa).

El modelo usado y su condición de frontera se presentan en las ecuaciones (4.10) y (4.11).

$$\frac{\partial (cu)}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(D \frac{\partial (cu)}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(D \frac{\partial (cu)}{\partial y} \right) \text{ en } V \quad (4.10)$$

$$\frac{hm}{v} (H_i - H) = -\mathbf{n} \cdot D \frac{\partial (cu)}{\partial x} \mathbf{e}_x - \mathbf{n} D \rho \frac{\partial (cu)}{\partial y} \mathbf{e}_y \text{ en } S \quad (4.11)$$

Las ecuaciones anteriores se resuelven de forma adimensional considerando que el coeficiente de difusión efectivo del agua (D) y las longitudes características para difusión X y Y son funciones explícitas del tiempo de secado. La ecuación de difusión fue expresada tanto para un sistema de coordenadas rectangulares como cilíndricas que permita una representación natural de todas las geometrías estudiadas. Debido a ello, la difusión de humedad durante el secado de productos con forma de prismas fue descrita por el siguiente modelo:

$$\frac{\partial \Psi}{\partial \theta} = \frac{\partial^2 \Psi}{\partial \xi^2} + \frac{1}{\kappa^2} \frac{\partial^2 \Psi}{\partial \zeta^2} \quad (4.12)$$

$$\Psi(\theta > 0, \xi = 1, \zeta = 1) = 0 \quad (4.13)$$

$$Bi_m(t)\Psi_i = -\mathbf{n} \cdot \frac{\partial \Psi_i}{\partial \xi} \mathbf{e}_x - \mathbf{n} \cdot \frac{1}{\kappa} \frac{\partial \Psi_i}{\partial \zeta} \mathbf{e}_y \quad (4.14)$$

Por el otro lado, la difusión de humedad durante el secado de las muestras con forma de secciones longitudinales de cilindros es representada por:

$$\frac{\partial \Psi}{\partial \theta} = \frac{1}{\eta} \frac{\partial}{\partial \eta} \left(\eta \frac{\partial \Psi}{\partial \eta} \right) + \frac{1}{\eta^2} \frac{\partial^2 \Psi}{\partial \phi^2} \quad (4.15)$$

$$\Psi(\theta > 0, \eta = 1, \phi = \pm\pi/K) = 0 \quad (4.16)$$

donde $K = 2$ para medio cilindro y $K = 4$ para cuarto de cilindro. Variables adimensionales son definidas en las ecuaciones (4.12-4.16) como

$$\Psi = \frac{u - u_e}{u_0 - u_e} \quad (4.17)$$

$$\partial\theta = \frac{D(t)}{[Z(t)]^2} \partial t \quad (4.18)$$

$$\partial\xi = \frac{1}{X(t)} \partial x; \quad \partial\zeta = \frac{1}{Y(t)} \partial y; \quad \partial\eta = \frac{1}{R(t)} \partial r \quad (4.19)$$

$$\kappa = \frac{Y(t)}{X(t)}; \quad Bi_m(t) = K \frac{(1/v)}{\rho} \frac{h_m}{[D(t)/X(t)]}; \quad K = \frac{\int_{u_0}^{u_e} (H_i/u_i) du}{\int_{u_0}^{u_e} du} \quad (4.20)$$

El término K de la ecuación (4.20) es un coeficiente de partición promedio. Los cambios de variable en las ecuaciones (4.18) y (4.19) permiten expresar el problema original de difusión de agua para cuerpos encogibles con difusividad variable como el caso más simple de transferencia de masa para D constante en un producto que no se encoge. Si se considera que la resistencia interna a la transferencia de masa por difusión es el único mecanismo que controla la velocidad de secado dentro del proceso entonces se pueden usar soluciones analíticas existentes para resolver las ecuaciones (4.12) y (4.14) cuando el producto se encoge y la difusividad de agua es variable (Ruiz-López *et al.*, 2012). Bajo esta consideración, la condición de frontera original se simplifica a:

$$\Psi_i = 0 \quad (4.21)$$

Cabe resaltar que no todas las variables de las ecuaciones (4.12) y (4.15) se escribieron en forma adimensional debido a la forma irregular del producto inicial ya que cualquier elección de una longitud de referencia para difusión, fue necesario introducir el número de Fourier para transferencia de masa, de manera arbitraria.

4.6.1. Solución a los modelos de secado

La solución analítica para las ecuaciones (4.12) y (4.21) con transferencia de masa en las direcciones x y y se puede obtener a partir de la solución existente para placa

plana y el principio de superposición, obteniéndose

$$\Psi = \left[\frac{8}{\pi^2} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{(2n-1)^2} \exp \left(-\frac{(2n-1)^2 \pi^2 \theta}{4} \right) \right] \times \dots \left[\frac{8}{\pi^2} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{(2n-1)^2} \exp \left(-\frac{(2n-1)^2 \pi^2 \theta}{4 \kappa^2} \right) \right] \quad (4.22)$$

La ecuación (4.22) permite el cálculo de Ψ para cierto tiempo de secado expresado en términos de θ o viceversa.

Ruiz-López *et al.* (2013) desarrollo la solución analítica de las ecuaciones (4.15) y (4.16); sin embargo, la evaluación de un solo valor de los coeficientes de la serie es una tarea compleja y computacionalmente exigente. Así, la solución numérica al modelo de secado para secciones de cilindro longitudinal fue numericamente resuelta por el metodo de líneas (MOL). Diferencias finitas generalizadas (GFD) fueron usadas para la discretización de espacios derivativos. MOL produce un sistema de ecuaciones ordinarias diferenciales (ODE) con el tiempo (θ) como variable independiente a partir de la ecuación diferencial parcial original (para $j = 2, 3, \dots, n_{\xi} - 1$ y $k = 2, 3, \dots, n_{\phi} - 1$):

$$\frac{\partial \Psi_{j,k}}{\partial \theta} = \frac{1}{\tilde{\xi}_{j,k}} \left[\frac{\tilde{\xi}_{j+1/2,k} (\Psi_{j+1,k} - \Psi_{j,k}) - \tilde{\xi}_{j-1/2,k} (\Psi_{j,k} - \Psi_{j-1,k})}{(\Delta \xi)^2} \right] + \frac{1}{\tilde{\xi}_{j,k}^2} \left[\frac{\Psi_{j,k+1} - 2\Psi_{j,k} + \Psi_{j,k-1}}{(\Delta \phi)^2} \right] \quad (4.23)$$

$$\tilde{\xi}_{j\pm 1/2,k} = \frac{1}{2} (\tilde{\xi}_{j\pm 1,k} + \tilde{\xi}_{j,k}) \quad (4.24)$$

como se indica en la condición frontera, ecuación (4.16), la fracción de humedad libre en nodos situados en la superficie del producto alcanzaban su valor de equilibrio justo después de que comenzará la simulación, es decir, $\Psi_{j,k} = 0$ para $j = 1, n_{\xi}$ y $k = 1, n_{\phi}$. El sistema ODE resultante fue integrado con $n_{\xi} = 100$ y $n_{\phi} = 100$ usando un método de orden variable basado en formulas de diferenciación numérica del Matlab R2010a rutina ode15s (MathWorks Inc., Natick, MA, USA). El contenido de humedad media de los productos fue evaluado a partir de la integración numerica

de valores locales usando la regla del trapecio acorde a la formula:

$$\Psi = \frac{\int_0^1 \int_0^\pi \Psi(\xi, \phi) \xi \delta\phi \delta\xi}{\int_0^1 \int_0^{\pi/K} \xi \delta\phi \delta\xi} \quad (4.25)$$

Para la aplicación del método MOL, la forma del producto fue aproximada por un modelo de malla triangular 2D M consistente de nodos o vértices N representados por $\mathbf{v}_i = (x_i, y_i) \in M$ ($i = 1, 2, \dots, N$) y triángulos o celdas T representadas por $\mathbf{c}_I = \{\mathbf{v}_{(1)}, \mathbf{v}_{(2)}, \mathbf{v}_{(3)}\}$ ($I = 1, 2, \dots, T$). Por conveniencia, los vértices de cada celda tienen su propio número local representado entre paréntesis. Definamos la vecindad del vértice como \mathbf{v}_i como el conjunto Ω_{1i} de tamaño N_{1i} que contiene todos los vértices conectados a \mathbf{v}_i por un borde (es decir, son adyacentes). Similarmente, dos anillos vecinos del vértice \mathbf{v}_i son definidos con el grupo Ω_{2i} de tamaño que contiene todos los vértices \mathbf{v}_k conectados al conjunto de vecinos de un anillo de \mathbf{v}_i .

La serie de Taylor puede ser aplicada para aproximar los valores de la función Ψ_j en los nodos que rodean \mathbf{v}_i a cada vértice $\mathbf{v}_j \in \Omega_{1i}$. La siguiente serie fue obtenida para una función con dos variables $\Psi(x, y)$ si una aproximación de segundo orden $\hat{\Psi}(x, y)$ es usada (para $\Psi_j \in \Omega_{1i}$),

$$\frac{\hat{\Psi}_j}{w_{ij}} = \frac{1}{w_{ij}} \left(\Psi_i + \frac{\partial \Psi_i}{\partial x} x_{ij} + \frac{\partial \Psi_i}{\partial y} y_{ji} + \frac{1}{2} \frac{\partial^2 \Psi_i}{\partial x^2} x_{ji}^2 + \frac{1}{2} \frac{\partial^2 \Psi_i}{\partial y^2} y_{ji}^2 + \frac{\partial^2 \Psi_i}{\partial x \partial y} x_{ji} y_{ji} \right) \quad (4.26)$$

$$x_{ji} = x_j - x_i \quad y_{ji} = y_j - y_i \quad w_{ij} = (y_{ji} + y_{ji})^3 \quad (4.27)$$

Donde w_{ij} es una función de ponderación. Por lo tanto, todos los $\Psi_j \in \Omega_{1i}$ pueden ser descritos por una función lineal de las derivadas desconocidas en \mathbf{v}_i , que pueden ser arregladas como el sistema lineal (para $i = 1, 2, \dots, N - B$)

$$\mathbf{S}_i \mathbf{D}_i = \mathbf{U}_i = \begin{bmatrix} \frac{x_{1i}}{w_{i1}} & \frac{y_{1i}}{w_{i1}} & \frac{x_{1i}^2}{w_{i1}} & \frac{y_{1i}^2}{w_{i1}} & \frac{x_{1i}y_{1i}}{w_{i1}} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \frac{x_{ji}}{w_{ij}} & \frac{y_{ji}}{w_{ij}} & \frac{x_{ji}^2}{w_{ij}} & \frac{y_{ji}^2}{w_{ij}} & \frac{x_{ji}y_{ji}}{w_{ij}} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \frac{x_{N_{1i}i}}{w_{iN_{1i}}} & \frac{y_{N_{1i}i}}{w_{iN_{1i}}} & \frac{x_{N_{1i}i}^2}{w_{iN_{1i}}} & \frac{y_{N_{1i}i}^2}{w_{iN_{1i}}} & \frac{x_{N_{1i}i}y_{N_{1i}i}}{w_{iN_{1i}}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{\partial \Psi_i}{\partial x} \\ \frac{\partial \Psi_i}{\partial y} \\ \frac{\partial^2 \Psi_i}{\partial x^2} \\ \frac{\partial^2 \Psi_i}{\partial y^2} \\ \frac{\partial^2 \Psi_i}{\partial x \partial y} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\Psi_1 - \Psi_i}{w_{i1}} \\ \vdots \\ \frac{\Psi_j - \Psi_i}{w_{ij}} \\ \vdots \\ \frac{\Psi_{N_{1i}} - \Psi_i}{w_{iN_{1i}}} \end{bmatrix} \quad (4.28)$$

Se requiere que $N_{1i} \geq 5$ para evaluar \mathbf{D}_i . La ecuación (4.28) tiene una única solución si $N_{1i} = 5$. Sin embargo, si $N_{1i} \geq 5$ entonces tal sistema es sobreestimado, requiriendo una solución en el sentido de mínimos cuadrado. Si $N_{1i} < 5$ entonces, tanto \mathbf{S}_i como pueden \mathbf{U}_i ser aumentados incluyendo la información de Ω_{2i} . Las derivadas contenidas en el vector solución \mathbf{D}_i fueron actualizadas para cada vértice durante la simulación, permitiendo la estimación del lado derecho en la ecuación (4.12) para cada \mathbf{v}_i (para $i = 1, 2, \dots, N - B$). El sistema resultante ODE fue integrado usando la rutina ode15s de Matlab, basada en un método de orden variable (Matlab R2012a, MathWorks Inc., Natick, Ma, USA). La fracción de humedad libre media (Ψ) fue calculada a partir de la integración numérica de valores locales evaluando la expresión

$$\Psi = \frac{\iiint_v \Psi dv}{\iiint_v dv} = \frac{I_1}{I_2} = \frac{\sum_{I=1}^T \sum_{i=1}^3 w_{(i)} f_I(i) \left(L_{1(i)}, L_{2(i)} \right) |\mathbf{J}_I|}{\sum_{I=1}^T \frac{1}{2} |\mathbf{J}_I|} \quad (4.29)$$

$$\mathbf{J}_I = \begin{bmatrix} 1 & x(1) & y(1) \\ 1 & x(2) & y(2) \\ 1 & x(3) & y(3) \end{bmatrix} \quad (4.30)$$

La integral I_2 corresponde al volumen del producto, o en este caso, su área transversal, considerando la transferencia de masa en 2D. Es decir, I_2 corresponde al área

de malla $A(M)$, que a su vez corresponde a la suma de todas las áreas de las celdas triangulares $A(c_I)$ ($I = 1, 2, \dots, T$). Por el otro lado, I_1 es calculada por integración numérica de la función deseada $f = \Psi$ sobre celdas triangulares representadas por un sistema de coordenadas baricentricas locales donde $w_{(1)} = w_{(2)} = w_{(3)} = 1/6$, $L_{1(1)} = L_{1(2)} = L_{2(1)} = L_{2(3)} = 1/2$ y $L_{1(3)} = L_{2(2)} = 0$. Notar que f debe evaluarse con valores seleccionados de coordenadas baricentricas L_1 y L_2 con coordenadas rectangulares equivalentes x_L y y_L . Valores requeridos son calculados usando transformación lineal (para $i = 1, \dots, 3$)

$$\begin{bmatrix} x_L \\ y_L \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_{(1)} - x_{(3)} & x_{(2)} - x_{(3)} \\ y_{(1)} - y_{(3)} & y_{(2)} - y_{(3)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_{1(i)} \\ L_{2(i)} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} x_{(3)} \\ y_{(3)} \end{bmatrix} \quad (4.31)$$

La función de interpolación en cada celda es definida como (para $I = 1, \dots, T$)

$$f_I(L_1, L_2) \equiv f_I(x_L, y_L) = a_{I0} + a_{I1}x_L + a_{I2}y_L \quad (4.32)$$

Donde coeficientes de la celda a_{I0} , $a_{I1}x_L$ y $a_{I2}y_L$ son evaluados resolviendo el problema (para $I = 1, \dots, T$)

$$\mathbf{J}_I \mathbf{a}_I = \mathbf{f}_I \quad \text{con} \quad \mathbf{a}_I^T = [a_{I0} \ a_{I1} \ a_{I2}]; \quad \mathbf{f}_I^T = [f_{(1)} \ f_{(2)} \ f_{(3)}] \quad (4.33)$$

4.6.2. Estimación de las mallas inicial y final

Pacheco-Aguirre *et al.* (2015) estimó las mallas inicial y final de un prisma moviendo los nudos de cuadrícula hacia el centro geométrico acorde al desplazamiento relativo de puntos de referencia de la geometría original (esquinas del producto). Este método produce elementos de malla con una amplia distribución de tamaños y no puede ser aplicado a mallas deformadas donde el centroide está localizado cerca o fuera del límite del producto. En este estudio, se propone un nuevo algoritmo para crear las mallas inicial y final que coincidan con la forma del producto real a medida que avanza el secado. Una geometría simétrica del producto (4.7), libre de irregularidades en el contorno y con tamaño arbitrario (secciones de prismas fueron

creados con una longitud lateral de tamaño 2 mientras que para secciones de cilindro se utilizo un radio de 1), fue creada y enmallada empleando el software Matlab y su herramienta PDE 1.0.20 (Matlab R2012a, MathWorks Inc., Natick, MA, USA). Esta malla fue escalada y deformada para representar correctamente la forma del producto inicial y final de acuerdo al siguiente algoritmo:

1. Las esquinas, que sirven como puntos de referencia, fueron identificadas tanto en la geometría inicial enmallada como en el contorno del producto. Estos puntos se etiquetaron como A , B y C en las Figuras 4.7a y 4.7b correspondiente a cuarto de cilindro. Estos puntos sirven para separar el contorno en segmentos básicos etiquetados como \overline{AB} , \overline{BC} y \overline{CA} .

2. Cada segmento de la geometría enmallada o contorno del producto fue definido por un grupo de coordenadas $m \{x_k, y_k\}$ (para $k = 1, \dots, m$ donde $M = F$ para el contorno del producto y $m = G$ para la geometría enmallada). Definamos el grupo de proporciones $\{p_k\}$ donde un punto $\{x_k, y_k\}$ se encuentra en el segmento

$$p_k = \left(p_{k-1} + \sqrt{(x_k - x_{k-1})^2 + (y_k - y_{k-1})^2} \right) / \sum_{j=1}^{m-1} \sqrt{(x_{j+1} - x_j)^2 + (y_{j+1} - y_j)^2} \quad (4.34)$$

donde $p_1 = 0$ y $p_m = 1$.

3. Finalmente, los nodos que quedaron fueron distribuidos en el contorno del producto deformado de la siguiente manera. Dejemos que ℓ_i sea el grupo de distancias ℓ_{ij} a lo largo del eje x o y entre un vértice \mathbf{v}_i **dentro del contorno** y para cada vértice alrededor $\mathbf{v}_j \in \Omega_{1i}$ (para $i = 1, \dots, N - B$). Una malla bien distribuida alrededor de cada vértice debe satisfacer

$$\sum \ell_{ij} = \sum (\ell_j - \ell_i) = 0 \quad \text{para } \ell_{ij} \in \ell_i \quad (4.35)$$

Las ecuaciones para cada vertice **dentro del contorno** pueden combinarse para formar el sistema lineal

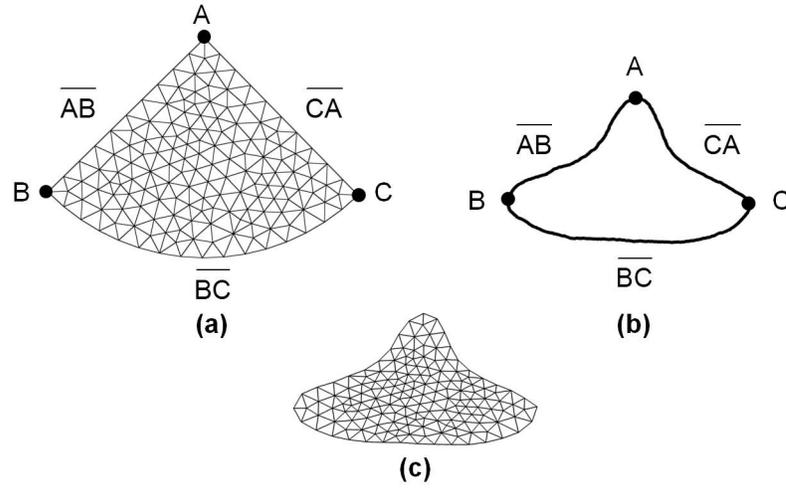


Figura 4.7. Combinación de malla geométrica regular (a) y contorno de producto experimental (b) para producir una malla geométrica deformada inicial y final (c).

$$\begin{bmatrix} -N_{11} & g(1,2) & \cdots & g(1,N-B) \\ g(2,1) & -N_{12} & \cdots & g(2,N-B) \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ g(N-B,1) & g(N-B,2) & \cdots & -N_{1,N-B} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ell_1 \\ \ell_2 \\ \vdots \\ \ell_{N-B} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -E_1 \\ -E_2 \\ \vdots \\ -E_{N-B} \end{bmatrix} \quad (4.36)$$

$$E_i = \begin{cases} 0 & \text{si } \mathbf{v}_i \text{ no tiene vecinos que pertenecen al contorno} \\ \sum \ell_j & \mathbf{v}_j \in \Omega_1(\mathbf{v}_i) \text{ esta en el contorno} \end{cases} \quad (4.37)$$

donde $g(i,j) \equiv g(\mathbf{v}_i, \mathbf{v}_j) = 1$ si los vértices son conectados por un extremo (es decir, están adyacentes). El sistema (ecuación 4.36) fue resuelto en el sentido menos cuadrado para generar las coordenadas de la malla inicial y final que coincidan con la forma del producto real. La malla resultante se muestra en la Figura 4.7c.

4.6.3. Actualización de la forma de la malla

El algoritmo desarrollado por Pacheco-Aguirre *et al.* (2015) fue aplicado para actualizar la forma de la malla durante la simulación de secado. Este algoritmo debe

ser aplicado una vez para cada dirección en el cual la transferencia de masa ocurre a cada iteración de tiempo. En este algoritmo, las condiciones de equilibrio (ecuación 4.35) se cambian a

$$\epsilon_i = \sum \ell_{ij} = \sum \ell_j - \ell_i \quad \text{para } \ell_{ij} \in \ell_i \quad (4.38)$$

Donde ϵ_i es el desplazamiento total esperado a lo largo del eje x o y para el vértice i . Las ecuaciones del desplazamiento total **para cada vértice en la malla** son combinados para formar el sistema lineal

$$\begin{bmatrix} -N_{11} & g(1,2) & \cdots & g(1,N) \\ g(2,1) & -N_{12} & \cdots & g(2,N) \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ g(N,1) & g(N,2) & \cdots & -N_{1N} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ell_1 \\ \ell_2 \\ \vdots \\ \ell_N \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\epsilon_1 \\ -\epsilon_2 \\ \vdots \\ -\epsilon_N \end{bmatrix} \quad (4.39)$$

El sistema (ecuación 4.39) fue resuelto en el sentido menos cuadrado para actualizar las coordenadas de la malla durante la simulación. El lado derecho de la ecuación (4.39) es estimado con la siguiente función simple

$$\frac{\ell_{ij}}{\ell_{ij0}} = (1 - s_{ij}) + s_{ij} \exp(-k\theta^n) \quad \text{para } \ell_{ij} \in \ell_{ij} \quad (4.40)$$

Donde, s_{ij} , k y n controlan el grado de encogimiento final y el comportamiento de encogimiento a lo largo de la coordenada ℓ , respectivamente. Parámetros de encogimiento s_{ij} son asignados a cada vértice para cada malla que coincida con la forma final real del producto deformado. Por el otro lado, los parámetros k y n son ajustados para reproducir la velocidad experimental del encogimiento del producto.

4.7. Estimación de la difusividad de agua y simulación del secado

4.7.1. Método de las pendientes modificadas

Datos experimentales (Ψ_{exp} vs. t) pueden ser utilizados para estimar la difusividad de humedad una vez que la solución al modelo (Ψ_{sim} vs. θ_{sim}) se ha generado de acuerdo al siguiente procedimiento (Ruiz-López *et al.*, 2012): (i) calcular θ_{sim} para cada Ψ_{exp} por interpolación de datos existentes, (ii) evaluar la derivada $d\theta/dt$, (iii) estimar difusividades de humedad de la ecuación 4.18 a cada t experimental como

$$D(t) \equiv D(\Psi) = [Z(t)]^2 \frac{d\theta}{dt} \equiv [Z(\Psi)]^2 \frac{d\theta}{dt} \quad (4.41)$$

La longitud característica para la difusión en direcciones axial (X) y radial (R) pueden ser estimadas a partir de datos del área transversal de acuerdo a lo siguiente

$$Z = Z_0 \sqrt{A/A_0} \quad (4.42)$$

Las difusividades de agua medias durante el proceso de secado pueden ser calculadas como

$$\langle D \rangle = \int_{\Psi_1}^{\Psi_2} D(\Psi) d\Psi / \int_{\Psi_1}^{\Psi_2} d\Psi \quad (4.43)$$

4.7.2. Método de regresión lineal

Las soluciones analíticas de las ecuaciones 4.12-4.16 para las geometrías estudiadas pueden ser expresadas en su forma general

$$\Psi = \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{n=1}^{\infty} A_{mn} \exp(-\lambda_{mn}^2 \theta) \quad (4.44)$$

Truncando la serie después del primer término y tomando la transformación del

logaritmo natural a la ecuación resultante tenemos

$$\ln \Psi = \ln A_{11} - \lambda_{11}^2 \theta \quad (4.45)$$

Bajo difusividad constante y sin considerar encogimiento, la ecuación 4.45 se simplifica en lo siguiente

$$\ln \Psi = \ln A_{11} - \frac{\lambda_{11}^2 \langle D \rangle}{Z^2} t \quad (4.46)$$

donde $\lambda_{11}^2 = 2\pi^2/4$ para prismas, $\lambda_{11}^2 = 14.6820$ para medios cilindros y $\lambda_{11}^2 = 26.3746$ para cuartos de cilindro (Ruiz-López *et al.*, 2013). De acuerdo a la ecuación 4.46 la difusividad de humedad puede ser estimada de la pendiente de la curva $\ln \Psi$ vs. t y posteriormente corregida por encogimiento del producto usando un valor adecuado de Z . La longitud media característica para difusión $\langle Z \rangle$ se calcula a lo largo del proceso de secado se calcula de la siguiente manera

$$\langle Z \rangle = \int_{\Psi_1}^{\Psi_2} Z(\Psi) d\Psi / \int_{\Psi_1}^{\Psi_2} d\Psi = \int_{\Psi_1}^{\Psi_2} Z_0 \sqrt{A/A_0} d\Psi / \int_{\Psi_1}^{\Psi_2} d\Psi \quad (4.47)$$

Finalmente, si $Z = Z_0$ entonces $\langle D \rangle$ no es corregido por encogimiento del producto.

4.7.3. Modelamiento del secado considerando encogimiento del producto

La simulación del proceso de secado se realiza conociendo la dependencia con el tiempo o contenido de humedad de D y X resolviendo la ecuación (4.18) como el siguiente problema de valor inicial:

$$\frac{dt}{d\theta} = \frac{[Z(t)]^2}{D(t)} = \frac{[Z(\Psi)]^2}{D(\Psi)} \quad \text{con } t(\theta = 0) = 0 \quad (4.48)$$

Donde Ψ se calcula a partir de θ en cada iteración con la ecuación (4.22) y Ψ se usa a su vez para evaluar tanto $D(\Psi)$ como $Z(\Psi)$. La simulación del proceso de secado en términos del número de Fourier tradicional $\tau = D_0 t / X_0^2$ (el cual usa una difusividad y longitud característica constantes como referencia) se puede obtener por un procedimiento similar

$$\frac{d\tau}{d\theta} = \frac{[Z(t)/X_0]^2}{D(t)/D_0} = \frac{[Z(\Psi)/X_0]^2}{D(\Psi)/D_0} \quad \text{con} \quad \tau(\theta = 0) = 0 \quad (4.49)$$

The dependency of water diffusivity on temperature was described with the Arrhenius equation:

$$D = D_0 \exp\left(-\frac{E}{RT}\right) \quad (4.50)$$

4.7.4. Simulación del secado considerando encogimiento y deformación del producto

El modelo de secado fue solucionado con y sin considerar el cambio de forma del producto. La velocidad en el cual el producto encoge fue ajustada solucionando el modelo de secado bajo diferentes combinaciones de parámetros k y n en la ecuación (4.40) ajustando el cambio experimental del área transversal de rebanadas de SMG y/o papaya como función del contenido de humedad. Posteriormente, se utilizó la solución del modelo (Ψ_{sim} vs. θ_{sim}) con y sin considerar el cambio de forma junto con datos experimentales (Ψ_{exp} vs. θ_{exp}) estimando la difusividad del agua mediante el siguiente algoritmo: (i) proveer una estimación inicial de D , (ii) calcular $\theta_{exp} = D t_{exp}$, (iii) calcular Ψ_{sim} para cada θ_{exp} por interpolación de los datos de simulación existentes, (iv) calcular la suma de errores cuadrados (SSE), (v) modificar la D para minimizar SSE.

4.8. Análisis de datos

La calidad en el ajuste de los modelos identificados fue cuantificada por la determinación del coeficiente (R^2) mientras que la significancia estadísticas de los pará-

metros estimados se evaluó mediante sus intervalos de confianza al 95 %. Procedimientos numéricos, regresión no lineal (basada en mínimos cuadrados ordinarios) y análisis estadístico fue realizado con el software Matlab mediante su herramienta Statistics Toolbox 7.3 (Matlab R2014a, MathWorks Inc., Natick, MA, USA).

V.RESULTADOS Y DISCUSIÓN

5.1. Características de encogimiento en productos

En las Figuras 5.1, 5.2 y 5.3 se muestra el efecto del contenido de humedad sobre del área de sección transversal (A), perímetro (P) y área específica (a) de muestras experimentales. Los valores iniciales de estas variables se muestran en la Tabla 5.1. Estas cantidades son similares a las reportadas por Ortiz-García-Carrasco *et al.* (2015), quienes obtuvieron valores de 86.58 mm^2 , 37.44 mm y 0.43 mm^{-1} para estas mismas variables en tiras de papa cortadas usando el mismo equipo. Estos valores varían ligeramente con aquellos esperados en este trabajo debido al tamaño de abertura del cortador (9.525 mm), con valores correspondientes de 79.73 mm^2 , 38.10 mm y 0.42 mm^{-1} . En la tabla 5.1 también se muestran los valores iniciales del volumen (V_0) y superficies laterales (P_0L_0) y de las caras cuadradas ($2A_0$) de las muestras obtenidos a partir de la medición de las dimensiones reales del producto. Por su parte, Ortiz-García-Carrasco *et al.* (2015) presenta valores para los mismos parámetros de 6926.23 mm^3 , 2994.44 mm^2 y 173.16 mm^2 , respectivamente. Considerando estos valores se tiene que, PM presentan un menor tamaño después de cortado con respecto a los valores correspondientes a la abertura del cortador seguido de PP y PC con valores muy similares a este siendo PG el que aumento su dimensión después de cortado. Este comportamiento es reflejo de las diferencias en la estructura y composición del producto. Con respecto a los valores de medios y cuartos de cilindro, no podríamos comparar el tamaño inicial debido a que no se empleó el mismo molde y/o cortador.

Al igual que lo obtenido por Ortiz-García-Carrasco *et al.* (2015), las caras cuadradas de las tiras de camote representan menos del 5% de la superficie total disponible para transferencia de masa y en muestras de gel como medios y cuartos de cilindro este valor es menor de 1%, validando con ello la consideración hecha en el desarrollo de la ecuación (4.1). Se puede observar que tanto el perímetro como el área de sección transversal de las muestras disminuyó con el contenido de humedad mientras que para el área específica ocurre lo contrario, debido a que el volumen de la muestra disminuye más rápidamente que su superficie. No se observaron

Tabla 5.1. Valores iniciales de área transversal, perímetro y área específica de muestras experimentales.

Muestras	Área transversal inicial (A_0)	Perímetro inicial (P_0)	área específica inicial a_0	Volumen (V_0)	Superficies laterales (P_0L_0)	Caras cuadradas ($2A_0$)
PC	78.42 mm ²	35.45 mm	0.45 mm ⁻¹	6273.6 mm ³	2836 mm ²	156.84 mm ²
PG	80.88 mm ²	35.64 mm	0.44 mm ⁻¹	6465.6 mm ³	2851.2 mm ²	161.76 mm ²
PM	63.37 mm ²	31.71 mm	0.50 mm ⁻¹	6215.2 mm ³	2536.8 mm ²	126.74 mm ²
PP	77.69 mm ²	35.35 mm	0.45 mm ⁻¹	5438.3 mm ³	2474.5 mm ²	155.38 mm ²
MCG	63.62 mm ²	32.77 mm	0.51 mm ⁻¹	8906.8 mm ³	4587.8 mm ²	127.24 mm ²
MCP	76.53 mm ²	36.55 mm	0.48 mm ⁻¹	5357.1 mm ³	2558.5 mm ²	153.06 mm ²
CCG	29.62 mm ²	22.18 mm	0.75 mm ⁻¹	4146.8 mm ³	3105.2 mm ²	59.24 mm ²
CCP	36.96 mm ²	24.35 mm	0.66 mm ⁻¹	2587.2 mm ³	1704.5 mm ²	73.92 mm ²

PC= prismas de camote; PG= prismas de gel; PM= prismas de mortadela; PP= prismas de papaya; MCG= medios cilindros de gel; MCP= medios cilindros de papaya; CCG= cuartos de cilindro de gel; CCP= cuartos de cilindro de papaya.

diferencias significativas en la evolución de estas variables contra el contenido de humedad a diferentes temperaturas de secado y diferentes geometrías ($p = 0.05$), lo cual está en conformidad con lo mostrado por otros autores (Hassini *et al.*, 2007; Ortiz-García-Carrasco *et al.*, 2015). Las ecuaciones (4.4), (4.5), (4.6) y (4.7) se emplearon para describir el comportamiento de encogimiento correspondientes a las tres temperaturas y/o geometrías. Los coeficientes de regresión de los modelos usados para la descripción matemática de estos datos se presentan en la Tabla 5.3.

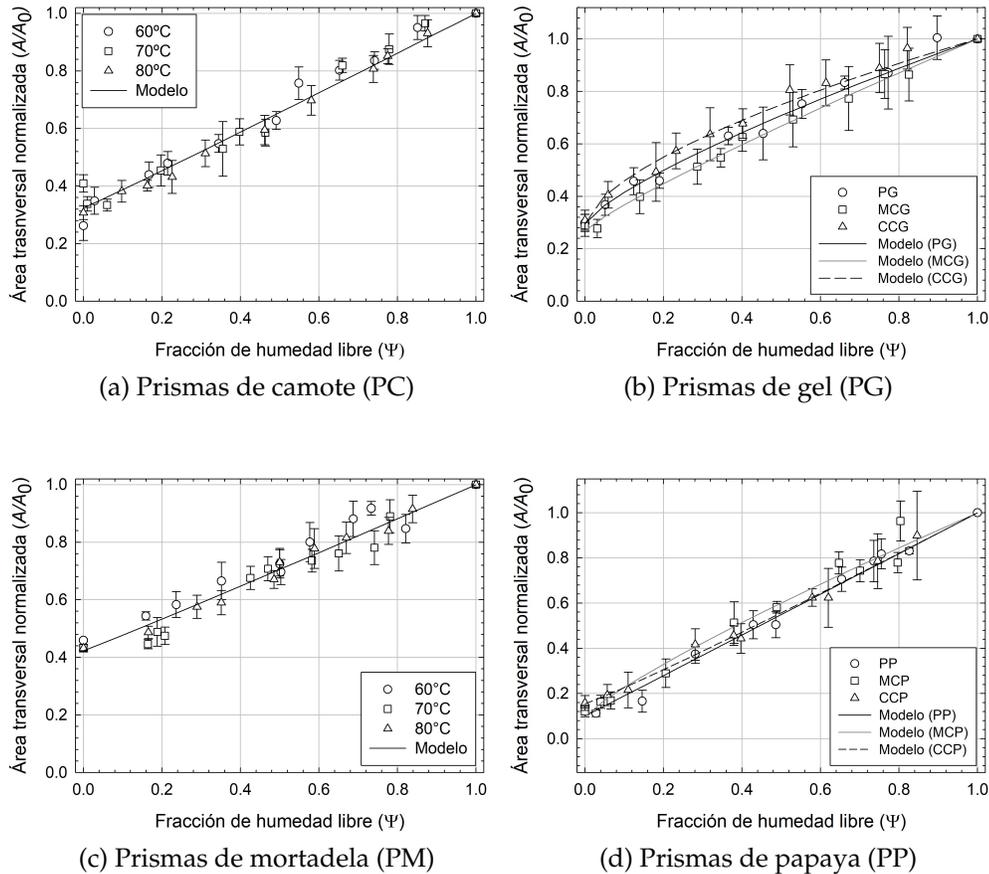


Figura 5.1. Efecto del contenido de humedad sobre el área transversal normalizada en muestras seleccionadas.

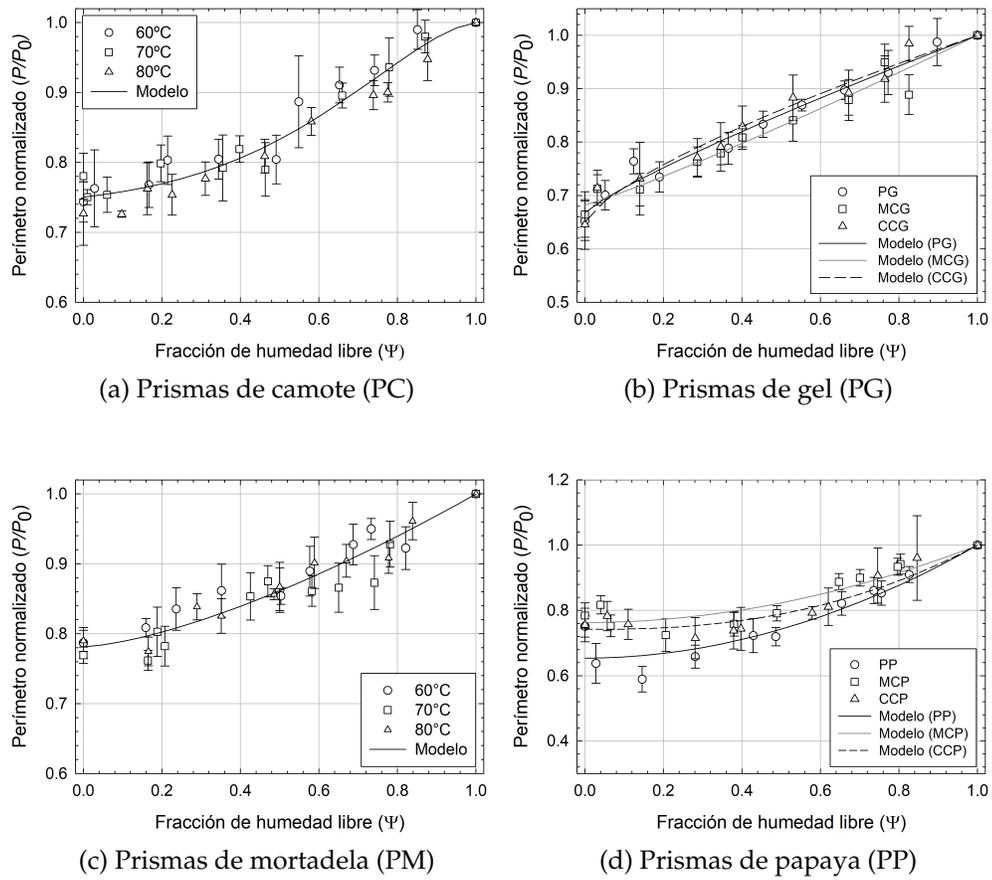


Figura 5.2. Efecto del contenido de humedad sobre el perímetro normalizado en muestras seleccionadas.

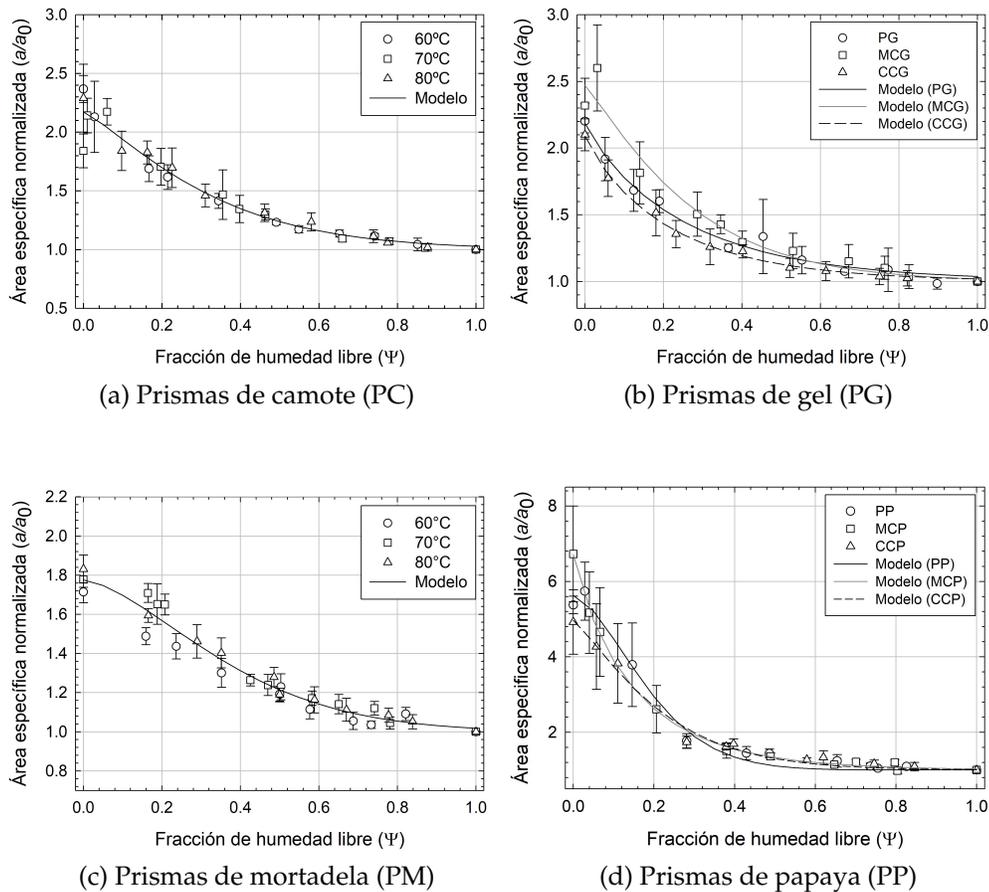


Figura 5.3. Efecto del contenido de humedad sobre área específica normalizada en muestras seleccionadas.

Los parámetros de regresión evaluados presentan valores adecuados en la mayoría de los casos ($R^2 > 0.82$) a excepción de cuartos de cilindro de papaya (CCP) el cual presenta una respuesta de $R^2 > 0.65$. Para diversas muestras, el tamaño de estas se redujó en forma lineal con la perdida de agua. Esto puede indicar que, los cambios en el volumen son proporcionales a la cantidad de agua evaporada. En otras palabras, el agua es evaporada al tiempo que la matriz viscoelástica es contraída hacia el centro de la muestra lo que determina un encogimiento ideal sobre todo si la velocidad de secado no es tan rápida. De acuerdo a lo expuesto por otros autores como Porciuncula *et al.* (2016) y Gulati & Datta (2015), se establece que debido a diferencias en las propiedades mecánicas, desviaciones en el encogimiento ideal del

Tabla 5.3. Parámetros de regresión para los modelos que describen el encogimiento de muestras seleccionadas.

		Área transversal ^a		Perímetro ^{b, B}			Área específica ^c		
		Δ_A	n_A	Δ_P	k	n_P	Δ_a	k	n_a
Valor del parámetro	PC	0.324	1.028	0.736 ^b	1.536 ^b	2.899 ^b	1.171	3.727	1.226
	PG	0.295	0.773	0.668 ^B		0.854 ^B	1.185	3.422	0.912
	PM	0.423	1.032	0.781 ^B		1.447 ^B	0.776	3.758	1.548
	PP	0.100	1.003	0.654 ^B		1.962 ^B	4.634	11.23	1.591
	MCG	0.269	0.875	0.682 ^B		1.104 ^B	1.470	4.285	1.139
	MCP	0.098	0.845	0.763 ^B		1.971 ^B	5.713	5.274	0.891
	CCG	0.295	0.633	0.650 ^B		0.732 ^B	1.089	4.008	0.914
	CCP	0.154	1.070	0.742 ^B		2.452 ^B	3.972	5.952	1.206
Intervalos de confianza	PC	0.306/0.342	0.957/1.099	0.707/0.765	1.231/1.840	0.630/4.169	1.116/1.226	3.131/4.323	1.062/1.391
	PG	0.246/0.346	0.645/0.900	0.645/0.691		0.715/994	1.071/1.299	2.621/4.224	0.710/1.114
	PM	0.400/0.447	0.940/1.124	0.769/0.793		1.256/1.638	0.743/0.809	3.328/4.181	1.392/1.704
	PP	0.064/0.137	0.903/1.102	0.627/0.681		1.511/2.413	4.321/4.947	4.097/18.36	1.153/2.029
	MCG	0.220/0.318	0.737/1.013	0.660/0.705		0.906/1.302	1.331/1.609	2.798/5.773	1.812/1.467
	MCP	0.052/0.145	0.734/0.956	0.743/0.783		1.454/2.487	5.183/6.243	3.414/7.135	0.692/1.090
	CCG	0.233/0.358	0.518/0.749	0.618/0.683		0.585/0.879	1.006/1.172	3.115/4.900	0.738/1.090
	CCP	0.096/0.212	0.889/1.252	0.110/0.772		1.447/3.457	3.521/4.422	3.291/8.612	0.851/1.561

^a $A/A_0 = \Delta_A + (1 - \Delta_A) \Psi^{n_A}$.

^b $P/P_0 = \Delta_P + (1 - \Delta_P) \exp(-k(1 - \Psi)^{n_P})$; $B P/P_0 = \Delta_P + (1 - \Delta_P) \Psi^{n_P}$.

^c $a/a_0 = 1 + \Delta_a \exp(-k\Psi^{n_a})$.

PC= prismas de camote; PG= prismas de gel; PM= prismas de mortadela; PP= prismas de papaya; MCG= medios cilindros de gel; MCP= medios cilindros de papaya; CCG= cuartos de cilindro de gel; CCP= cuartos de cilindro de papaya.

material a partir de la cantidad de agua pérdida y grado de desviación dependen de la velocidad de secado (mayor o menor). En este caso la velocidad de secado fue la misma en todas las muestras por lo cual las diferencias entre ellas vienen marcadas de acuerdo al contenido de humedad y la naturaleza de la misma.

Con base en los resultados obtenidos, las muestras que más se encogieron fueron las de papaya con una reducción de volumen de hasta 90 % ($R^2 > 0.91$), comparando las tres geometrías evaluadas. Mientras que las muestras que menos encogieron fueron los prismas de mortadela (PM) con un valor final de 42 % con respecto a su valor original ($R^2 = 0.91$). Defraeye (2017) en su estudio establece que frutas con forma rectangular (como prismas o cubos) se secan más rápido, seguido por placa circular y semicircular. Para nuestro caso los cuartos de cilindro son los que más rápido se secan y los que más tardan son las muestras en forma de prisma el cual está determinado por las condiciones de secado y por el área o volumen de la muestra expuesta para su secado.

Las modificaciones en el perímetro de los contornos están relacionadas a cambios en la superficie disponible para transferencia de masa. Al disminuir el volumen de muestras más rápido que la superficie disponible para transferencia de masa con un comportamiento exponencial cercano al primer orden ($n_a \neq 1, p < 0.05$) se tiene como consecuencia un aumento en el área específica. Con base en lo estimado, el área superficial que más se mantuvo durante el secado fue el correspondiente a muestras de mortadela (PM) con un valor final de 78 % ($R^2 = 0.82$) con respecto a su valor original mientras que las muestras de prismas de papaya (PP) junto con cuartos de cilindro de gel (CCG) tuvieron los valores más bajos, una reducción del 35 % de dicho valor ($R^2 = 0.88$). Como consecuencia tenemos que, el área específica tuvo el mayor aumento en muestras de papaya ($R^2 > 0.88$) seguidas de SMG ($R^2 > 0.89$), PC ($R^2 = 0.90$) y por último PM ($R^2 = 0.93$). Ochoa *et al.* (2002) secaron muestras de cereza a diferentes temperaturas y velocidades de secado y observaron que estas aumentan su área superficial hasta 1.5 veces más sin que este resultado esté condicionado a las condiciones de secado sino más bien al contenido de humedad. Con ello podemos indicar que el encogimiento no solo depende de la geometría de la muestra a secar sino también de la naturaleza del alimento.

Ortiz-García-Carrasco *et al.* (2015) evaluó estos parámetros de regresión (A , P , y a) en muestras de papa seca y obtuvo los siguientes valores, una reducción en el volumen y área superficial de muestras con valor final de 17 % y 64 % respecto a

su valor original, respectivamente. en el caso del área específica, esta aumento 2.26 veces. Estos valores contrastan con los obtenidos para PC, producto muy similar y secado a las mismas condiciones. Mientras que la papa presenta ligeramente mayor cantidad de agua, el camote presenta un mayor contenido de carbohidratos y fibra lo cual puede proveerle de mayor estabilidad frente al encogimiento durante el secado (Wikipedia, 2018)

De igual forma para SMG, el encogimiento ha estado relacionado tanto con el contenido de humedad como con su capacidad de enlace de sus elementos, en este caso carbohidratos, los cuales estan presentes en menor cantidad lo que repercute en un mayor grado de encogimiento lo cual concuerda con lo expuesto por Tiwari *et al.* (2012). Por lo tanto, se espera que todas las geometrías exhiban el mismo grado de encogimiento puesto que todas comparten la misma composición

5.2. Características de la deformación en muestras secas experimentales.

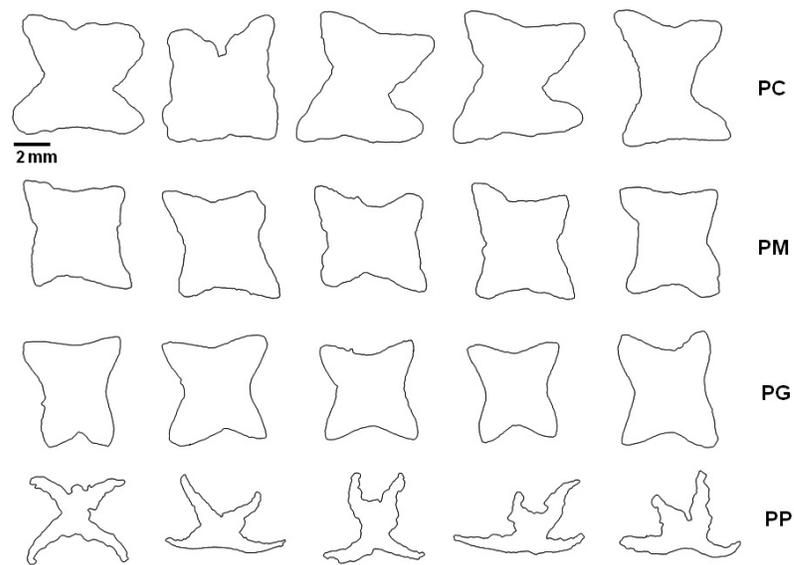
La metodología propuesta permite identificar que todas las muestras sufrieron una reducción de tamaño y cambio de forma similar a lo largo del proceso de secado independientemente de las temperaturas y/o geometrías usadas. Una comparación de las formas de los contornos de las muestras al final del proceso (para $\Psi = 0$) se presenta como ejemplo en la Figura 5.4 donde se aprecia que la superficie del producto desarrolló irregularidades o rugosidades debido al secado, lo que coincide con lo reportado por otros autores (Campos-Mendiola *et al.*, 2007; Fernandez *et al.*, 2005; Ortiz-García-Carrasco *et al.*, 2015). Se debe enfatizar que el comportamiento de encogimiento y deformación fue único para cada muestra, pero claramente exhiben un patrón repetitivo. De esta forma el uso de un perfil de deformación promedio es deseable para una descripción representativa de los cambios de forma del producto durante el secado, tanto para su descripción matemática o cualitativamente. Los mapas morfológicos realizados a partir del promedio de los contornos individuales provenientes del análisis de imagen de muestras de camote, SMG, mortadela y papaya secas a 60, 70 y 80 °C, según el caso, se muestran en las Figuras 5.5, 5.6, 5.7 y 5.8. En el caso de prismas de camote y mortadela, que se secaron a diferentes temperaturas; los productos redujeron sus dimensiones sin un cambio de forma

Tabla 5.5. Grado de encogimiento de alimentos sometidos a secado convectivo

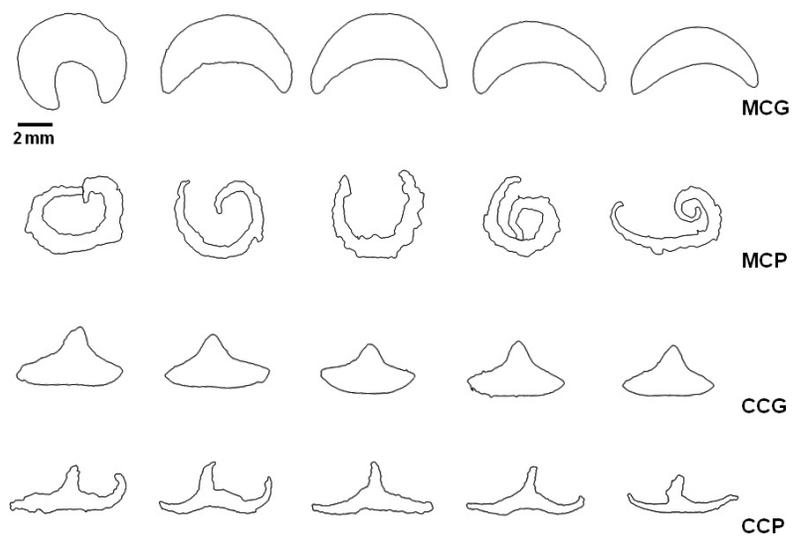
Alimento	Forma de secado	Dimensiones	Condiciones de secado (Temperatura, Velocidad de aire)	Fracción final de encogimiento	Referencia
Piña		11 mm grosor; 21 mm diámetro		0.12	
Plátano	Placa	5 mm grosor; 23 mm diámetro	70°C	0.20	(Yan <i>et al.</i> , 2008)
Mango		10 mm grosor; 20 mm diámetro		0.17	
Calabaza	Cilindro	23 mm longitud; 15 mm diámetro	70°C	0.05	(Mayor <i>et al.</i> , 2011)
Papaya	Cubo	20 × 20 × 20 mm	70°C, 1 m/s	0.35	(Kurozawa <i>et al.</i> , 2012)
Platano	Placa	5 mm grosor	50-90°C; 0.5 m/s	0.6	(Ebrahimi <i>et al.</i> , 2012)
Arándano	Esfera	12 mm diámetro	80°C; 1 m/s	0.2	(Zielinska <i>et al.</i> , 2016)
Camote	Prismas	50 × 60 mm	70°C; 1.5 m/s	0.43	(Afolabi <i>et al.</i> , 2016)
Manzana	Placa	4 cm grosor, 2cm radio	60°C; 1.5 m/s	0.18	(Beigi, 2016)

aparente por arriba de un contenido de humedad de 0.5, deformándose a partir de ese punto. Para el caso de muestras de SMG y papaya en el que se secaron a una sola temperatura (70°C) pero diferentes geometrías (prismas, medios cilindros y cuartos de cilindro) la deformación ocurre a partir de un contenido de humedad de 0.3 y 0.4, respectivamente. La deformación del producto se manifestó por una contracción preferencial de la sección media de los bordes del contorno hacia el centro de la muestras, de forma similar a lo reportado por Ortiz-García-Carrasco *et al.* (2015) además se registró doblez del producto en medios cilindros y aplanamiento del arco circular en cuartos de cilindro. El punto en el que inicia la deformación se identifica fácilmente a partir de la redondez y compactibilidad (Figuras 5.9 y 5.10). Para un contorno cualquiera estos índices no cambian su valor cuando las muestras se encogen sin alterar sus propiedades geométricas y solo varían si estas no se mantienen. De esta manera, la proporción de cualquiera de estas propiedades con respecto a su valor inicial se debería mantener en la unidad para un producto que se encoge sin deformación. Es evidente que estas propiedades permiten identificar con claridad que la deformación ocurre a partir de un valor de fracción de humedad libre 0.5-0.3, momento en el cual ocurre la disminución de la redondez y/o compactibilidad relativa. Ortiz-García-Carrasco *et al.* (2015) determinaron que, la deformación de tiras de papa cortadas en iguales dimensiones y secadas bajo condiciones similares ocurría hasta una fracción de humedad libre de 0.2 a partir de los mapas morfológicos, sin embargo un análisis más preciso del punto en el que ocurre la deformación se podría determinar a partir de los cambios en la redondez y compactibilidad. Las diferencias entre productos debe ser explicado mediante un análisis microestructural o de textura que muestre la resistencia a encoger o deformarse durante el secado, y puede ser también debida a las diferencias en contenido de humedad. Defraeye (2017) encontró una buena correlación entre las diferentes formas y tamaños de fruta con la compactibilidad, tanto en el tiempo de secado como en la calidad. Estas correlaciones pueden ser útiles para estimar a priori el tiempo de secado para un determinado tamaño y forma del fruto logrando un ahorro de energía y mejora en la calidad del producto.

Una hipótesis elaborada por Ortiz-García-Carrasco *et al.* (2015) menciona que conforme el agua es eliminada durante el secado, se pierde gradualmente el turgor celular pero la rigidez de las paredes celulares ofrecen resistencia contra el encogimiento. A medida que avanza el secado, el flujo continuo de agua a través de las



(a) prismas



(b) Medios y cuartos de cilindro

Figura 5.4. Deformación final de cortes transversales de muestras secas.

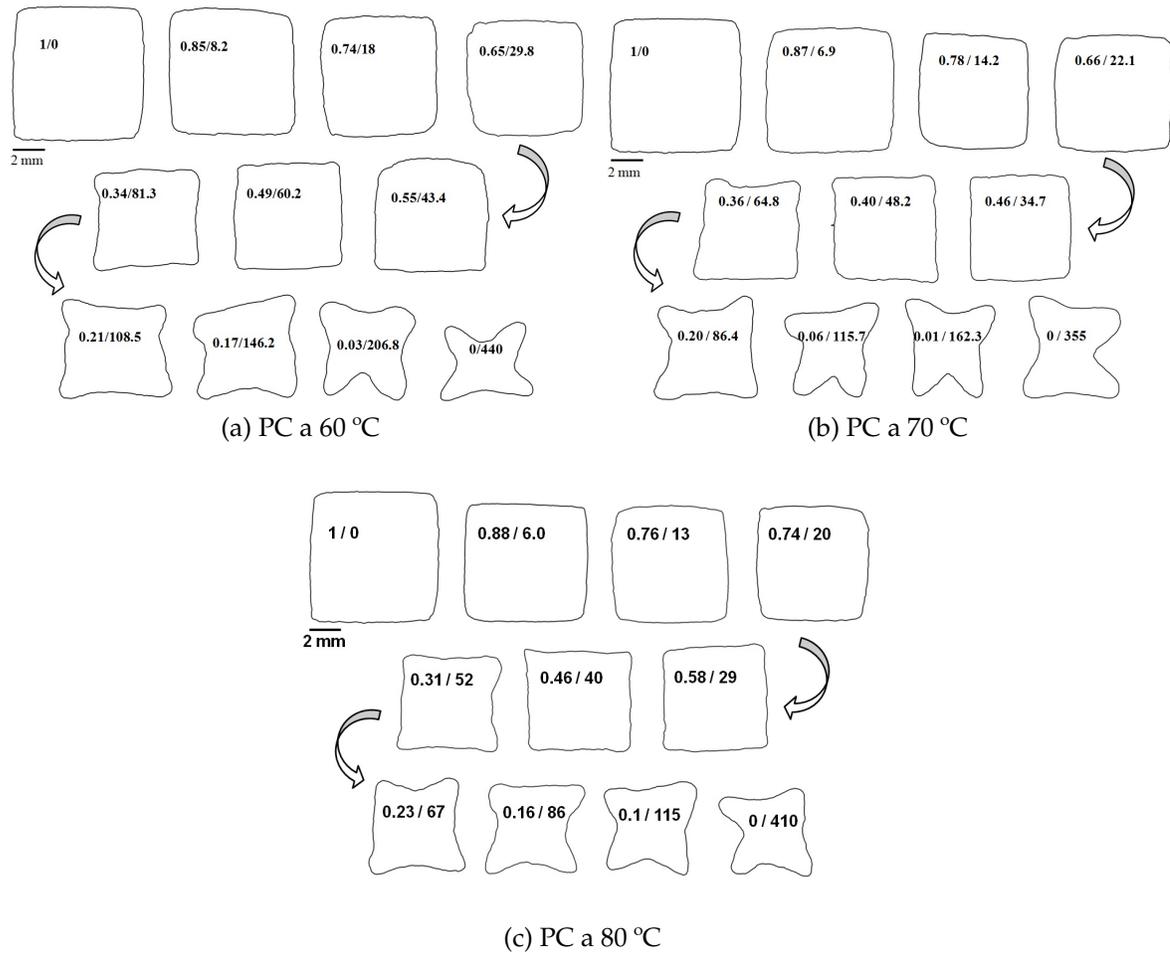


Figura 5.5. Mapa morfológico promedio de muestras secas de camote. Los números en la figura representan la fracción de humedad libre ajustada contra el tiempo de secado alcanzado (min).

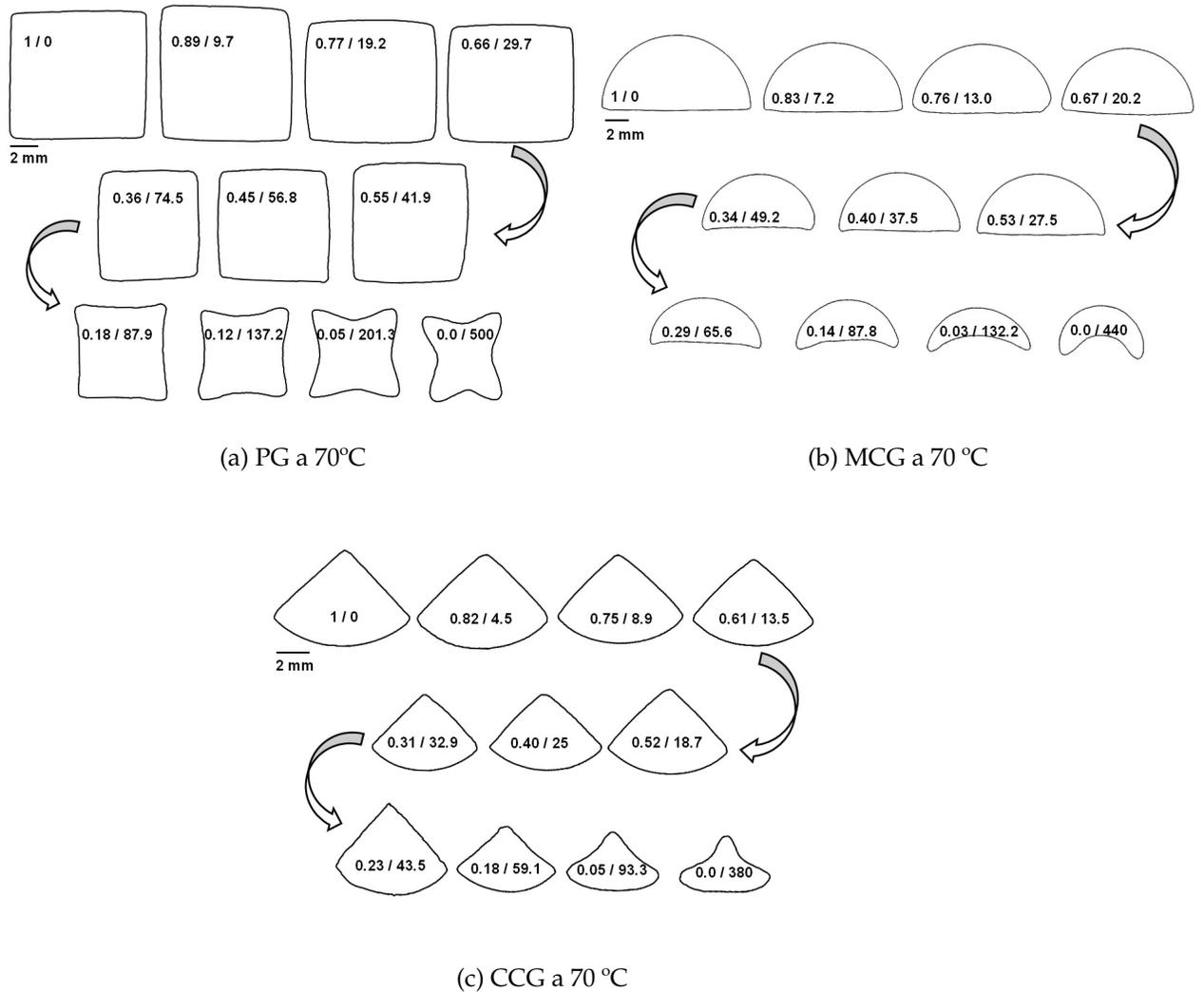


Figura 5.6. Mapa morfológico promedio de muestras secas de SMG. Los números en la figura representan la fracción de humedad libre ajustada contra el tiempo de secado alcanzado (min).

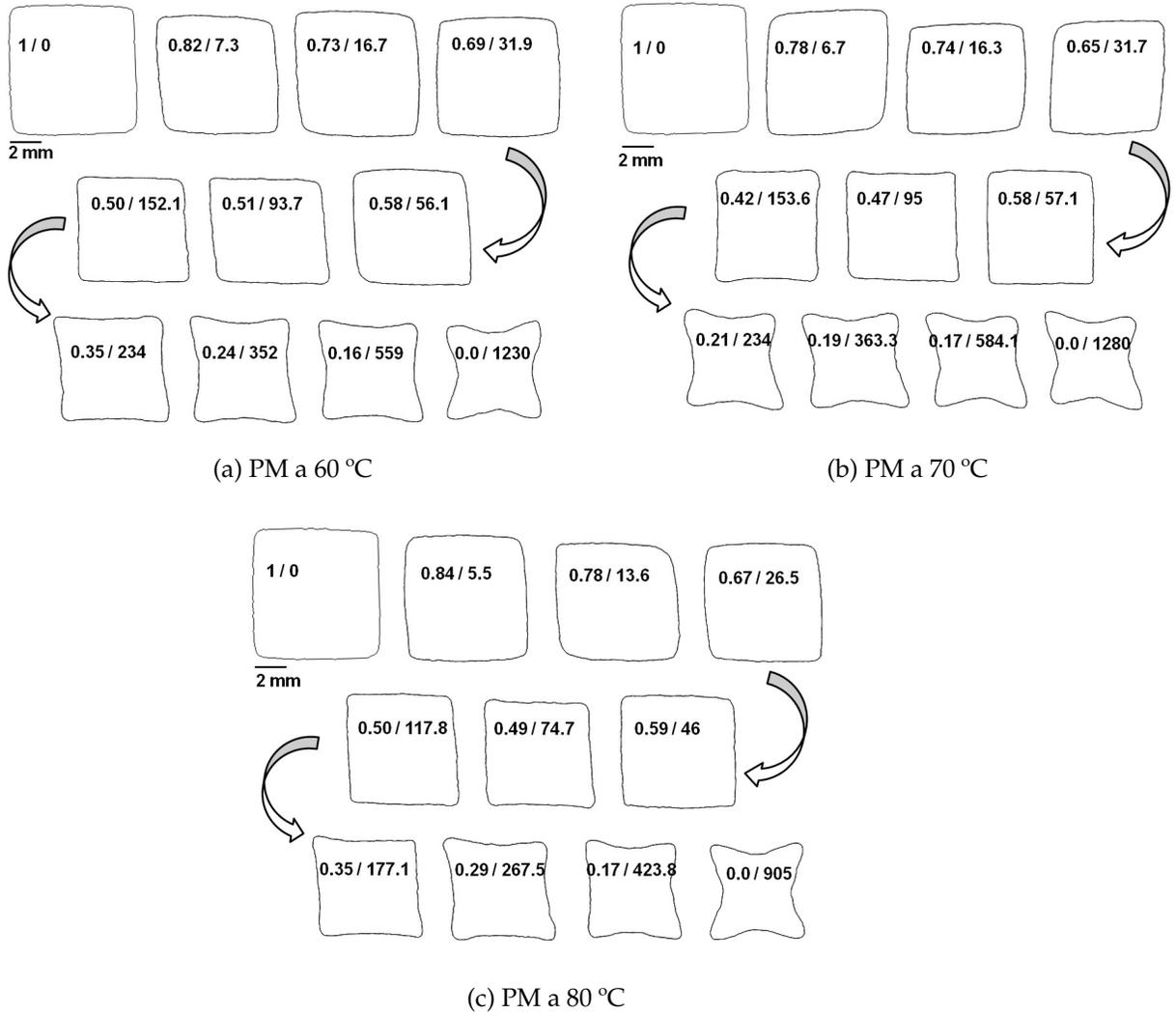


Figura 5.7. Mapa morfológico promedio de muestras secas de mortadela. Los números en la figura representan la fracción de humedad libre ajustada contra el tiempo de secado alcanzado (min).

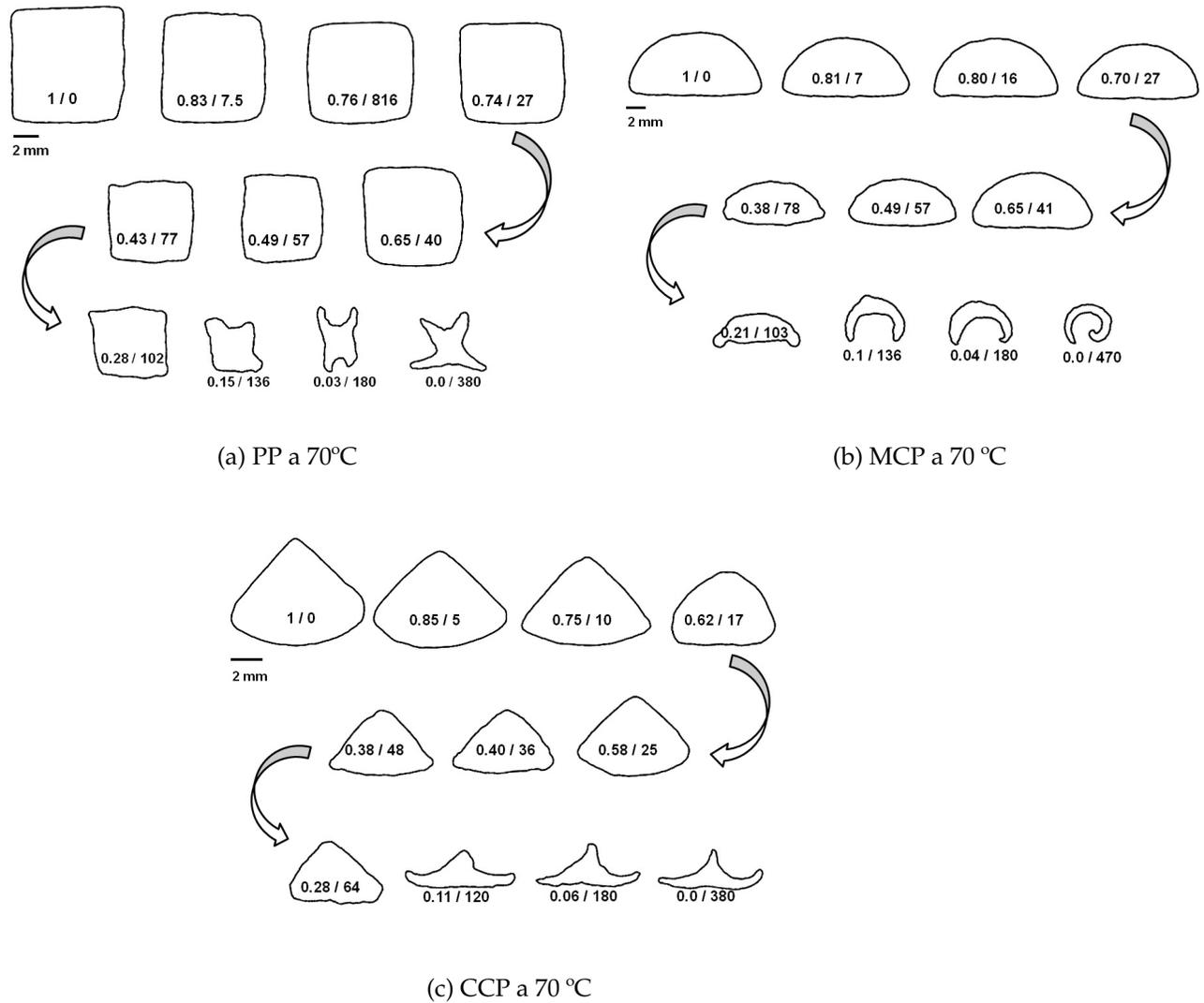


Figura 5.8. Mapa morfológico promedio de muestras secas de papaya. Los números en la figura representan la fracción de humedad libre ajustada contra el tiempo de secado alcanzado (min).

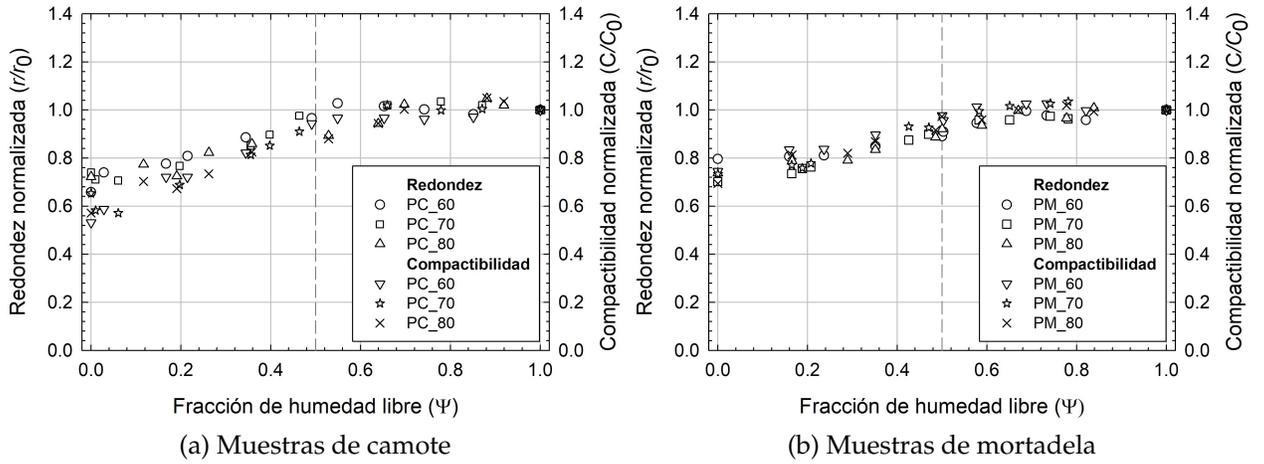


Figura 5.9. Efecto del contenido de humedad sobre la redondez relativa y compactibilidad normalizada de muestras secas de camote y mortadela.

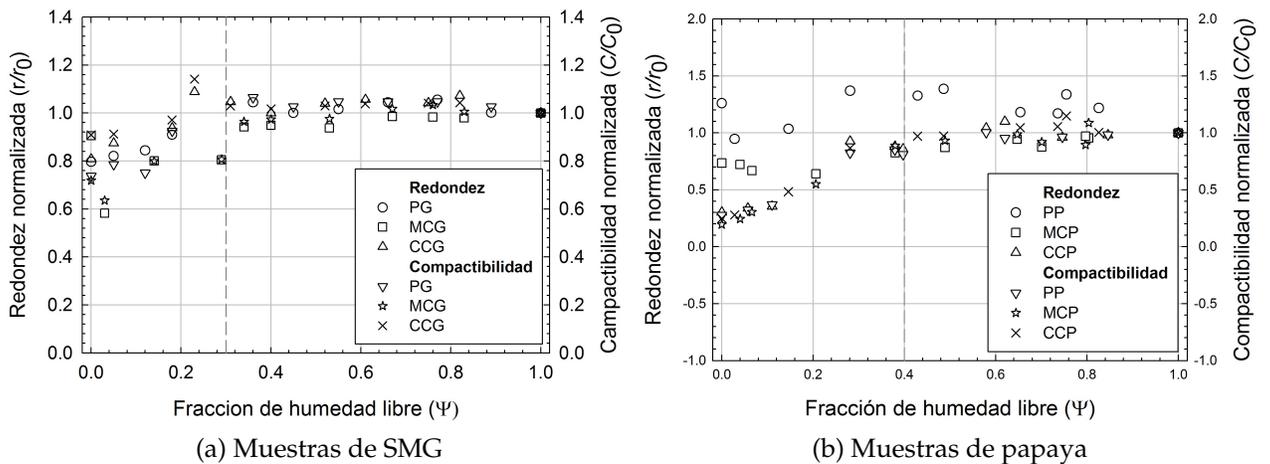


Figura 5.10. Efecto del contenido de humedad sobre la redondez relativa y compactibilidad normalizada de muestras secas de SMG y papaya.

membranas podría hacer que se rompan una vez que se alcance un contenido de humedad crítico debilitando con ello la estructura interna del producto y causando un encogimiento pronunciado ($0.1 \leq \Psi \leq 0.5$). Al final, con un contenido muy bajo de humedad, el agua debe ser removida con un encogimiento mínimo del producto si el colapso de la estructura celular aún no se ha completado causando el desarrollo de una red porosa llena de aire.

Ebrahimi *et al.* (2012) reportó que la compactibilidad de rebanadas de plátano secas no disminuyó hasta que las muestras alcanzaron un relación de humedad de 0.7. Además, un producto dado puede presentar un grado de deformación único cuando se somete a diferentes condiciones de procesamiento, como se observa con algunos productos. Por ejemplo, Salim *et al.* (2017) procesaron tallos de brócoli bajo secado convencional y secado por aire caliente asistido por microondas (40-60°C), informando que este último produce una mayor deformación del producto que el secado convencional. El factor de forma que evaluaron fue circularidad y los valores obtenidos de este factor fueron de 0.63, 0.64 y 0.58 a 40, 50 y 60°C, respectivamente. Los autores propusieron que la contracción irregular se puede tratar con un pretratamiento previo al secado resaltando la necesidad de nuevas investigaciones dirigidas a minimizar el colapso de los tejidos durante el secado y el fortalecimiento de la estructura de los productos secos. Por lo tanto, el comportamiento ED (grado de encogimiento, inicio de la deformación del producto) no puede ser extrapolado de un material a otro y, como consecuencia, mas estudios son requeridos para caracterizar otros productos, especialmente para propósitos de simulación detallada.

Parte de los resultados del trabajo de Sansiribhan *et al.* (2012) expresaron que a partir del factor de forma, el alimento seco a bajas temperaturas mantuvo la forma del producto por más tiempo (periodo uniforme) que el secado a altas temperaturas (periodo no uniforme). Mientras que, considerando el efecto del método de secado, la deformación de zanahoria bajo secado al vacío fue más rápida que el secado por vapor supercaliente a baja presión con valores de factores de forma entre 0.313 a 0.381 y 0.519 a 0.532, respectivamente.

5.3. Estimación de la difusividad de agua.

Las curvas de secado de muestras experimentales se presentan en la Figura 5.20, en representaciones tanto lineal como semilogarítmica. Estos datos se utilizaron para evaluar las difusividades efectivas del agua en el producto mediante el método de las pendientes en el cual se incluye el efecto de encogimiento (empleando valores de A/A_0). Los valores obtenidos se muestran en la Tabla 5.8 junto con aquellos calculados sin el efecto de encogimiento. En todos los casos, el modelo propuesto logró una excelente reproducción de los datos experimentales ($R^2 > 0.97$). De acuerdo a lo esperado el uso de altas temperaturas causó un incremento significativo de la movilidad de agua en el producto ($p < 0.05$), no así cuando se emplearon geometrías con menor área superficial. El comportamiento de la difusividad de agua puede ser dividida en tres secciones, como se menciona en el trabajo de Ortiz-García-Carrasco *et al.* (2015). En la primera región, a la que se denomina “precalentamiento”, hay un incremento gradual de la movilidad de agua desde un inicio del proceso de secado hasta $\Psi = 0.6$. A este estado térmico inestable le sigue un periodo de difusividad de agua constante de $0.1 \leq \Psi \leq 0.6$ aproximadamente. Posteriormente, la movilidad de agua baja, probablemente por un colapso estructural de las células (Ortiz-García-Carrasco *et al.*, 2015). El secado de casi todos los productos biológicos ocurren en el periodo de caída de velocidad (Beigi, 2016). Como consecuencia, es complicado reproducir un comportamiento experimental completo a partir de un modelo de difusividad constante. Los valores obtenidos de las difusividades para las diversas muestras son más bajos a los reportados por Pacheco-Aguirre *et al.* (2015) para tiras de papa usando modelo de secado con la misma consideración de encogimiento isotrópico el cual obtuvieron valores de 3.84×10^{-10} , 4.86×10^{-10} y $5.61 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$ a las temperaturas de secado de 60, 70 y 80°C. Posteriormente se analizaron los datos para incluir el efecto de la deformación en la estimación de la difusividad efectiva del agua en el producto.

Diversos autores han evaluado la difusividad de agua en sistemas alimenticios tomando en cuenta cambios físicos como el encogimiento, valores comparables de la difusividad se han encontrado en papa, banana, chayote y mango, entre $3.55 \times 10^{-10} - 1.92 \times 10^{-9} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ (40 – 85°C), $1.40 \times 10^{-10} - 4.43 \times 10^{-9} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ (40 – 70°C), $4.44 \times 10^{-10} - 8.60 \times 10^{-10} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ (40 – 70°C) y $2.61 \times 10^{-10} - 1.30 \times 10^{-9} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ (40 – 70°C), respectivamente (da Silva *et al.*, 2014; Dissa *et al.*, 2008; Hassini

Tabla 5.6. Difusividades de agua estimadas con y sin encogimiento (E) en muestras secas experimentales

	Temperatura (°C)	$D \times 10^{10} (m^2/s)$							
		PC	PG	PM	PP	MCG	MCP	CCG	CCP
Sin E	70	9.02	7.63	1.84	7.74	6.67	6.74	6.66	5.56
Con E	60	2.91	-	1.08	-	-	-	-	-
	70	3.79	3.43	1.29	2.47	3.36	2.24	2.95	1.77
	80	5.05	-	1.60	-	-	-	-	-

PC= prismas de camote; PG= prismas de gel; PM= prismas de mortadela; PP= prismas de papaya; MCG= medios cilindros de gel; MCP= medios cilindros de papaya; CCG= cuartos de cilindro de gel; CCP= cuartos de cilindro de papaya.

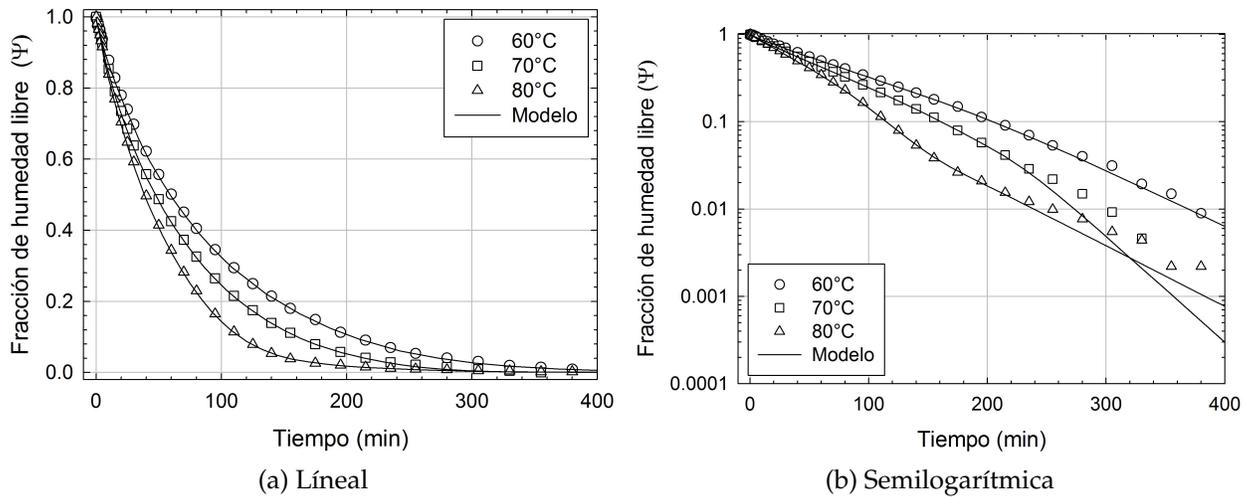


Figura 5.11. Curvas experimentales (figuras) y simuladas (líneas) de muestras de camote a diferentes temperaturas en representación lineal y semilogarítmica.

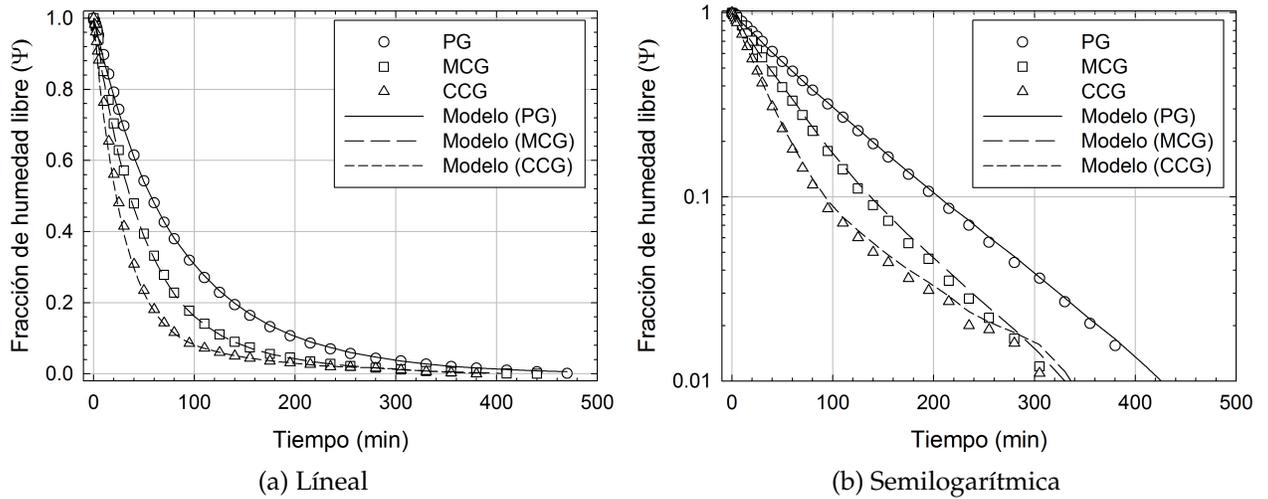


Figura 5.12. Curvas experimentales (figuras) y simuladas (líneas) de muestras de SMG a diferentes temperaturas en representación lineal y semilogarítmica. PG= prismas de gel; MCG= medios cilindros de gel; MCP= medios cilindros de papaya; CCG= cuartos de cilindro de gel.

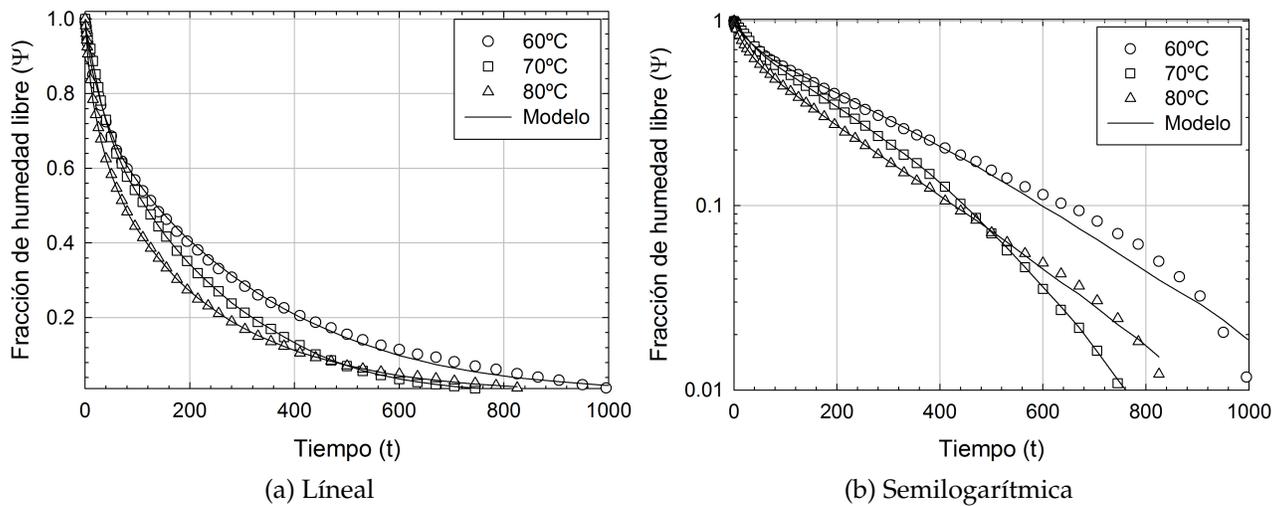


Figura 5.13. Curvas experimentales (figuras) y simuladas (líneas) de muestras de mortadela a diferentes temperaturas en representación lineal y semilogarítmica.

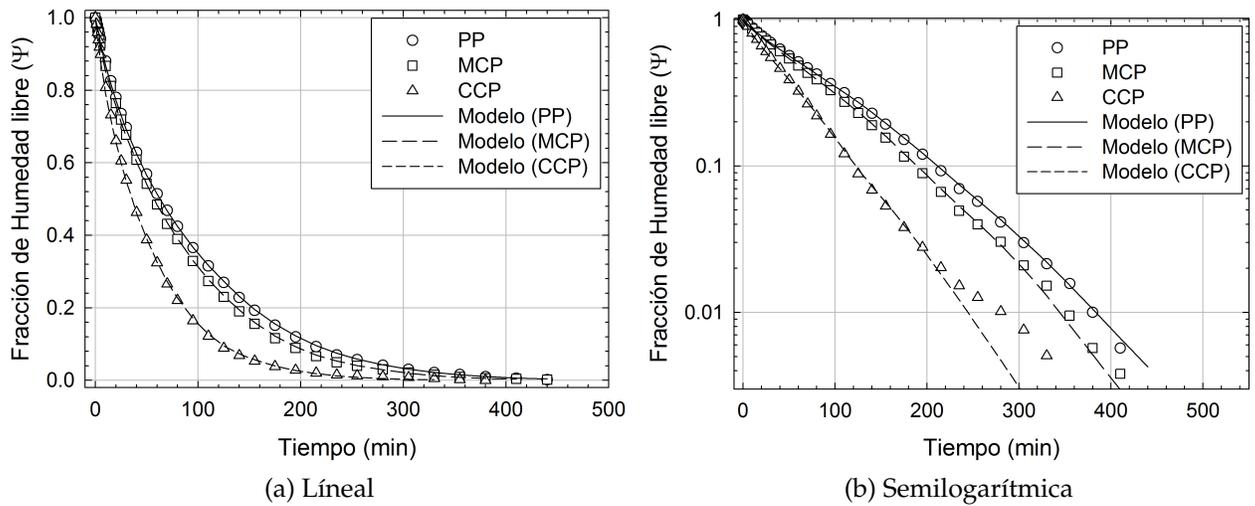


Figura 5.14. Curvas experimentales (figuras) y simuladas (líneas) de muestras de papaya a diferentes temperaturas en representación lineal y semilogarítmica. PP= prismas de papaya; MCP= medios cilindros de papaya; CCP= cuartos de cilindro de papaya.

et al., 2007; Ruiz-López *et al.*, 2012). Para papa, Ortiz-García-Carrasco *et al.* (2015) reportó valores de difusividad media, de 3.04×10^{-10} , 3.61×10^{-10} , 4.57×10^{-10} y $5.36 \times 10^{-10} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ en procesos de secado a temperaturas de 50 – 80°C, respectivamente. Por su parte, Singh & Pandey (2012), en el trabajo de secado de cubos de camote, obtuvieron valores de difusividades en el rango de 1.26×10^{-9} a $8.80 \times 10^{-9} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$. La difusividad de agua en cortes longitudinales de papa con geometrías no tradicionales en secado (medio cilindro y cuarto de cilindro sólido) ha sido estimada en 1.34 y $1.52 \times 10^{-9} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ respectivamente (Ruiz-López *et al.*, 2013). Dissa *et al.* (2008) calcularon los valores de difusividad de rebanadas de mango Amelie empleando para ello el método de las pendientes, cuando fueron sometidas a secado convectivo de 40-70°C. Los valores de difusividades considerando encogimiento fueron 2.61×10^{-10} a $1.30 \times 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$ mientras que los valores de difusividad sin considerar encogimiento fueron de 1.04×10^{-9} a $4.05 \times 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$. En otro estudio se secaron cilindros de calabaza, Guiné *et al.* (2011) determinaron la difusividad en 4.08×10^{-8} y $2.35 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$ a 30 y 70 °C, respectivamente.

Kurozawa *et al.* (2012) estimaron un valor de difusividad de agua de $3.0 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$ durante el secado de papa (70°C). Ramallo & Mascheroni (2013) obtuvieron

una valor de difusividad de agua de $5.0 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$ durante el secado de piña a 75°C .

Es claro mencionar que cuando no se consideran cambios físicos, como el encogimiento, en el cálculo de las difusividades, los valores obtenidos se sobreestiman esto concurra con lo evaluado en otros trabajos (Dissa *et al.*, 2008; Liu *et al.*, 2012). Por otro lado, Pacheco-Aguirre *et al.* (2014) estimaron las difusividades de agua radial, angular y axial en cilindros de zanahoria, a partir de una metodología simple; los autores demostraron que estas difusividades pueden ser empleadas para una descripción más precisa del proceso de secado en simulaciones 3D de sólidos anisotrópicos. Este procedimiento puede extenderse a procesos como deshidratación osmótica mientras que el proceso de secado convectivo este controlado por difusión.

El efecto de la temperatura sobre la difusividad de PC y PM se evaluó con una relación tipo Arrhenius empleando para ello datos de difusividad de agua considerando encogimiento; la energía de activación (E_a) fue de 26.9 kJ/mol y 19.2 kJ/mol y los factores pre-exponenciales (D_0) de $4.7 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ y $1.1 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$, respectivamente. La energía de activación de PC es más alta que la encontrada en otros estudios con camote como son los casos de Singh & Pandey (2012) y Fan *et al.* (2015); donde la energía de activación para productos secos fue de 11.38 y 15 kJ/mol, respectivamente. Diferencias observadas en la energía de activación entre estos y los estudios previos son muy parecidos debido a diversas suposiciones de la modelación durante la estimación de la difusividad de agua.

Otros autores como, Dissa *et al.* (2008) obtuvieron un valor de energía de activación de 25.35 kJ/mol similar al valor de PC, para una muestra de 5 mm de grosor. Mientras que Seremet *et al.* (2015) calcularon E_a en cilindro y/o cubos de calabaza en un rango de 30.73 – 30.30 kJ/mol a $50\text{-}70^\circ\text{C}$; este estudio demostró que la superficie de transferencia de calor es muy similares en muestras cilíndricas y cubos.

5.4. Simulación del proceso de secado

La solución preliminar del modelo de secado, con y sin considerar el cambio de forma del producto, permitió la identificación de parámetros para determinar la velocidad de encogimiento, listados en la Tabla 5.7. Como se muestra en la Figu-

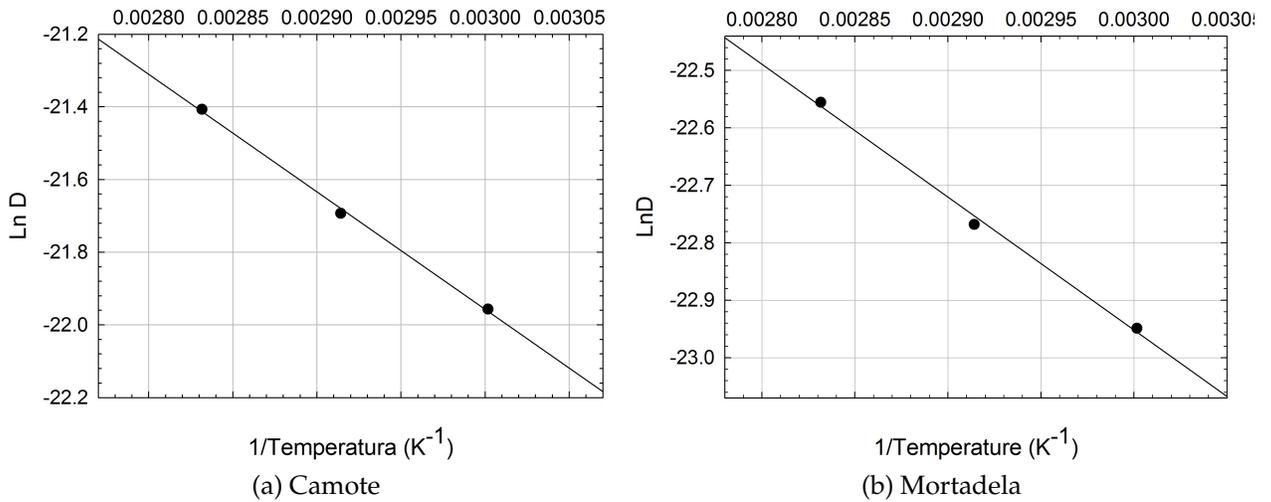


Figura 5.15. Curva de Arrhenius de las difusividades de agua de muestras de camote y mortadela.

ra 5.16, estos parámetros permitieron a los modelos de secado registrar una buena reproducción de la relación experimental entre área transversal normalizada de muestras de gel con su contenido de humedad medio ($R^2 > 0.83$). Los perfiles de humedad correspondientes en los cortes transversales de las muestras de gel considerando su cambio de forma, son mostrados en las Figuras 5.17-5.19. Como era de esperar, el modelo de secado propuesto proporciona tanto la forma como el tamaño del producto por el movimiento de los vértices de la malla durante la simulación. Estas simulaciones se asemejan mucho a los patrones experimentales ED mostrados en la Figura 5.6.

Aquí, el algoritmo de deformación permite no solo la contracción de la malla sino que también es capaz de doblar la geometría, deformando el producto de forma asimétrica, ajustando perfectamente la forma inicial y final del producto y extendiendo su aplicación a productos que no solo tengan forma de prismas. Este resultado mejora lo obtenido por Pacheco-Aguirre *et al.* (2015) en el que el método que proponía generaba elementos de malla con una distribución amplia de tamaños pero sin ser aplicado a mallas con el centroide localizado cerca o afuera del producto (ejemplo, medios y cuartos de cilindro) además de que la solución al algoritmo de E-D que propuso lo hizo integrando solo datos experimentales finales.

Por otro lado, aunque el modelo de secado sin considerar la deformación del pro-

Tabla 5.7. Parámetros estimados que ajustan el comportamiento de la velocidad de encogimiento.

Modelo de secado	Geometría	SMG		
		k	n	R^2
Sin cambio de forma en el producto	Prismas	24	0.92	0.898
	Medios cilindros	34	0.87	0.846
	Cuartos de cilindro	66	1.00	0.834
Con cambio de forma en el producto	Prismas	25	0.91	0.897
	Medios cilindros	25	0.78	0.832
	Cuartos de cilindro	70	0.99	0.831

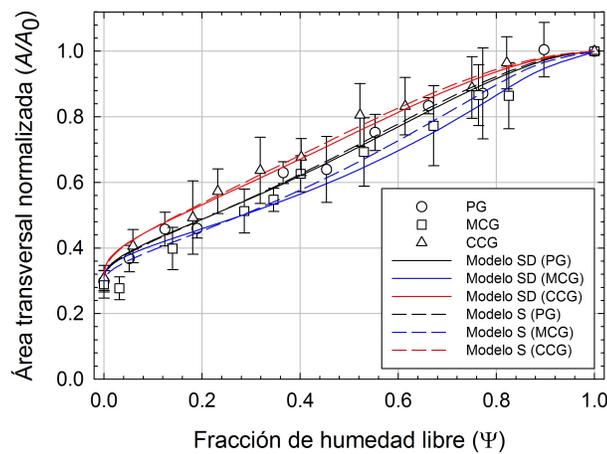


Figura 5.16. Efecto del contenido de humedad sobre el área transversal normalizada de SMG y papaya considerando encogimiento y/o deformación.

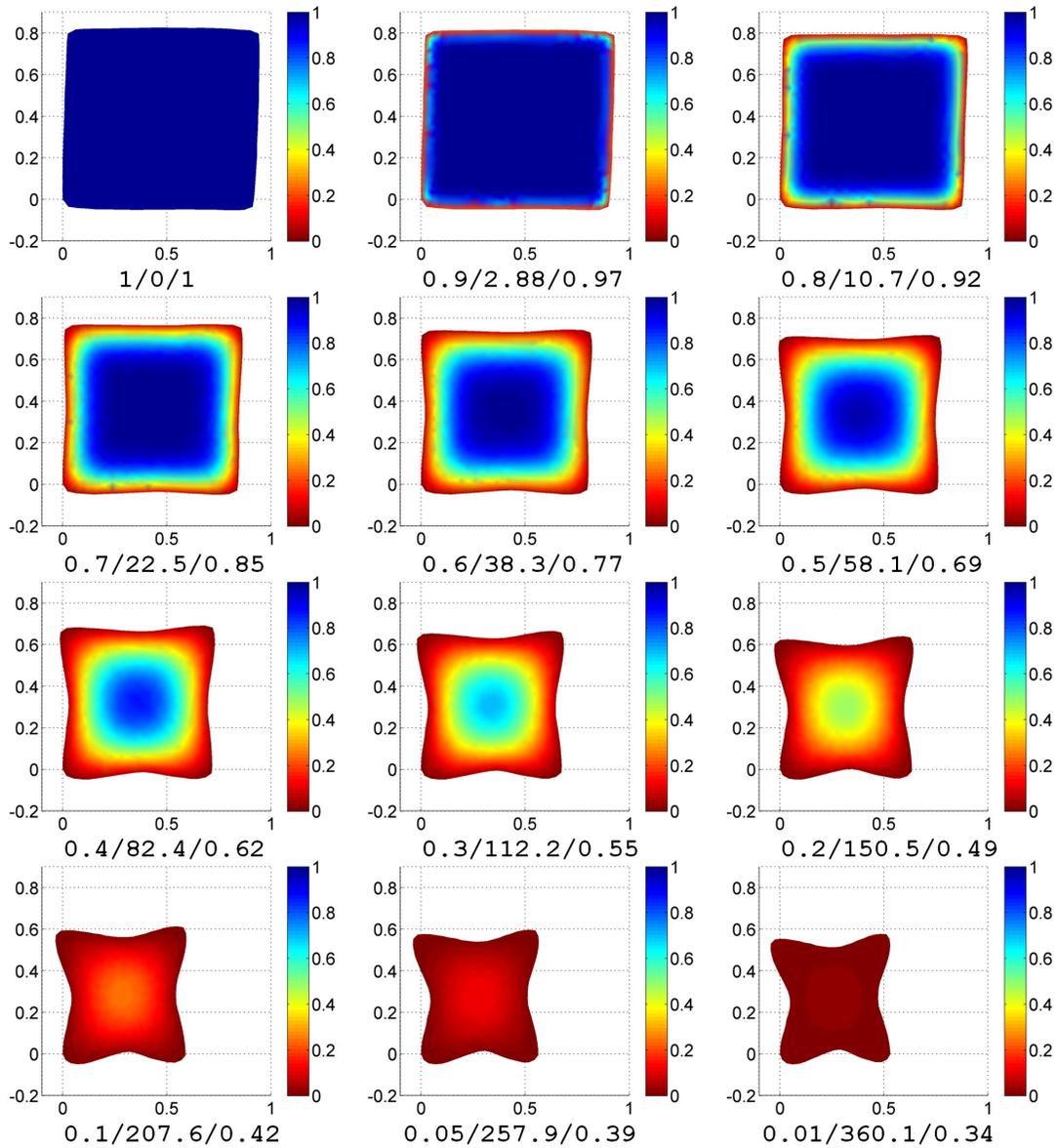


Figura 5.17. Perfiles de humedad predicha en prismas de gel considerando cambio de forma. La escala de ejes se refiere a las dimensiones del producto en centímetros. El número de cada gráfico representa la fracción de humedad libre (Ψ)/tiempo de secado (t , min)/área transversal normalizada (A/A_0).

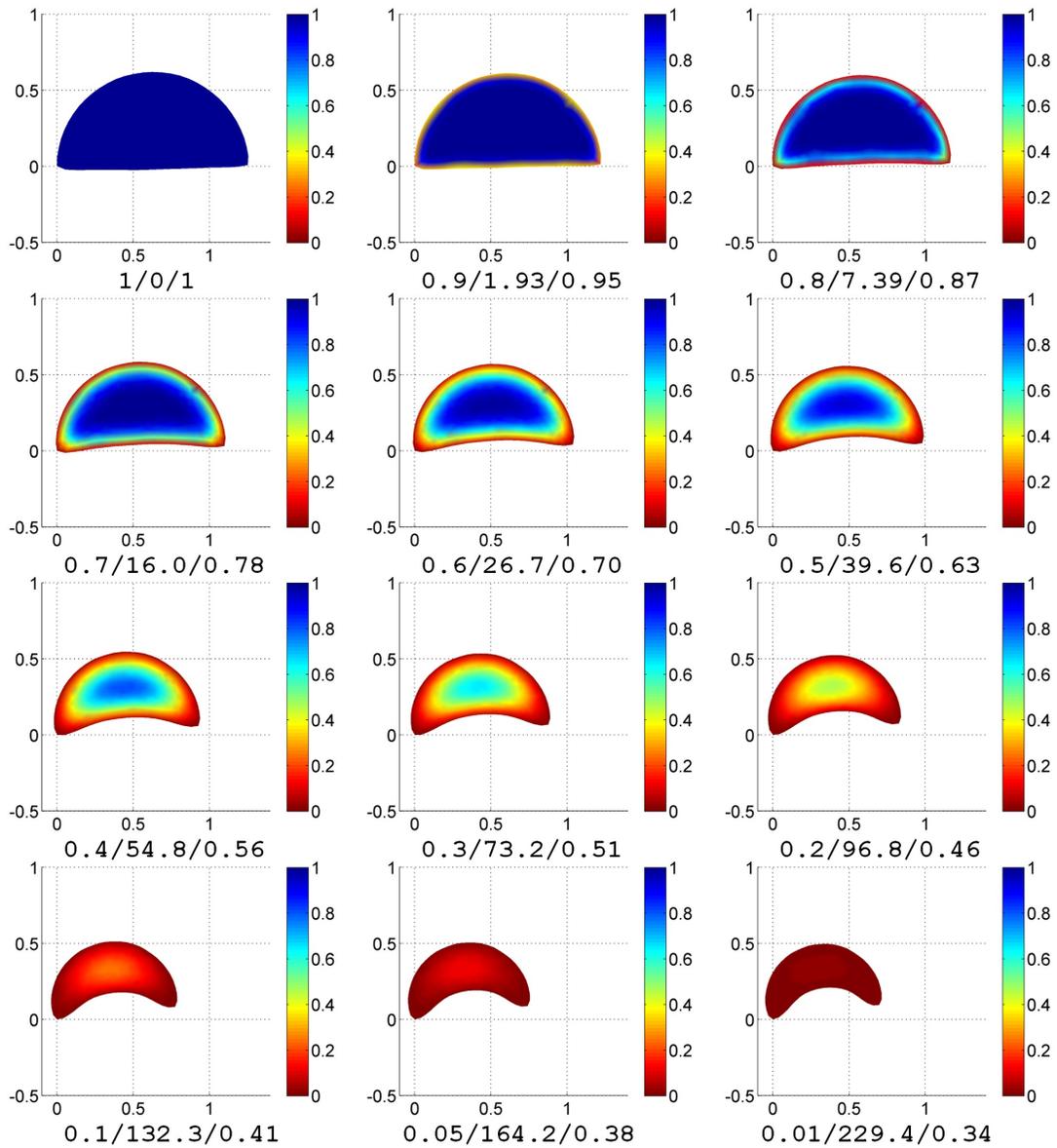


Figura 5.18. Perfiles de humedad predicha en medios de cilindro de gel considerando cambio de forma. La escala de ejes se refiere a las dimensiones del producto en centímetros. El número de cada gráfico representa la fracción de humedad libre (Ψ)/tiempo de secado (t , min)/área transversal normalizada (A/A_0).

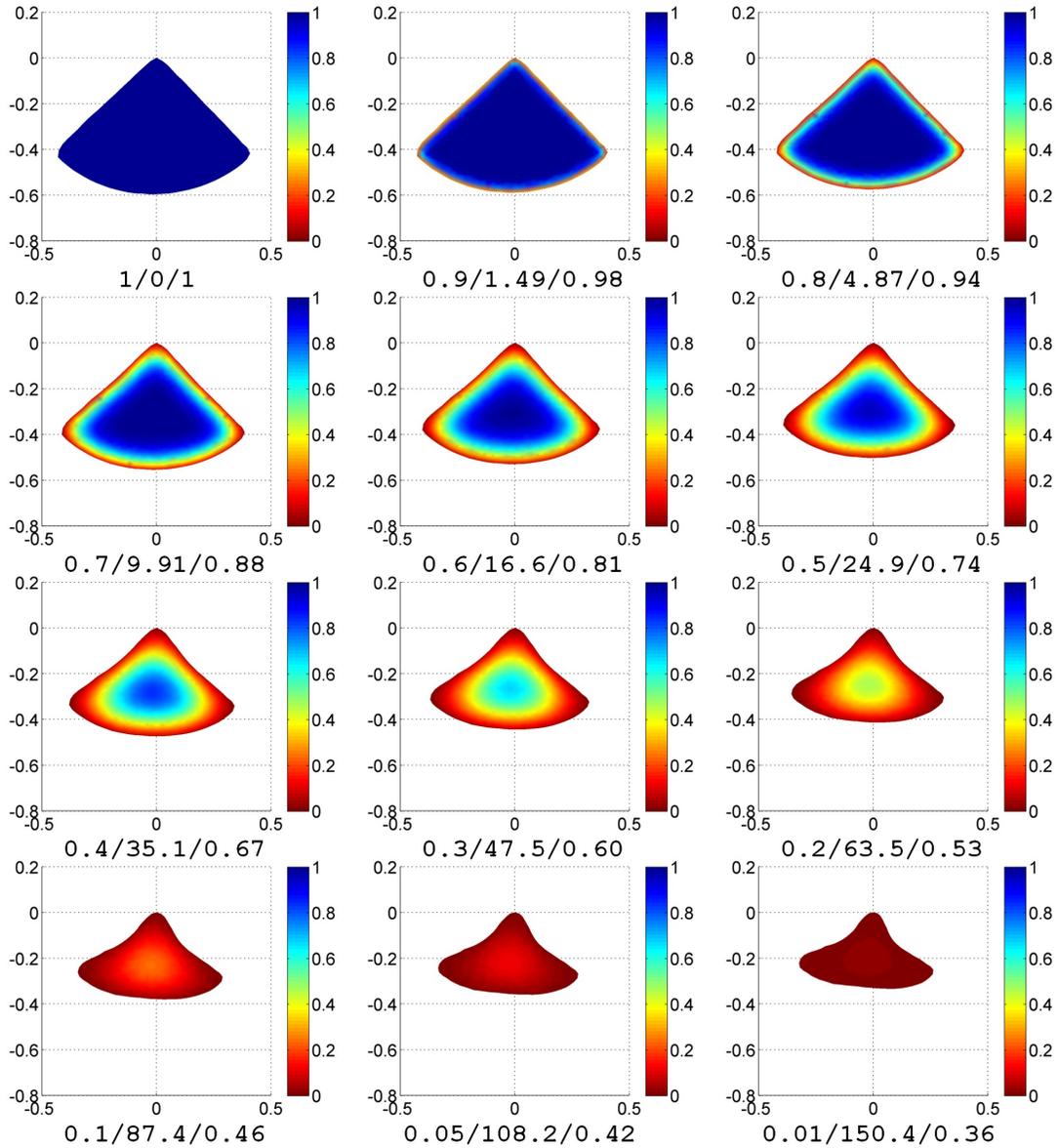


Figura 5.19. Perfiles de humedad predicha en cuartos de cilindro de gel considerando cambio de forma. La escala de ejes se refiere a las dimensiones del producto en centímetros. El número de cada gráfico representa la fracción de humedad libre (Ψ)/tiempo de secado (t , min)/área transversal normalizada (A/A_0).

ducto puede describir la relación esperada entre el área transversal y el contenido de humedad medio (Figura 5.16) este es incapaz de igualar la forma real del producto. Las esquinas del producto son las regiones con la mayor velocidad de transferencia de masa en perfiles de humedad obtenidos bajo supuestas geometrías deformables y no deformables, lo que los hace más propensos a desarrollar problemas de calidad. Un resultado similar fue obtenido por Pacheco-Aguirre *et al.* (2015) durante el secado de tiras de papa. Es evidente que la distribución de la humedad simulada sin considerar deformación del producto carece de correspondencia física. La selección de una forma apropiada para representar el producto es esencial para correlacionar con precisión los perfiles de humedad previstos con posible daño al producto durante el secado de alimentos, como se demostró por Prakash & Pan (2012) con granos de arroz. Con ello, se espera que un modelo de secado que describe cambios en la forma del producto, tal como el propuesto en este estudio, resultara más útil para analizar correctamente el desarrollo de posibles problemas de calidad que uno ignora.

Las curvas medias de secado correspondientes a los modelos de secado considerando simulación del proceso con encogimiento y encogimiento-deformación (ED) son representadas en la Figura 5.20; cabe mencionar que este procedimiento solo fue empleado para muestras secas de SMG. Estas curvas aparecen sobrepuestas al inicio del secado pero la curva para el modelo considerando deformación rápidamente se separa en contenidos de humedad bajos ($\Psi \approx 0.3$ para SMG; Figura 5.20b) de aquel donde solamente se considera encogimiento, previendo mayores tasas de secado. Esta separación coincide con el desarrollo experimental de la deformación severa del producto como se reportó por Ortiz-García-Carrasco *et al.* (2015). La Tabla 5.8 resume las difusividades de agua estimada de SMG con los modelos propuestos. Debe destacarse que todas las simulaciones considerando el cambio de forma de productos usando información promedio de sus características ED, permiten la evaluación de la difusividad de agua sin confiar en los datos de una muestra específica. Los modelos propuestos mostraron un buena reproducción del comportamiento experimental de SMG ($R^2 > 0.98$), Figura 5.20a). Las difusividades de agua estimadas para SMG por el modelo considerando deformación estuvieron entre 3.37×10^{-10} y 3.58×10^{-10} m²/s, mientras que aquellas estimadas por el modelo sin considerar deformación del producto estuvieron en el rango de 3.58×10^{-10} y 3.82×10^{-10} m²/s. La inclusión de la deformación del producto en el modelo de secado provo-

có una diferencia significativa en las difusividades estimadas en comparación con aquellas donde no se considero la deformación ($p < 0.05$). La falta de deformación del producto en el modelo de secado causo sobreestimación de la difusividad de agua entre el 6 y 12 %. Una tendencia similar fue observada por Pacheco-Aguirre *et al.* (2015) durante el secado de tiras de papa, que, según nuestro conocimiento, es el único estudio donde la difusividad de agua ha sido estimada considerando ED del producto de manera simultánea. En tal estudio, las difusividades de agua calculadas sin tomar en cuenta la deformación fueron sobreestimadas alrededor de 57-66 % en comparación con aquellas considerando el fenómeno.

Pacheco-Aguirre *et al.* (2015) reportó valores de difusividades para papa en el rango de $1.9 - 3.4 \times 10^{-10}$ y $3.0 - 5.5 \times 10^{-10}$ m^2/s con y sin considerar cambio de forma del producto (50-80°C), pero incluyendo la reducción de tamaño en ambos casos, respectivamente. Sin embargo, las diferencias en las difusividades de agua estimadas con y sin deformación no pueden ser anticipadas por lo que se requiere de más estudios para caracterizar diversos materiales. No se observó diferencia significativa en valores de difusividad de agua entre las geometrías estudiadas ($p < 0.05$); Sin embargo, ningún otro estudio ha evaluado el efecto simultaneo de la geometría del producto y el cambio de forma sobre la difusividad de agua, impidiendo una comparación directa con los resultados obtenidos en este trabajo.

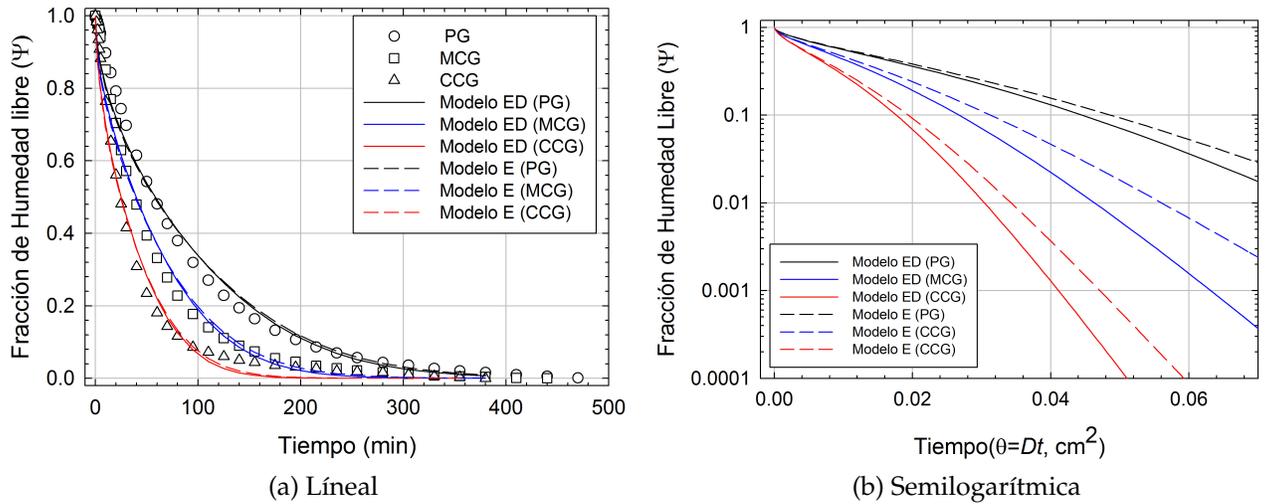


Figura 5.20. Curvas experimentales (figuras) y simuladas (líneas) de muestras de SMG a diferentes temperaturas en representación lineal y semilogarítmica. PG= prismas de gel; MCG= medios cilindros de gel; MCP= medios cilindros de papaya; CCG= cuartos de cilindro de gel..

Tabla 5.8. Estimación de difusividades de agua de SMG mediante simulación del proceso de secado.

Modelo de secado	Geometría	$D \times 10^{10}$ (m^2/s)	Intervalos de confianza (95 %)	R^2
Con encogimiento (E)	Prismas	3.87	3.50/4.13	0.983
	Medios cilindros	3.78	3.43/4.14	0.983
	Cuartos de cilindro	3.58	3.25/3.92	0.985
Con encogimiento y deformación (ED)	Prismas	3.58	3.31/3.85	0.985
	Medios cilindros	3.37	3.08/3.65	0.985
	Cuartos de cilindro	3.37	3.05/3.70	0.985

VI. CONCLUSIONES

El comportamiento ED de las muestras analizadas durante el secado convectivo fue sucesivamente caracterizado usando análisis de imagen. Los factores de forma y patrones de deformación permitieron identificar el momento en el que la deformación ocurre, deformación que se presenta con el mismo contenido de humedad independientemente de las temperaturas o geometrías estudiadas. Todas las muestras presentan un encogimiento ideal y sus variables no presentaron diferencias significativas en su evolución contra el contenido de humedad a diferentes temperaturas de secado y diferentes geometrías. El cálculo de difusividad de agua debe considerar un comportamiento ED para no sobrestimar los valores hasta en un 12%.

Una metodología previamente reportada para describir el proceso de secado en productos que experimentan cambios de forma fue adicionalmente refinada introduciendo un nuevo algoritmo para estimar las mallas inicial y final permitiendo la simulación de perfiles de humedad en nuevas geometrías. Se necesitan estudios adicionales para evaluar el efecto de nuevos materiales, geometrías y pretratamientos sobre el comportamiento ED y su impacto sobre la estimación de las propiedades de transferencia de masa.

Bibliografía

- Afolabi, Morakinyo Tunde, Black, Allen Gbolahan, & Adekunbi, Taiwo Kehinde. 2016. The influence of drying on the physical properties of sweet potato slices. *Agricultural Engineering International: CIGR Journal*, **18**(1), 301–313.
- Aghbashlo, Mortaza, Hosseinpour, Soleiman, & Ghasemi-Varnamkhasi, Mahdi. 2014. Computer vision technology for real-time food quality assurance during drying process. *Trends in Food Science & Technology*, **39**(1), 76–84.
- Aguilera, José Miguel, Chiralt, Amparo, & Pedro. 2003. Food dehydration and product structure. *Trends in Food Science & Technology*, **14**(10), 432–437.
- Aprajeeta, J., Gopirajah, R., & Anandharamakrishnan, C. 2015. Shrinkage and porosity effects on heat and mass transfer during potato drying. *Journal of Food Engineering*, **144**, 119–128.
- Aral, Serdar, & Beşe, Ayşe Vildan. 2016. Convective drying of hawthorn fruit (*Crataegus* spp.): effect of experimental parameters on drying kinetics, color, shrinkage, and rehydration capacity. *Food chemistry*, **210**, 577–584.
- Azzouz, S., Guizani, A., Jomaa, W., & Belghith, A. 2002. Moisture diffusivity and drying kinetic equation of convective drying of grapes. *Journal of Food engineering*, **55**(4), 323–330.
- Bai, Yan, Rahman, M Shafiur, Perera, Conrad O, Smith, Bronwen, & Melton, Laurence D. 2002. Structural changes in apple rings during convection air-drying with controlled temperature and humidity. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, **50**(11), 3179–3185.
- Beigi, Mohsen. 2016. Hot air drying of apple slices: dehydration characteristics and quality assessment. *Heat and Mass Transfer*, **52**(8), 1435–1442.
- Bon, J., Simal, S., Rossello, C., & Mulet, A. 1997. Drying characteristics of hemispherical solids. *Journal of Food Engineering*, **34**(2), 109–122.
- Brosnan, Tadhg, & Sun, Da-Wen. 2004. Improving quality inspection of food products by computer vision—a review. *Journal of Food Engineering*, **61**(1), 3–16.
- Campos-Mendiola, R., Hernández-Sánchez, H., 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 (SA-

- FES) methodology. *Journal of Food Engineering*, **83**(2), 285–292.
- Chen, Lan, & Linus, Umezuruike. 2013. Texture measurement approaches in fresh and processed foods—A review. *Food Research International*, **51**(2), 823–835.
- Chen, Quansheng, Zhang, Chaojie, Zhao, Jiewen, & Ouyang, Qin. 2013. Recent advances in emerging imaging techniques for non-destructive detection of food quality and safety. *Trends in Analytical Chemistry*, **52**, 261–274.
- Crank, J. 1979. *The mathematics of diffusion*. Oxford University Press.
- Curcio, Stefano, & Aversa, Maria. 2014. Influence of shrinkage on convective drying of fresh vegetables: a theoretical model. *Journal of Food Engineering*, **123**, 36–49.
- da Silva, Wilton Pereira, Hamawand, Ihsan, & e Silva, Cleide M.D.P.S. 2014. A liquid diffusion model to describe drying of whole bananas using boundary-fitted coordinates. *Journal of Food Engineering*, **137**, 32–38.
- De Lima, AGB, Queiroz, MR, & Nebra, SA. 2002. Simultaneous moisture transport and shrinkage during drying of solids with ellipsoidal configuration. *Chemical Engineering Journal*, **86**(1), 85–93.
- Defraeye, Thijs. 2014. Advanced computational modelling for drying processes—A review. *Applied Energy*, **131**, 323–344.
- Defraeye, Thijs. 2017. Impact of size and shape of fresh-cut fruit on the drying time and fruit quality. *Journal of Food Engineering*, **210**, 35–41.
- Defraeye, Thijs, & Verboven, Pieter. 2017. Convective drying of fruit: role and impact of moisture transport properties in modelling. *Journal of Food Engineering*, **193**, 95–107.
- Dissa, A.O., Desmorieux, H., Bathiebo, J., & Koulidiati, J. 2008. Convective drying characteristics of Amelie mango (*Mangifera Indica* L. cv. ÔAmelieÕ) with correction for shrinkage. *Journal of food Engineering*, **88**(4), 429–437.
- Du, Cheng-Jin, & Sun, Da-Wen. 2004. Recent developments in the applications of image processing techniques for food quality evaluation. *Trends in Food Science & Technology*, **15**(5), 230–249.
- Ebrahimi, MA, Mohtasebi, SS, Rafiee, Sh, Hosseinpour, S, *et al.* 2012. Investigation of banana slices shrinkage using image processing technique. *Australian journal of crop science*, **6**(5), 938.
- Fan, Kai, Chen, Libing, He, Jie, & Yan, Fengwei. 2015. Characterization of thin layer hot air drying of sweet potatoes (*Ipomoea batatas* L.) slices. *Journal of food processing and preservation*, **39**(6), 1361–1371.

- Fernandez, L., Castellero, C., & Aguilera, J.M. 2005. An application of image analysis to dehydration of apple discs. *Journal of Food Engineering*, **67**(1), 185–193.
- Guiné, Raquel PF, Pinho, Susana, & Barroca, Maria João. 2011. Study of the convective drying of pumpkin (*Cucurbita maxima*). *Food and bioproducts processing*, **89**(4), 422–428.
- Gulati, Tushar, & Datta, Ashim K. 2015. Mechanistic understanding of case-hardening and texture development during drying of food materials. *Journal of Food Engineering*, **166**(05), 119D–138.
- Gumeta-Chávez, Carolina, Chanona-Pérez, José Jorge, Mendoza-Pérez, Jorge Alberto, Terrés-Rojas, Eduardo, Garibay-Febles, Vicente, & Gutiérrez-López, Gustavo F. 2011. Shrinkage and deformation of *Agave atrovirens* Karw tissue during convective drying: Influence of structural arrangements. *Drying Technology*, **29**(6), 612–623.
- Gunasekaran, Sundaram. 1996. Computer vision technology for food quality assurance. *Trends in Food Science & Technology*, **7**(8), 245–256.
- Hassini, L., Azzouz, S., Peczalski, R., & Belghith, A. 2007. Estimation of potato moisture diffusivity from convective drying kinetics with correction for shrinkage. *Journal of Food Engineering*, **79**(1), 47–56.
- Herman-Lara, E., Martínez-Sánchez, C.E., Amador-Mendoza, A., & Ruiz-López, I.I. 2010. Effect of airflow reversal on packed bed drying of carrots. *Journal of Food Process Engineering*, **33**(4), 684–700.
- Herman-Lara, E., Martínez-Sánchez, C.E., Pacheco-Angulo, H., Carmona-García, R., Ruiz-Espinosa, H., & Ruiz-López, I.I. 2013. Mass transfer modeling of equilibrium and dynamic periods during osmotic dehydration of radish in NaCl solutions. *Food and Bioproducts Processing*, **91**(3), 216–224.
- Hernandez, JA, Pavon, G, & Garcia, MA. 2000. Analytical solution of mass transfer equation considering shrinkage for modeling food-drying kinetics. *Journal of food engineering*, **45**(1), 1–10.
- Hosseinpour, Soleiman, Rafiee, Shahin, Aghbashlo, Mortaza, & Mohtasebi, Seyyed Saeid. 2015. Computer vision system (CVS) for in-line monitoring of visual texture kinetics during shrimp (*Penaeus spp.*) drying. *Drying technology*, **33**(2), 238–254.
- Jangam, Sachin V., Law, Chung Lim, & Mujumdar, Arun S. 2010. *Drying of Foods, Vegetables and Fruits*. Vol. 1.

- Khazaei, Nasser Behroozi, Tavakoli, Teymour, Ghassemian, Hassan, Khoshtaghaza, Mohammad Hadi, & Banakar, Ahmad. 2013. Applied machine vision and artificial neural network for modeling and controlling of the grape drying process. *Computers and electronics in agriculture*, **98**, 205–213.
- Kilpatrick, P.W., Lowe, E., & Arsdel, W.B. Van. 1955. Tunnel dehydrators for fruit and vegetables. *Advances in Food Research*, **6**, 313–372.
- Ko, Banu, Eren, Ismail, & Kaymak, Figen. 2008. Modelling bulk density, porosity and shrinkage of quince during drying: The effect of drying method. *Journal of Food Engineering*, **85**(3), 340–349.
- Kurozawa, Louise Emy, Hubinger, Miriam Dupas, & Park, Kil Jin. 2012. Glass transition phenomenon on shrinkage of papaya during convective drying. *Journal of Food Engineering*, **108**(1), 43–50.
- Lagunez-Rivera, L., Ruiz-López, I.I., García-Alvarado, M.A., & Salgado-Cervantes, M.A. 2007. Mathematical simulation of the effective diffusivity of water during drying of papaya. *Drying Technology*, **25**(10), 1633–1638.
- Liu, Guohong, Chen, Junruo, Liu, Meihong, & Wan, Xinxin. 2012. Shrinkage, porosity and density behaviour during convective drying of bio-porous material. *Procedia Engineering*, **31**, 634–640.
- Martynenko, AI. 2006. Computer-vision system for control of drying processes. *Drying Technology*, **24**(7), 879–888.
- Mayor, L., & Sereno, A.M. 2004. Modelling shrinkage during convective drying of food materials: a review. *Journal of Food Engineering*, **61**(3), 373–386.
- Mayor, L, Moreira, R, & Sereno, AM. 2011. Shrinkage, density, porosity and shape changes during dehydration of pumpkin (*Cucurbita pepo* L.) fruits. *Journal of Food Engineering*, **103**(1), 29–37.
- 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. *Food and Bioproducts Processing*, **76**(3), 138–142.
- McMinn, WA.M., & Magee, T.R.A. 1997. Physical characteristics of dehydrated potatoes—Part I. *Journal of Food Engineering*, **33**(1), 37–48.
- McMinn, WAM, & Magee, TRA. 1999. Principles, methods and applications of the convective drying of foodstuffs. *Food and Bioproducts Processing*, **77**(3), 175–193.
- Mery, Domingo. 2004. Visión por computador. *Santiago de Chile. Universidad Católica de Chile*.

- Montero, Raul S, & Bribiesca, Ernesto. 2009. State of the art of compactness and circularity measures. *Pages 1305–1335 of: International mathematical forum*, vol. 4.
- Moreda, G.P., Muñoz, M.A., Ruiz-Altisent, M., & Perdigones, A. 2012. Shape determination of horticultural produce using two-dimensional computer vision—A review. *Journal of Food Engineering*, **108**(2), 245–261.
- Moses, JA, Norton, Tomás, Alagusundaram, K, & Tiwari, BK. 2014. Novel drying techniques for the food industry. *Food Engineering Reviews*, **6**(3), 43–55.
- Mujumdar, Arun S. 2014. *Handbook of industrial drying*. CRC Press.
- Muñoz, Israel, Rubio-Celorio, Marc, Garcia-Gil, Núria, Guàrdia, Maria Dolors, & Fulladosa, Elena. 2015. Computer image analysis as a tool for classifying marbling: A case study in dry-cured ham. *Journal of Food Engineering*, **166**, 148–155.
- Narendra, V.G., & Hareesha, K.S. 2010. Prospects of computer vision automated grading and sorting systems in agricultural and food products for quality evaluation. *International Journal of Computer Applications*, **1**(4), 1–9.
- Ochoa, MR, Kessler, AG, Pirone, BN, Marquez, CA, & De Michelis, A. 2002. Volume and area shrinkage of whole sour cherry fruits (*Prunus cerasus*) during dehydration. *Drying Technology*, **20**(1), 147–156.
- Ortiz-García-Carrasco, B., Yañez-Mota, E., Pacheco-Aguirre, F.M., Ruiz-Espinosa, H., García-Alvarado, M.A., Cortés-Zavaleta, O., & Ruiz-López, I.I. 2015. Drying of shrinkable food products: Appraisal of deformation behavior and moisture diffusivity estimation under isotropic shrinkage. *Journal of Food Engineering*, **144**, 138–147.
- Pacheco-Aguirre, FM, Ladrón-González, A, Ruiz-Espinosa, H, García-Alvarado, MA, & Ruiz-López, II. 2014. A method to estimate anisotropic diffusion coefficients for cylindrical solids: application to the drying of carrot. *Journal of Food Engineering*, **125**, 24–33.
- Pacheco-Aguirre, F.M., García-Alvarado, M.A., Corona-Jiménez, E., Ruiz-Espinosa, H., Cortés-Zavaleta, O., & Ruiz-López, I.I. 2015. Drying modeling in products undergoing simultaneous size reduction and shape change: Appraisal of deformation effect on water diffusivity. *Journal of Food Engineering*, **164**(05), 30–39.
- Panyawong, Sawitree, & Devahastin, Sakamon. 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**(1), 151–161.
- Patel, Krishna Kumar, Kar, A., Jha, S.N., & Khan, M.A. 2012. Machine vision system: a tool for quality inspection of food and agricultural products. *Journal of Food Science and Technology*, **49**(2), 123–141.
- Pavón-Melendez, G., Hernández, J.A., Salgado, M.A., & García, M.A. 2002. Dimensionless analysis of the simultaneous heat and mass transfer in food drying. *Journal of Food Engineering*, **51**, 347–353.
- Porciuncula, Barbara DA, Segura, Luis A, & Laurindo, João B. 2016. Processes for controlling the structure and texture of dehydrated banana. *Drying technology*, **34**(2), 167–176.
- Prakash, Bhagwati, & Pan, Zhongli. 2012. Effect of geometry of rice kernels on drying modeling results. *Drying Technology*, **30**(8), 801–807.
- Press, W.H., Teukolsky, S.A., Vetterling, W.T., & Flannery, B.P. 2007. *Numerical recipes. The art of scientific computing*. Third edn. USA: Cambridge University Press.
- Rafiq, Aasima, Makroo, Hilal A., Sachdeva, Poonam, & Sharma, Savita. 2013. Application of Computer Vision System in Food Processing- A Review. *International Journal of Engineering Research and Applications*, **3**(6), 1197–1205.
- Ramallo, Laura Ana, & Mascheroni, Rodolfo Horacio. 2013. Effect of shrinkage on prediction accuracy of the water diffusion model for pineapple drying. *Journal of Food Process Engineering*, **36**(1), 66–76.
- Rashidi, M., Gholami, M., & Abbassi, S. 2010. Cantaloupe volume determination through image processing. *Journal of Agricultural Science and Technology*, **11**, 623–631.
- Ratti, C. 1994. Shrinkage during drying of foodstuffs. *Journal of Food Engineering*, **23**(1), 91–105.
- Riva, Marco, Campolongo, Stefano, Leva, Alexa Avitabile, Maestrelli, Andrea, & Torreggiani, Danila. 2005. Structure–property relationships in osmo-air-dehydrated apricot cubes. *Food Research International*, **38**(5), 533–542.
- 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., & Herman-Lara, E. 2009. Statistical indices for the selection of food sorption isotherm models. *Drying Technology*, **27**(6), 726–738.

- Ruiz-López, I.I., Córdova, A.V., Rodríguez-Jimenes, G.C., & García-Alvarado, M.A. 2004. Moisture and temperature evolution during food drying: effect of variable properties. *Journal of Food Engineering*, **63**, 117–124.
- Ruiz-López, I.I., Huerta-Mora, I.R., Vivar-Vera, M.A., Martínez-Sánchez, C.E., & Herman-Lara, E. 2010. Effect of osmotic dehydration on air-drying characteristics of chayote. *Drying Technology*, **28**(10), 1201–1212.
- Ruiz-López, I.I., Ruiz-Espinosa, H., Luna-Guevara, M.L., & García-Alvarado, M.A. 2011. Modeling and simulation of heat and mass transfer during drying of solid with hemispherical shell geometry. *Computers and Chemical Engineering*, **35**, 191–199.
- Ruiz-López, I.I., Ruíz-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**(3), 427–435.
- Ruiz-López, I.I., Ruíz-Espinosa, H., Pacheco-Aguirre, F.M., & García-Alvarado, M.A. 2013. Drying of food products shaped as longitudinal sections of solid and annular cylinders: Modeling and simulation. *Drying Technology*, **31**(10), 1148–1159.
- Saldaña, Erick, Siche, Raúl, Luján, Mariano, & Quevedo, Roberto. 2013. Review: computer vision applied to the inspection and quality control of fruits and vegetables. *Brazilian Journal of Food Technology*, **16**(4), 254–272.
- Salim, Md, Salina, Nora, Gariépy, Yvan, & Raghavan, Vijaya. 2017. Hot air drying and microwave-assisted hot air drying of broccoli stalk slices (*Brassica oleracea* L. Var. *Italica*). *Journal of Food Processing and Preservation*, **41**(3).
- Sampson, David Joseph, Chang, Young Ki, Rupasinghe, HP Vasantha, & Zaman, Qamar UZ. 2014. A dual-view computer-vision system for volume and image texture analysis in multiple apple slices drying. *Journal of Food Engineering*, **127**, 49–57.
- Sansiribhan, Sansanee, Devahastin, Sakamon, & Somchart. 2012. Generalized microstructural change and structure-quality indicators of a food product undergoing different drying methods and conditions. *Journal of Food Engineering*, **109**(1), 148–154.
- Santacruz-Vázquez, V., Santacruz-Vázquez, C., Welti-Chanes, J., Farrera-Rebollo, R.R., Alamilla-Beltrán, L., Chanona-Pérez, J., & Gutiérrez-López, G.F. 2008. Ef-

- fects of air-drying on the shrinkage, surface temperatures and structural features of apples slabs by means of fractal analysis. *Revista Mexicana de Ingeniería Química*, **7**(1), 55–63.
- Seremet, Liliana, Botez, Elisabeta, Nistor, Oana-Viorela, Gogus, Fahrettin, Andronoiu, Doina Georgeta, Mocanu, Gabriel-Danut, *et al.* 2015. Influence of drying conditions on the effective diffusivity and activation energy during convective air and vacuum drying of pumpkin. *The Annals of the University of Dunarea de Jos of Galati. Fascicle VI. Food Technology*, **39**(2), 20.
- Singh, Ngankham Joykumar, & Pandey, Ram Krishna. 2012. Convective air drying characteristics of sweet potato cube (*Ipomoea batatas* L.). *Food and Bioprocess Processing*, **90**(2), 317–322.
- Stone, James V. 1993. Computer vision: What is the object. *Prospects for AI, Proc. Artificial Intelligence and Simulation of Behaviour. Birmingham, England., IOS Press, Amsterdam*, 199–208.
- Sucar, L.E., & Gómez, G. 2011. Visión Computacional. *Instituto Nacional de Astrofísica, Óptica y Electrónica, Puebla, México*.
- Suzuki, K., Kubota, K., Hasegawa, T., & Hosaka, H. 1976. Shrinkage in dehydration of root vegetables. *Journal of Food Science*, **41**(5), 1189–1193.
- Tillett, R.D. 1990. Image analysis for agricultural processes division note DN 1585. *Silsoe Research Institute*.
- Timmermans, A.J.M. 1995. Computer vision system for on-line sorting of pot plants based on learning techniques. *Pages 91–98 of: II International Symposium On Sensors in Horticulture 421*.
- Tiwari, Shipra, Ravi, Ramasamy, & Bhattacharya, Suvendu. 2012. Dehumidifier Assisted Drying of a Model Fruit Pulp-Based Gel and Sensory Attributes. *Journal of food science*, **77**(7).
- Toğrul, İnci Turk, & İspir, Ayşe. 2007. Effect on effective diffusion coefficients and investigation of shrinkage during osmotic dehydration of apricot. *Energy Conversion and Management*, **48**(10), 2611–2621.
- Udomkun, Patchimaporn, Nagle, Marcus, Argyropoulos, Dimitrios, Mahayothee, Busarakorn, & Müller, Joachim. 2016. Multi-sensor approach to improve optical monitoring of papaya shrinkage during drying. *Journal of Food Engineering*, **189**, 82–89.
- Vega-Mercado, H., Góngora-Nieto, M. M., & Barbosa-Cánovas, G.V. 2001. Advances

- in dehydration of foods. *Journal of Food Engineering*, **49**(4), 271–289.
- Vyawahare, A., Rao, K. Jayaraj, & Pagote, C.N. 2013. Computer vision system for colour measurement-fundamentals and applications in food industry: a review. *Research Journal of Engineering and Technology*, **6**(3), 14–22.
- Wang, N, & Brennan, JG. 1995. Changes in structure, density and porosity of potato during dehydration. *Journal of Food Engineering*, **24**(1), 61–76.
- Wikipedia. 2018 (Jan.). *Sweet potato*.
- Yadollahinia, Alireza, & Jahangiri, Mehdi. 2009. Shrinkage of potato slice during drying. *Journal of Food Engineering*, **94**(1), 52–58.
- Yadollahinia, Alireza, Latifi, Acefeh, & Reza. 2009. New method for determination of potato slice shrinkage during drying. *Computers and Electronics in Agriculture*, **65**(2), 268–274.
- Yam, Kit L., & Papadakis, S. E. 2004. A simple digital imaging method for measuring and analyzing color of food surfaces. *Journal of Food Engineering*, **61**(1), 137–142.
- Yan, Zhengyong, Sousa-Gallagher, Maria J., & Oliveira, Fernanda A.R. 2008. Shrinkage and porosity of banana, pineapple and mango slices during air-drying. *Journal of Food Engineering*, **84**(3), 430–440.
- Zhang, Baohua, Huang, Wenqian, Li, Jiangbo, Zhao, Chunjiang, Fan, Shuxiang, Wu, Jitao, & Chengliang. 2014. Principles, developments and applications of computer vision for external quality inspection of fruits and vegetables: A review. *Food Research International*, **62**, 326–343.
- Zheng, Chaoxin, Sun, Da-Wen, & Zheng, Liyun. 2006. Recent developments and applications of image features for food quality evaluation and inspection—a review. *Trends in Food Science & Technology*, **17**(12), 642–655.
- Zielinska, Magdalena, Sadowski, Piotr, & Błaszczak, Wioletta. 2016. Combined hot air convective drying and microwave-vacuum drying of blueberries (*Vaccinium corymbosum* L.): Drying kinetics and quality characteristics. *Drying Technology*, **34**(6), 665–684.
- Zogzas, N.P., Maroulis, Z.B., & Marinos-Kouris, D. 1994. Densities, shrinkage and porosity of some vegetables during air drying. *Drying technology*, **12**(7), 1653–1666.