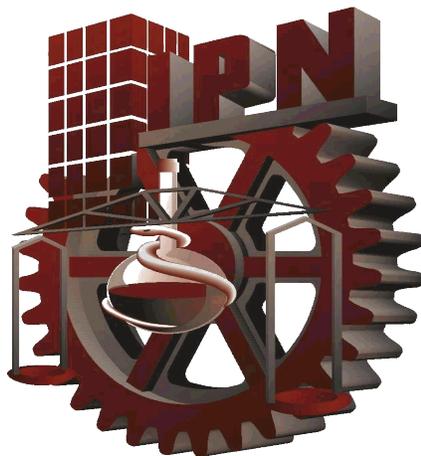


INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL

CENTRO INTERDISCIPLINARIO DE INVESTIGACIÓN PARA EL DESARROLLO
INTEGRAL REGIONAL UNIDAD OAXACA



MAESTRÍA EN CIENCIAS EN CONSERVACIÓN Y APROVECHAMIENTO DE
RECURSOS NATURALES

“TRANSPORTE DE MASA Y CALOR DURANTE EL SECADO CONVECTIVO DE TUBÉRCULOS (*Solanum tuberosum*) CONSIDERANDO SU DEFORMACIÓN”

TESIS QUE PARA OBTENER EL GRADO DE
MAESTRO EN CIENCIAS PRESENTA:

ADRIANA SOLEDAD TOVILLA MORALES

DIRECTOR DE TESIS:

DR. SADO TH SANDOVAL TORRES

SANTA CRUZ XOXOCOTLÁN, OAXACA

DICIEMBRE, 2015



**INSTITUTO POLITECNICO NACIONAL
SECRETARIA DE INVESTIGACION Y POSGRADO**

ACTA DE REVISION DE TESIS

En la Ciudad de Oaxaca de Juárez siendo las 13:00 horas del día 10 del mes de diciembre del 2015 se reunieron los miembros de la Comisión Revisora de Tesis designada por el Colegio de Profesores de Estudios de Posgrado e Investigación del **Centro Interdisciplinario de Investigación para el Desarrollo Integral Regional, Unidad Oaxaca** (CIIDIR-OAXACA) para examinar la tesis de grado titulada: "Trasporte de masa y calor durante el secado convectivo de tubérculos (*Solanum tuberosum*) considerando su deformación "

Presentado por la alumna:

Tovilla Apellido paterno	Morales materno	Adriana Soledad nombre(s)
Con registro: B 1 3 0 1 1 8		

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

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

LA COMISION REVISORA
Director de tesis

Dr. Sadoth Sandoval Torres

Dr. Juan Rodríguez Ramírez

Dr. Carlos Martínez Álvarez

Dra. Lilia Leticia Méndez Lagunas

Dra. Luicita Lagunes Rivera

EI PRESIDENTE DEL COLEGIO

Dr. José Rodolfo Martínez y Cárdenas
Encargado de la Dirección





INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL
SECRETARÍA DE INVESTIGACIÓN Y POSGRADO

CARTA CESION DE DERECHOS

En la Ciudad de Oaxaca de Juárez el día 10 del mes de diciembre del año 2015, el (la) que suscribe Adriana Soledad Tovilla Morales alumno (a) del Programa de **MAESTRÍA EN CIENCIAS EN CONSERVACIÓN Y APROVECHAMIENTO DE RECURSOS NATURALES** con número de registro B130118, adscrito al Centro Interdisciplinario de Investigación para el Desarrollo Integral Regional, Unidad Oaxaca, manifiesta que es autor (a) intelectual del presente trabajo de Tesis bajo la dirección de las Dr. Sadoth Sandoval Torres y cede los derechos del trabajo titulado: "Trasporte de masa y calor durante el secado convectivo de tubérculos (*Solanum tuberosum*) considerando su deformación", al Instituto Politécnico Nacional para su difusión, con fines académicos y de investigación.

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



Adriana Soledad Tovilla Morales



RESUMEN

La deformación de materiales agroalimentarios, es un fenómeno común desarrollado durante un proceso de secado que afecta directamente la calidad del producto. En el presente trabajo se desarrolló un modelo matemático adimensional, que se obtuvo mediante la inclusión de la reducción en la interfase del alimento en una geometría 1D. Las ecuaciones de conservación de masa y calor fueron acopladas al teorema de transporte de Reynolds en la interfase del alimento para tomar en consideración la reducción del sólido. El sistema de ecuaciones diferenciales no lineales, en estado no estacionario fue resuelto numéricamente. Para validar este modelo, se realizaron experimentos de secado a tres temperaturas: 40, 50 y 60°C, con una humedad relativa constante del 25% y una velocidad del aire de 1.5 m/s. Se obtuvieron cinéticas de secado y la evolución de temperatura del producto. El modelo fue capaz de predecir: la pérdida del contenido de humedad, evolución de la temperatura de la superficie, la rapidez de secado por unidad de área variable, distribución espacial del contenido de humedad respecto al cambio de espesor así como la distribución de temperatura en el domino respecto al cambio de espesor.

Para la temperatura de 40°C el modelo fue capaz de predecir correctamente la cinética de secado durante las primeras 6 horas, a partir de ese tiempo se observó una separación de la predicción numérica con un RMSD= 0.22 kg agua/kg sólido seco, y con respecto a la evolución de la temperatura el modelo describió el proceso de calentamiento del material con un RMSD= 0.76°C, en el cual las desviaciones pueden ser explicadas por las variaciones en las propiedades físicas del material (ecuaciones constitutivas), principalmente por la conductividad. A la temperatura de 50°C, se observó una mejor predicción en comparación con la de 40°C en la evolución del contenido de humedad (RMSD=0.18), así como una mejor descripción de la forma de la curva de temperatura experimental, en donde se deduce que el teorema de transporte de Reynolds traduce mejor la migración de humedad a temperaturas mayores a 50°C, lo cual se corroboró a la temperatura de 60°C donde se observó una predicción de la cinética más cercana a la experimental con un RMSD= 0.11 kg agua/kg sólido, lo cual se explica que en esta condición de secado ($T > 52^\circ\text{C}$) el transporte de humedad sigue un flujo extracelular, con una resistencia mucho menor al transporte de agua.

Concluimos que cuando los fluxes de materia son mayores, el teorema de transporte de Reynolds describe mejor la física de evacuación de humedad del material. En este caso, la temperatura se incrementó, y la viscosidad de la fase líquida ha disminuido, por lo cual podemos esperar una difusividad de materia mayor, aunado a una tasa de evaporación más grande reflejado en la rapidez de secado. Asimismo, la aplicación de una temperatura alta ($T=60^{\circ}\text{C}$), permite disminuir la resistencia al transporte de humedad debido al daño/rompimiento de las membranas celulares, que conduce a valores de difusividad de humedad más grandes que deberán considerarse en una futura mejora del modelo.

Por otro lado, se observó que a medida que el material perdía humedad, la matriz sólida se reducía en tamaño por lo que el patrón de encogimiento revela que la contracción y comportamiento sugieren una dependencia fuerte del contenido de humedad. Sin embargo, esta dependencia en la simulación se muestra menos intensa a contenidos de humedad menores a 2 kg agua/ kg sólido seco. Esto significaría que en el dominio higroscópico, el encogimiento ya no fue tan severo.

Palabras clave: Teorema de transporte de Reynolds, secado convectivo, papa, encogimiento.

ABSTRACT

The deformation of biological materials (agri-food), is a common phenomenon developed during a drying process that directly affects product quality. In this paper a dimensionless mathematical model, was developed by including reduction at the interface of a high moisture content food in a 1D geometry. The mass and heat conservation equations were coupled to Reynolds transport theorem at the interface of food to take into account the reduction of solid. The system of nonlinear unsteady state equations was solved by numerical methods. In order to validate this model, drying experiments were performed at three temperatures: 40, 50 and 60°C, with a constant relative humidity of 25% and air velocity of 1.5 m/s. Drying kinetics and evolution of temperature of the product were obtained. The model was able to predict the moisture loss content, surface temperature profiles, the drying rate per unit area variable, spatial distribution of moisture content respect to thickness change as well as temperature distribution in the domain respect to thickness change.

For temperature at 40°C the model was able to predict correctly the drying kinetics during the first 6 hours thereafter, a separation of numerical prediction was observed with a RMSD= 0.22 kg water/ kg dry solid and regarding the evolution of temperature, the model described the process of material heating with a RMSD=0.76°C, in which deviations can be explained by variations in the physical properties of the material (constitutive equations), mainly due to conductivity. At temperature of 50°C, a better prediction is observed compared with 40°C respect to moisture loss content profiles (RMSD=0.18) as well as a better description of the experimental temperature curve shape, where it is deduced that the Reynolds Transport Theorem describes better moisture migration at temperatures above 50°C, which was confirmed at temperature of 60°C where it was observed that a closer prediction to experimental kinetics was obtained with a RMSD= 0.11 kg water/kg dry solid, this may explain that during drying at high-temperatures ($T > 52^{\circ}\text{C}$), cell membranes in potatoes are damaged, and the moisture transport pathway is extracellular, with a much lower resistance to water transport.

We conclude that when the fluxes of matter are higher, the Reynolds Transport Theorem describes better the physics of material moisture migration. In this case, the temperature was increased, and the viscosity of the liquid phase has decreased, so we can expect a higher moisture diffusivity value, coupled with a larger evaporation rate reflected in the moisture drying rate. Also, the application of a high temperature ($T=60^{\circ}\text{C}$), allows to decrease the resistance to moisture transport due to damage/disruption of cell membranes, leading to a higher moisture diffusivity values, what should be considered for future model improvement.

Furthermore, it is observed that the material was losing moisture, the solid matrix is reduced in size, so that the shrinkage pattern reveals that shrinkage behavior suggest a strong dependence of moisture content. However, this dependence in the simulation was shown less intense at less moisture content than 2 kg water/kg dry solid. This would mean that the hygroscopic domain, the shrinkage was not so intense.

Keywords: Reynolds Transport Theorem, convective drying, potato, shrinkage

Dedicatorias:

A mis padres:

Gracias mamá y papá por su apoyo incondicional para que yo pudiera seguir estudiando, por su cariño, paciencia y comprensión.

Gracias...

Y a mis pequeños hijos, que son mi mayor motivación para seguirme preparando profesionalmente.

AGRADECIMIENTOS:

AL DR. SADO TH SANDOVAL TORRES:

Por haber sido una excelente guía como asesor y por su paciencia. Por haberme compartido su experiencia, su talento y sus conocimientos. Y también gracias Dr. Sadoth por su amistad y por su motivación.

AL DR. EMILIO HERNÁNDEZ BAUTISTA:

Por compartirme su tiempo, su talento y su conocimiento. Por haber sido un excelente compañero y amigo.

AL IPN-CIIDIR UNIDAD OAXACA:

Por las facilidades otorgadas en la realización de este trabajo, por proporcionarnos sus instalaciones, recursos, excelentes docentes y por ser más que un centro de investigación.

AL CONSEJO NACIONAL DE CIENCIA Y TENOLOGÍA:

Por su apoyo con la beca CONACYT y por tener posgrados de calidad y excelencia.

AL INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL

Por haberme otorgado la beca BEIFI (Beca de Estímulo Institucional de Formación de Investigadores) y por la Beca Tesis.

A LOS MIEMBROS DEL COMITÉ:

Gracias por sus excelentes y constructivas observaciones para la realización de este trabajo y por su guía.

A MIS AMIGOS Y COMPAÑEROS DE GENERACIÓN:

Los voy a extrañar, pero sé que nuestra amistad es perdurable.... Alejandra, David, Ana, Manuel y Fabián.

ÍNDICE GENERAL

Contenido

RESUMEN	I
ABSTRACT	V
INDICE DE FIGURAS	XII
INDICE DE TABLAS	XIV
NOMENCLATURA.....	XV
CAPÍTULO I INTRODUCCIÓN.....	1
1.1 Introducción.....	1
1.2 Planteamiento del problema	3
1.3 Justificación	4
1.4 Antecedentes.....	6
1.5 Objetivos.....	12
1.5.1 Objetivo General.....	12
1.5.2 Objetivos Específicos	12
1.6 Hipótesis	12
CAPÍTULO II MARCO TEÓRICO.....	13
2.1 Fisiología y botánica de la papa	13
2.1.1 Arquitectura molecular de la pared celular de papa	15
2.1.2 Composición físico-química de la papa	16
2.2 Distribución de agua en los alimentos.....	19
2.2.1 Actividad de agua	21
2.3 Mecanismos del secado	23
2.3.1 Etapas durante el proceso de Secado.....	25

2.5 Mecanismos de transporte	31
2.5.1 Transferencia de energía.....	32
2.5.1.1 Ley de Fourier para la conducción de calor	32
2.5.1.2 Ley de enfriamiento de Newton de la convección	33
2.5.2 Transporte de masa por difusión	34
2.5.3 Transporte de masa por convección	36
2.5 Microestructura del secado en materiales porosos	37
2.6 Cambios microestructurales producidos por el secado.....	42
2.6.1 Deformación y encogimiento	42
2.6.2 Disminución de la capacidad de rehidratación	44
2.6.3 Endurecimiento del tejido y su influencia en el encogimiento a nivel celular	45
2.7 Propiedades termofísicas en frutas y vegetales	46
2.7.1 Calor específico	47
2.7.2 Conductividad térmica.....	48
2.7.3 Difusividad térmica	48
2.8 Modelado matemático fenomenológico	50
2.8.1 Elementos básicos que integran un modelo.....	50
2.9 La adimensionalización como técnica de solución.....	52
2.10 Teorema fundamental del modelo	53
CAPÍTULO III MATERIALES Y MÉTODOS.....	55
3.1 Material.....	55
3.1.1 Preparación de las muestras.....	55
3.1.2 Escaldado por inmersión en agua	55
3.1.3 Obtención inicial del peso y contenido de humedad	56
3.2 Diseño experimental	56

3.3 Descripción del equipo	57
3.3.1 Secador Convectivo tipo Túnel	57
3.3.2 Humidificador de la cámara del secador	58
3.3.3 Celda de carga del Túnel y colocación de las muestras	59
3.3.4 Distribución espacial de la temperatura.....	60
3.3.5 Humedad relativa del aire.....	60
CAPÍTULO IV DESARROLLO DEL MODELO.....	61
4.1 Formulación matemática	61
4.2 Ecuaciones de Conservación	62
4.2.1 Ecuación de conservación de masa	62
4.2.2 Ecuación de conservación de energía.....	63
4.3 Condiciones iniciales.....	64
4.4 Condiciones frontera.....	64
4.5 Cambio de Volumen en el proceso.....	65
4.6 Ecuaciones Constitutivas.....	67
4.7 Adimensionalización de las ecuaciones de balance y condiciones frontera.....	70
CAPÍTULO V RESULTADOS Y DISCUSIONES.....	77
5.1 Magnitud del error en la predicción	78
5.2 Contenido de humedad y evolución de la temperatura.....	79
5.3 Rapidez de secado	88
5.4 Distribución espacial del contenido de humedad respecto al cambio de espesor	90
5.5 Evolución de la temperatura y cambio de espesor en el material.....	92
CONCLUSIONES.....	93
REFERENCIAS	94

INDICE DE FIGURAS

Figura 1. Anatomía del tubérculo de papa.....	14
Figura 2. Modelo simplificado de la arquitectura molecular de la pared celular de papa....	15
Figura 3. Composición química del tubérculo de papa	16
Figura 4. Cambios que ocurren en los alimentos en función de la A_w	20
Figura 5. Movimiento de la humedad durante el secado.....	24
Figura 6. Curva típica de los periodos de rapidez en el secado.....	26
Figura 7. Periodo de rapidez constante.....	27
Figura 8. Rango de valores típicos para la difusividad.....	35
Figura 9. Esquema del fenómeno de convección-difusión sobre una superficie	36
Figura 10. Diferentes fases en un medio poroso y modos de transporte	37
Figura 11. Conjunto de capilares durante el secado	39
Figura 12. Esquema común de secado al aire de un sólido húmedo	41
Figura 13. Cambios microestructurales durante el secado de tejidos vegetales.....	43
Figura 14. Propiedades termofísicas asociadas al procesamiento de frutas y vegetales	46
Figura 15. Conductividad y difusividad térmica de algunos biomateriales	49
Figura 16. Elementos que integran un modelo del medio continuo	51
Figura 17. Túnel de secado por convección forzada	58
Figura 18. Cámara de secado, donde fueron colocadas las muestras	59
Figura 19. Termopares insertados en 3 puntos de la muestra.....	60
Figura 20. Muestra de espesor $2L$, geometría $1D$ y fronteras adimensionales.....	61
Figura 21. Descripción matemática del acoplamiento entre las ecuaciones del sistema.....	77
<i>Figura 22. Cinéticas de contenido de humedad vs evolución de la temperatura</i>	<i>80</i>
Figura 23. Cinéticas de contenido de humedad vs evolución de la temperatura.....	82
Figura 24. Cinéticas de contenido de humedad vs evolución de la temperatura.....	84
Figura 25. a) Cambios en el espesor del material y encogimiento a 60°C	85
Figura 26. Perfiles de contenido de humedad en papa simuladas por el modelo	86
Figura 27. Perfiles de contenido de humedad adimensional en papa simuladas	87
Figura 28. Curvas de rapidez de secado simuladas por el modelo	88

Figura 29. Rapidez de secado por unidad de área como función del contenido de humedad	90
Figura 30. Distribución del contenido de humedad simulado	91
Figura 31. Distribución de la temperatura simulada como función de la posición y tiempo a 60°C	92

INDICE DE TABLAS

Tabla 1. Micronutrientes de una papa cruda.....	18
Tabla 2. Factores y niveles de estudio.....	57
Tabla 3. Tratamientos y factor temperatura.....	57
Tabla 4. Condiciones frontera de masa y energía en $x=0$	64
Tabla 5. Condiciones frontera de masa y energía en $x=L$	65
Tabla 6. Ecuaciones constitutivas o parámetros de entrada.....	67
Tabla 7. Magnitudes características utilizadas para definir las variables adimensionales ...	70
Tabla 8. Sistema de ecuaciones de conservación y encogimiento adimensionales.....	76
Tabla 9. Ecuaciones frontera adimensionales.....	76

NOMENCLATURA

Símbolo	Nombre	Unidades
C_a	Concentración de vapor de agua en el aire	kg/m^3
C_s	Concentración de vapor de agua en la superficie de la muestra	kg/m^3
C_{p_s}	Capacidad calorífica del material	J/kg K
D	Coefficiente de difusión efectivo del material	m^2/s
D_{AB}	Coefficiente de difusión del vapor de agua en el aire	m^2/s
h_c	Coefficiente de transferencia de calor	$\text{W/m}^2.\text{K}$
h_m	Coefficiente de transferencia de masa	m/s
HR	Humedad relativa	%
k	Conductividad térmica del material	W/m K
k_a	Conductividad térmica del aire a una temperatura específica	W/m K
L	Espesor de la muestra	m
L_0	Longitud inicial de la muestra	m
L_c	Longitud característica de la muestra	m
M	Contenido de humedad	$\text{Kg agua/kg sólido seco}$
M_e	Contenido de humedad de equilibrio	$\text{kg agua/kg sólido seco}$
M_0	Contenido de humedad inicial de la muestra	$\text{kg agua/kg sólido seco}$
RMSD	Raíz del error cuadrático medio	
T	Temperatura	K
T_0	Temperatura inicial	K
T_a	Temperatura del aire	K
V_a	Velocidad del aire de secado	m/s
x	Espesor de la muestra en un tiempo (t)	m

Letras Griegas

α	Difusividad térmica del material	m^2/s
ρ_a	Densidad del aire a una temperatura específica	kg/m^3
ρ_s	Densidad del material	kg/m^3
ρ_w	Densidad del agua	kg/m^3
μ	Viscosidad dinámica	$\text{Pa}\cdot\text{s}$
ν	Viscosidad cinemática	$\text{m}^2\cdot\text{s}^{-1}$
λ	Calor latente de vaporización del agua	kJ/kg
τ	Tiempo adimensional o número de Fourier de masa	Adimensional

Números adimensionales

Bi	Número de Biot para la transferencia de calor	$\frac{h_c L_c}{k}$
Bi_m	Número de Biot para la transferencia de masa	$\frac{h_m L_c}{D}$
Le	Número de Lewis	$\frac{\alpha}{D}$
Nu	Número de Nusselt	$\frac{h_c L_c}{k_a}$
Pr	Número de Prandtl	$\frac{C_p \mu}{k_a}$
Re	Número de Reynolds	$\frac{\rho_a V_a L_c}{\mu}$

Fo	Número de Fourier	$\frac{\alpha t}{L^2}$
Sc	Número de Schmidt	$\frac{v}{D_{AB}}$
Sh	Número de Sherwood	$\frac{h_m L_c}{D_{AB}}$

CAPÍTULO I INTRODUCCIÓN

1.1 Introducción

El cultivo de papa (*Solanum tuberosum*) ocupa un lugar importante en la agricultura, la economía y la seguridad alimentaria mundial. De acuerdo a la cantidad que se cosecha, representa el cuarto alimento básico del mundo, después del maíz, el trigo y el arroz (FAO, 2009). En México se considera un alimento básico y necesario en la dieta del mexicano, debido a su valor energético y nutritivo. Tiene gran importancia económica y social para numerosas familias del campo, para quienes constituye una fuente de trabajo y gracias a nuestra variedad de condiciones climáticas, disponemos todo el año de este tubérculo, tanto para el consumo humano como para la siembra; además, tiene una gran demanda en muchos países, por su sabor, fácil digestión, su contenido proteico y de carbohidratos (SAGARPA, 2011)

La industria de los alimentos es una de las ramas más importantes de la economía a nivel mundial y en la unión europea, principalmente juega un papel central para la transformación de materias primas y el suministro de alimentos. Las innovaciones introducidas en esta industria en años recientes, se refieren a nuevos enfoques científicos y técnicos en la elaboración, procesamiento e introducción de nuevos alimentos, y en este sentido, se pretende mejorar la calidad de éstos, la cual es una de las áreas de investigación para la innovación de alimentos funcionales (Bigliardi and Galati, 2013). Por otro lado, se busca entender las necesidades y expectativas del consumidor, de forma que se promueva la compra repetitiva por lo cual el producto tiene que estar alineado al mercado objetivo y cumplir requerimientos adicionales que cada segmento puede exigir tales como: la sustentabilidad, larga vida de anaquel, precio, disponibilidad y calidad (Malaga and Williams, 2006).

Las frutas y vegetales son alimentos porosos y con un alto contenido de humedad y, por consiguiente extremadamente perecederos. La reducción de agua en éstos utilizando el secado convectivo es ampliamente usado como una técnica de preservación, pues muchas enzimas y microorganismos que causan cambios químicos en ellos, no pueden crecer y desarrollarse en ausencia de agua (Guine, 2006). El secado por aire caliente es considerado

un proceso simultáneo de transferencia de masa y calor, donde el agua se transfiere por difusión de acuerdo con los gradientes de humedad y temperatura respectivamente desde el interior del material a la interfase alimento-aire, y desde ésta a la corriente de aire por convección (Yang et al., 2001). Sin embargo, durante este proceso se presentan cambios prominentes tales como el encogimiento, el cual puede entenderse como una deformación estructural significativa en la forma y tamaño de la muestra que ocurre a lo largo de esta transferencia simultánea (Mayor and Sereno, 2004), por otro lado cuando la humedad es removida de la superficie del tejido, las paredes de los poros llenos de agua experimentan una presión que arrastra toda la matriz hacia el centro. Este estrés de contracción resulta en cambios estructurales (Srikiatden and Roberts, 2008), y en condiciones drásticas se pueden desarrollar agrietamientos sobre su superficie lo cual se debe a perturbaciones mecánicas y tensiones de desequilibrio dentro de la estructura. Esto es de gran importancia, ya que modifica la rapidez en la transferencia de masa y calor, el cual cambia con la reducción de la superficie lo cual se determina por el patrón de contracción, lo que produce una variación en la distancia requerida para el movimiento de las moléculas de agua (Hernandez et al., 2000, May and Perré, 2002). Las simulaciones usando modelos teóricos o empíricos frecuentemente se utilizan para investigar este proceso, optimizar sus parámetros y las condiciones de operación. La validez de estas simulaciones depende entre otros factores, de los valores de los parámetros físicos que se involucran en el diseño de estos (Khalloufi et al., 2009) por esta razón se requiere una descripción matemática de la evolución del contenido de humedad, y en este aspecto los modelos matemáticos y la simulación numérica son recursos esenciales para la comprensión e innovación de dicho proceso, ya que el modelo matemático describe el comportamiento del proceso o sistema y puede utilizarse para determinar los perfiles de ciertas variables que son difíciles de medir por técnicas experimentales directas o indirectas (Wang et al., 2007).

Por tanto, el objetivo del presente trabajo es desarrollar un modelo fenomenológico basado en la mecánica de medio continuo, considerando la deformación como producto de una pérdida de contenido de humedad volumétrica. Para ello se utilizó el teorema de transporte de Reynolds, acoplado a la transferencia de masa y calor, para posteriormente ser validado con los datos experimentales.

1.2 Planteamiento del problema

Durante el proceso de secado se desarrollan diferentes cambios físicos y químicos; siendo uno de los principales el encogimiento y/o deformación del producto alimenticio, el cual origina los siguientes problemas:

- A. Modificación de la porosidad y microestructura. La pérdida de agua y el calentamiento causan un estrés en la estructura celular del alimento, provocando cambios en su microestructura (Koc et al., 2008), a medida que avanza el proceso los espacios intercelulares (poros) ocupados anteriormente por el agua son reemplazados por aire o se comprimen como resultado del encogimiento (Aprajeeta et al., 2015) y esto produce una reducción drástica de forma y tamaño, la cual se considera como un factor de pérdida de calidad en algunos alimentos deshidratados (Mayor and Sereno, 2004).
- B. Modificación de la rapidez de transferencia de masa y calor, la cual cambia con la reducción de la superficie de acuerdo al patrón de contracción (May and Perré, 2002, Sandoval Torres and Allier González, 2015). Por lo cual se forma una película o costra en la superficie del material que limita y reduce la rapidez de la evaporación de humedad en el alimento (Koc et al., 2008). Lo anterior conduce a un alargamiento del proceso y por consecuencia a un mayor consumo energético.
- C. Rehidratación. Los mecanismos anteriores, determinan la calidad y propiedades sensoriales en un producto tales como la consistencia y su textura, y principalmente la porosidad, la cual es importante en la reconstitución de un producto seco, ya que controla la rapidez de rehidratación determinando la digestibilidad del producto lo que determina su aceptación en el mercado (Rahman, 2001).

Es necesaria la comprensión de estos mecanismos para la optimización del proceso, teniendo en cuenta la calidad del producto de salida y el costo del procesamiento, lo cual es un requisito para el desarrollo y la perpetuidad de las tecnologías de secado (Khalloufi et al., 2009); lo que ha impulsado a la industria a buscar nuevas alternativas que ofrezcan mejoras en la calidad del producto final y la disminución del consumo energético.

Derivado de lo anterior, es necesario proponer un modelo 1D que considere una relación entre la pérdida de humedad y el encogimiento basado en leyes y mecanismos de transporte, para predecir con mayor exactitud las cinéticas de secado y el cambio de dimensión de un material con alto contenido de humedad.

1.3 Justificación

Debido a la complejidad del proceso de secado, en las últimas décadas se han modelado diversas cinéticas de secado; las simulaciones teóricas o empíricas se han utilizado para investigar dicho proceso y la optimización de sus parámetros así como sus condiciones de operación (Hernandez et al., 2000).

Respecto a esto, se busca mejorar la comprensión del proceso de alimentos deformables para disminuir el cambio de forma y volumen durante la pérdida de humedad, y obtener productos de mejor calidad. Diversos investigadores coinciden en afirmar que el éxito entre los alimentos funcionales y/o procesados se debe principalmente a su imagen positiva general entre los consumidores y a sus características intrínsecas (Bigliardi and Galati, 2013).

En los conceptos fundamentales aplicados a la ingeniería del procesamiento de alimentos se requieren de un profundo entendimiento de los fenómenos de transporte y del modelado matemático, como herramientas de suma importancia para mejorar la comprensión de la transferencia de masa y sus efectos en el cambio de la composición, estructura y mecánica del sólido (Bimbenet et al., 2007). El análisis de la transferencia de masa y calor es un problema de gran importancia en una amplia gama de aplicaciones industriales; en el caso del procesamiento de alimentos nos permite predecir escenarios y mejorar el entendimiento de su transformación.

En el presente trabajo se propone un modelo fenomenológico adimensional, que acopla la transferencia de masa y calor a una escritura del encogimiento del material. El análisis de distribución espacial de la temperatura y humedad serán variables importantes para nuestras discusiones.

El presente trabajo, adquiere importancia por los siguientes aspectos:

1. Científico. Mediante el modelamiento y el estudio de los mecanismos de transferencia de masa y calor, es posible comprender mejor la migración del líquido y gas durante el secado de materiales biológicos deformables y con ello, tener mayor información para mejorar la calidad del producto lo cual implica un factor central para la competitividad así como la innovación basada en nuevos conocimientos y tecnologías. Por lo cual un deterioro importante del material podría ser controlados si la distribución de la humedad y temperatura como una función del tiempo de secado pudieran ser predichos con precisión (Wang and Brennan, 1995).
2. Tecnológico. Nuestro estudio provee información importante, que puede ser integrada al diseño de futuros secadores que provean condiciones adecuadas para disminuir el encogimiento de agroalimentos.

1.4 Antecedentes

Los modelos matemáticos son herramientas muy útiles en el diseño y el análisis simultáneo de los procesos de secado. Según Kowalski y Mierzwa, (2013); los modelos se pueden clasificar en tres categorías: los modelos empíricos, semi-empíricos y teóricos.

- A. Los modelos empíricos que se construyen mediante el ajuste de los parámetros del modelo a los datos experimentales. Estos modelos son utilizados por muchos autores que en su mayoría expresan funciones ajustadas a determinada curva de secado experimental que muestran una reducción del contenido de humedad en el tiempo. Estos presentan a menudo una combinación de funciones exponenciales obtenidas mediante la interpolación de los datos experimentales, donde los coeficientes de interpolación se determinan mediante el método de los mínimos cuadrados y estos coeficientes no tienen una interpretación física.
- B. Modelos semi-empíricos. Son modelos para sistemas cuyos parámetros han sido desarrollados a partir de datos experimentales específicos, es decir para un conjunto de condiciones o un producto en particular. Mayor y Sereno (2004) muestran y discuten un listado de modelos de estos dos tipos, tomando en cuenta la contracción en el alimento mediante una correlación de los cambios de densidad y porosidad en el material.
- C. Modelos teóricos. Se construyen sobre la base de la comprensión fundamental de los fenómenos y mecanismos que pueden estar implicados. Se crean sobre las leyes físicas fundamentales y tienen aplicación en diferentes procesos de secado con cierta independencia de las condiciones del proceso y del material. La base para la construcción de estos modelos constituyen las leyes de la conservación de la masa, cantidad de movimiento y energía, y las leyes de la termodinámica sí como otras leyes físicas, como la de enfriamiento de Newton para el caso de alguna condición límite. Además de las leyes universales mencionadas anteriormente, se emplean ciertas relaciones auxiliares para describir los materiales a través de la especificación de coeficientes del material o haciendo referencia a determinados métodos de secado. En física de lo continuo, se le conocen como ecuaciones constitutivas. Katekawa y Silva (Katekawa and Silva, 2006), resumen algunos modelos mecanísticos de este

tipo. Estos autores citan trabajos que consideran la contracción de los materiales. Estos modelos requieren de la escritura de ecuaciones diferenciales parciales, de las ecuaciones constitutivas, de sus condiciones límite e iniciales, para ser resueltas por diferentes métodos numéricos.

Desde esta perspectiva, se debe tomar en cuenta que los parámetros de ajuste de los modelos teóricos tienen un significado físico, mientras que los que participan en los modelos empíricos no ofrecen ninguno. Durante algún tiempo la contracción y/o encogimiento se consideró insignificante en los modelos de secado. Lo anterior se hacía con la finalidad de simplificar los modelos. Sin embargo, para simular un proceso de secado cercano a la realidad, es necesario considerar su cambio de dimensión.

A nivel microescala (escala molecular; en la cual moléculas de agua interactúan entre sí y con las demás especies en el líquido o gas, y con las superficies sólidas) Fanta y colaboradores (Fanta et al., 2014), modelan el transporte de agua acoplado a la deformación mecánica del tejido de fruta durante el deshidratado, en los espacios intercelulares en tejidos de pera con una geometría 2D, utilizan el potencial químico como fuerza impulsora para el intercambio de agua entre los diferentes compartimientos microestructurales, cuya deformación atribuye a la pérdida de turgencia que causa relajación en las paredes celulares.

A nivel mesoescala o poro (la entidad más pequeña para expresar los fenómenos de transporte dentro de las partículas de secado u organismos individuales), encontramos el trabajo de Perré y May (Perré and May, 2001), hecho en muestras de papa, basándose en el acoplamiento de los fenómenos de transferencia y la mecánica estructural del sólido, en el cual consideran un tensor de deformación total del campo de desplazamiento dentro del dominio. Los resultados encontrados sugieren que la reducción de la superficie de evaporación, provoca una disminución de la rapidez de secado. Sugieren que el nombre correcto para el primer periodo de secado en el caso de agromateriales debería ser “periodo de flux constante” en lugar de periodo de rapidez de secado constante.

Los modelos de red de poros se han hecho populares en los últimos años, como los conceptos de multiescala y multifísica; los modelos multiescala son básicamente jerárquicos de submodelos que describen el comportamiento del material en diferentes escalas, de tal manera que los submodelos están interconectados (Ho et al., 2013), por ejemplo como el propuesto por van der Sman y colaboradores (van der Sman et al., 2013) quienes realizan un

modelo general para simular la rehidratación de alimentos porosos a nivel mesoescala y multifísico. Los autores proponen que se puede establecer que la humedad puede representarse en tres diferentes fases y que durante la rehidratación un número significativo de fenómenos físicos de transporte suceden simultáneamente. En este tipo de modelos varias escalas pueden considerarse de forma simultánea, que pueden ser simples intercambios entre fases macroscópicas a una formulación integral, en el que la evolución temporal de los parámetros y gradientes microscópicos se consideran sobre el volumen del elemento representativo (Perré, 2011).

Respecto a los modelos de la mecánica de medio continuo; la mayoría de investigadores han utilizado correlaciones entre los cambios de densidad, porosidad, relaciones volumétricas en función del contenido de humedad y la mecánica estructural para poder describir la deformación; como el propuesto por Ratti (Ratti, 1994), quien observó que la tasa de contracción volumétrica de los productos vegetales durante el secado no depende exclusivamente de su contenido de humedad, sino también de las condiciones ambientales durante el proceso, la geometría y la constitución de los productos. De los modelos que consideran los cambios en densidad y porosidad existe una amplia gama (Aprajeeta et al., 2015, Koc et al., 2008, Khalloufi et al., 2009, Rahman, 2003) los cuales predicen a la porosidad como una función lineal del contenido de humedad. El modelo de Aprajeeta y colaboradores (2015) es un modelo 2D para rodajas de papa, en la cual evalúan los cambios respecto a la dimensión radial; reportando una contracción radial uniforme hasta el 35% del radio original de forma lineal con respecto al contenido de humedad. Mencionan que el efecto de la porosidad y contracción sobre los perfiles de temperatura de las muestras fue casi despreciable, no así para la transferencia de masa en el cual los cambios en porosidad tienen un papel significativo. Por otro lado afirma que este modelo es capaz de predecir los perfiles de densidad de la muestra durante el proceso de secado; para lo cual observó que la densidad permanece casi constante al inicio pero se incrementa de forma lineal a lo largo del proceso. El modelo de Curcio y Aversa (2014), formulan un modelo teórico para una geometría cilíndrica en muestras de papa en dos dimensiones, que predice el comportamiento de un secador convectivo en un amplio rango de condiciones de proceso. El enfoque propuesto se basó en el acoplamiento de la transferencia de momentum, calor y masa tanto en la cámara de secado como en el alimento y de la mecánica estructural para estimar la deformación,

como consecuencia de la pérdida de humedad. La concordancia entre las predicciones del modelo y el conjunto de datos experimentales obtenidos durante el secado de cilindros de papa fue buena en cuanto al tiempo de evolución del contenido de humedad promedio y de sus principales dimensiones, es decir, Longitud y diámetro, en cuestión. Concluye que el modelo, sin embargo, podría mejorarse con una descripción más precisa de los fenómenos de transporte reales que ocurren dentro de la muestra de alimento al integrar por ejemplo, el efecto de los gradientes de presión de gas y la transferencia de calor por convección así como la relación entre la deformación y la variación en la concentración de agua.

Kowalski y Mierzwa (2013), desarrollaron un modelo general de la cinética de secado fundamentado en bases termodinámicas, considerando el encogimiento en el material, establecieron coeficientes para las curvas de secado y las temperaturas como una función del tiempo, concluyendo que las ecuaciones acopladas en la cinética permiten calcular el consumo de energía neta y que existió buena coherencia entre los resultados experimentales y numéricos, su modelo fue realizado en 1D, para rodajas de papa.

Por otro lado, en otros trabajos analizan la temperatura de transición vítrea para explicar el proceso del encogimiento, fisuras y agrietamiento que sufren los alimentos durante el secado (Rahman, 2001), que se caracteriza por una discontinuidad en las propiedades físicas, mecánicas, eléctricas y térmicas entre otras propiedades de un material; el proceso es considerado ser de segundo orden en la transición termodinámica en el cual el material experimenta un cambio de estado, pero no de fase (Rahman, 2006) que afecta a las reacciones químicas controladas por la difusión a través de la disminución de su coeficiente, este descenso se debe a los cambios en la viscosidad y la movilidad del agua; modificando la estructura, textura y porosidad de los alimentos. Sin embargo este tipo de análisis no es aplicable a todos los procesos ni a todos los tipos de materiales biológicos, lo cual indica la necesidad de incorporar otros conceptos (Sablani and Rahman, 2002). Las desviaciones en los modelos, están ligados a la formación de una capa dura (endurecimiento) de la superficie y al desarrollo de una presión interna, que alteran la permeabilidad y la integridad de la corteza, lo cual es importante para mantener una presión interna (Acahnta and Okos, 1996; Ratti, 1994) citados por Rahman (2006). La presión interna siempre trata de inflar el producto creando una fuerza hacia la corteza, por lo que el concepto de la transición vítrea no puede explicar el efecto del encostramiento.

Respecto a los modelos apoyados en el concepto de transición vítrea está el propuesto por Dhall y Datta (Dhall and Datta, 2011), en el cual realizan un modelo de transporte multifase poromecánico, tomando en cuenta las fuerzas que provocan la deformación como los cambios en el contenido de humedad y el desarrollo de la presión del gas; aplicado a dos diferentes procesos; el calentamiento por contacto en carne de hamburguesa y el secado convectivo en placas de papa. Respecto al modelo de papa, este fue en dos dimensiones y consideraron la fase líquida y gaseosa. Mencionan que el alimento experimenta una transición de estado (rubbery to rigid-glassy) en la cual mientras el alimento esté muy húmedo estará en la fase rubbery y el cambio del volumen será aproximadamente igual a la pérdida de humedad, pero cuando el alimento tenga en su interior un transporte en forma de vapor, el cambio de volumen será menor o igual a la pérdida de humedad y estará en transición entre las dos fases, pero cuando el transporte por vapor (fase gaseosa) domine dentro del alimento; el cambio de volumen debido a la pérdida de humedad será despreciable y entonces el alimento se encontrará en un estado Glassy (vidrioso) y muy seco. Asumiendo que una de las fuerzas impulsoras para la deformación es la presión del gas, el cual causa que el material se infle, formando un gradiente de presión que puede ser tomado como un término fuente para el balance de momentum del sólido y el cambio de humedad, el cual puede ser tomado de forma análoga a una expansión/contracción térmica para obtener el cambio de volumen. Los autores mencionan que el encogimiento se detuvo por debajo del contenido de humedad crítico y presentó un módulo de esfuerzo cortante mayor a bajos contenidos de humedad. En el 2012 Dhall y Datta realizan un modelo similar en papa con una geometría cilíndrica 2D axisimétrica, utilizando la mecánica estructural y asumiendo al material como hiperelástico, a tres temperaturas 40, 70 y 150°C. Las variables a resolver fueron temperatura, concentración, presión de gas, velocidad, esfuerzo y deformación, el modelo simula el contenido de humedad y los cambios en la altura y diámetro del alimento; encontrando que para las temperaturas de 40 y 70°C la contracción fue casi igual a la cantidad de pérdida de agua (rubbery state), para las muestras sometidas a 150°C se presentaron grandes desviaciones y el efecto de endurecimiento de la corteza. Concluyendo que su modelo logra predecir el endurecimiento y otros atributos de calidad partir de una correlación mínima de datos empíricos.

Diferentes investigaciones han utilizado correlaciones entre los cambios de densidad, porosidad y/o volumen, como el es caso de Afaghi y colaboradores (Afaghi et al., 2013), quienes estudiaron el caso de rodajas de zanahoria y utilizaron un pycnómetro líquido con n-heptano (técnica destructiva) encontrando buena predicción en la relación entre el volumen variable y el volumen inicial en las muestras tanto experimental como descritas por el modelo. May y Perré (2002) hicieron uso de un micrómetro láser introducido en la cámara de secado, para monitorear las longitudes y diámetros de cilindros de papa, zanahoria y aguacate. Otra técnica para la evaluación del encogimiento y deformación es el análisis fractal mediante la captura de imágenes utilizando áreas proyectadas, para el análisis de muestras de alimentos. A nivel celular Setiady y colaboradores (Setiady et al., 2009) utilizaron la microscopia electrónica de barrido para identificar diferencias entre muestras de papa rehidratadas sometidas a diferentes técnicas de secado. Sin embargo las necesidades futuras de modelado macroscópico y microestructural incluyen técnicas más sofisticadas, las cuales no sólo se limitan a frutas y verduras sino a otros materiales además de herramientas modernas derivadas de los campos de la física y las matemáticas aplicadas.

A nivel experimental, nuevas herramientas han surgido recientemente en el campo de la física, las cuales nos permiten tener varias posibilidades de imágenes con resoluciones temporales, entre tales técnicas la microtomografía de rayos X que utilizando una proyección de imágenes obtenidas en diferentes ángulos realiza una reconstrucción de la estructura que puede ser reconstruída en un objeto virtual 3D.

1.5 Objetivos

1.5.1 Objetivo General

Simular el transporte de masa y calor durante el secado por convección forzada de papa (*Solanum tuberosum*) considerando el efecto del encogimiento del material durante el proceso.

1.5.2 Objetivos Específicos

1. Desarrollar un modelo fenomenológico basado en la mecánica del medio continuo, considerando el encogimiento unidimensional como producto de una pérdida de contenido de humedad volumétrica.
2. Involucrar el teorema de transporte de Reynolds para acoplar el encogimiento a la transferencia de masa y calor.
3. Determinar las cinéticas de secado experimentales a tres diferentes temperaturas, con una humedad y velocidad del aire.
4. Obtener la solución numérica del modelo para comparar los datos experimentales contra los simulados para su validación.

1.6 Hipótesis

Incluir el teorema de transporte de Reynolds en las ecuaciones de conservación de masa para considerar el encogimiento unidimensional permitirá predecir mejor las cinéticas de secado y la evolución de temperatura durante el secado de rodajas de papa.

CAPÍTULO II MARCO TEÓRICO

2.1 Fisiología y botánica de la papa

La papa (*Solanum tuberosum*) es el tubérculo más producido y consumido en el mundo, originaria de Los Andes de América del sur, actualmente ocupa el cuarto lugar entre los cultivos de mayor producción a nivel mundial, cuya producción es de unos 325 millones de toneladas por año (Lutaladio and Castaldi, 2009). Esta cantidad tiende a aumentar mientras que la de los otros tres alimentos más consumidos, maíz, trigo y arroz, va decreciendo. Su cultivo se encuentra presente en más de cien países. Entre ellos, los de América del Norte y Europa que son los mayores productores, aunque en las últimas décadas hubo un crecimiento extraordinario de estas plantaciones en Asia, África y América Latina.

La papa es una herbácea anual que alcanza una altura de un metro y produce un tubérculo, pertenece a la familia de floríferas de las solanáceas, del género *Solanum* formado por otras mil especies por lo menos, como el tomate y la berenjena. El desarrollo de la planta puede dividirse en cuatro principales etapas:

1. Etapa vegetativa. Inicia con el rompimiento de la latencia de la semilla y termina con el inicio de la formación de tubérculos, lo que varía de 15 a 30 días, dependiendo de las condiciones climáticas y edáficas donde se establezca el cultivo.
2. Tuberización. Inicia cuando los estolones aparecen. La duración de esta etapa varía de 10 a 14 días. Un déficit de humedad en este periodo puede reducir el número de tubérculos producidos por cada planta.
3. Desarrollo de tubérculos. Se caracteriza especialmente por la acumulación de carbohidratos (en forma de almidón), con un incremento constante en el tamaño y peso de los tubérculos, bajo condiciones óptimas de humedad. Esta etapa puede durar de 60 a 90 días, lo que depende del clima y sanidad del cultivo, ya que la humedad tiene una relación directa con el tamaño y calidad de los tubérculos, principalmente a mediados de la tuberización que se presenta de tres a seis semanas después de su

inicio, porque el crecimiento de los tubérculos puede retardarse bajo condiciones de estrés hídrico.

4. Maduración. Empieza con la caída del follaje, donde las hojas viejas se tornan amarillas hasta llegar, gradualmente, a un color café, al madurar. Tienen lugar un crecimiento mínimo de los tubérculos y los requerimientos hídricos van disminuyendo por la reducida evapotranspiración de las hojas en el proceso de secado.

Al crecer, las hojas compuestas de la planta de la papa producen almidón, el cual se desplaza hacia la parte final de los tallos subterráneos, también llamados estolones. Estos tallos sufren la consecuencia de un engrosamiento y así se producen unos cuantos o hasta 20 tubérculos cerca de la superficie del suelo. El número de tubérculos que llegan a madurar depende de la disponibilidad de humedad y nutrientes del suelo. El tubérculo puede tener formas y tamaños distintos, y por lo general pesa hasta 300 g. Al terminar el periodo de crecimiento, las hojas y tallos de la planta se marchitan y los tubérculos se desprenden de los estolones. A partir de este momento, los tubérculos funcionan como depósito de nutrientes que permite a la planta subsistir en el frío y posteriormente reverdecer y reproducirse. Cada tubérculo tiene de dos hasta diez brotes laterales (los ojos), distribuidos en espiral en toda la superficie. De estos ojos brotan las nuevas plantas, cuando las condiciones vuelven a ser favorables.

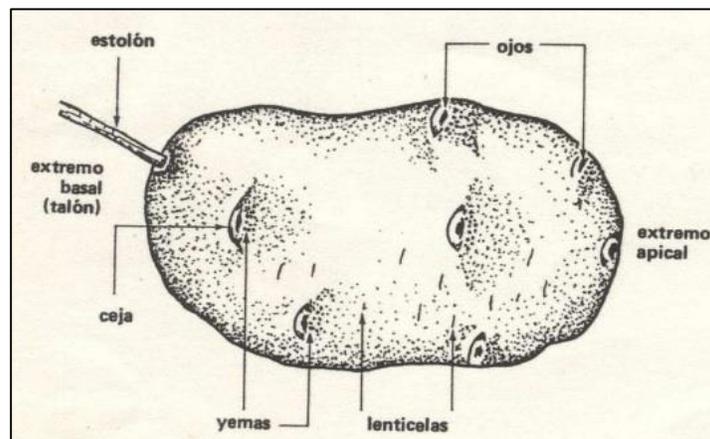


Figura 1. Anatomía del tubérculo de papa (FAO, 2009)

Un tubérculo de papa cruda tiene un gran contenido de micronutrientes, las vitaminas y minerales esenciales para la salud. Una papa de tamaño medio contiene una gran cantidad de potasio y, casi la mitad de la vitamina C necesaria a diario para los adultos. También es una fuente importante de vitaminas del complejo B y minerales, como el fósforo y el magnesio.

2.1.1 Arquitectura molecular de la pared celular de papa

Este modelo muestra dos redes, una de polisacáridos pécticos y otra red de celulosa-xiloglucanos las cuales son coextensivas, pero independientes y una tercera red compuesta de glicoproteínas la cual la mayoría de las veces está presente (McCann et al., 2001) (figura 2). La red de polisacáridos pécticos se cree que determina la porosidad de la pared y la red de celulosa- xiloglucano se piensa que es la estructura principal de soporte y la lámina media se encuentra entre las paredes celulares primarias de células adyacentes y es responsable de la adhesión célula-célula,

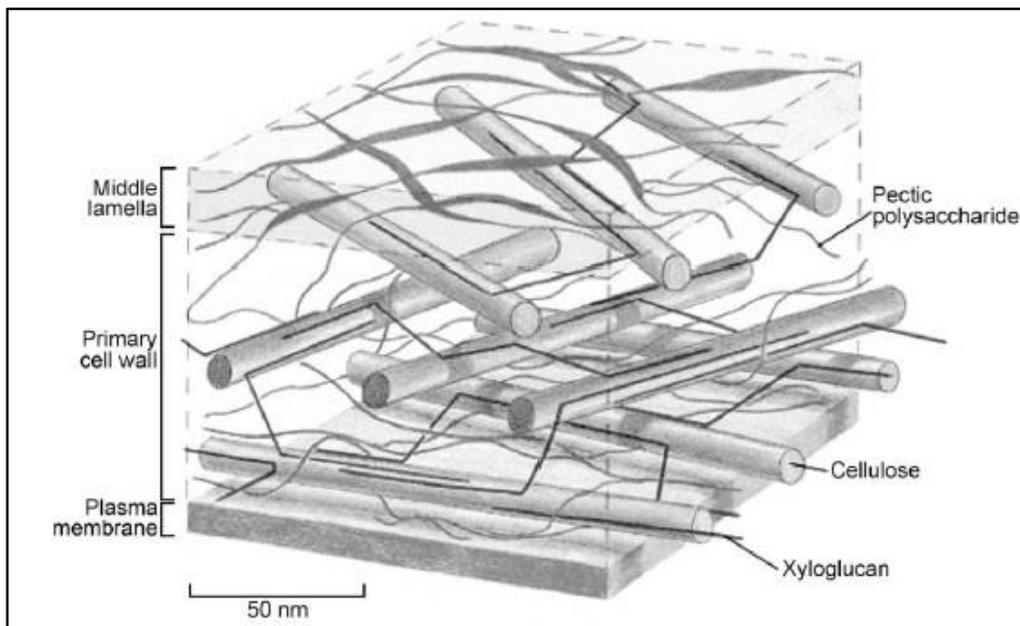


Figura 2. Modelo simplificado de la arquitectura molecular de la pared celular de papa (McCann and Roberts, 1991)

Este tipo de modelo se refiere a menudo como “acoplado” lo cual se evidencia de la observación de enlaces cruzados entre las microfibrillas de celulosa por microscopía electrónica de transmisión.

2.1.2 Composición físico-química de la papa

En la papa se encuentran componentes nutritivos (macro y micronutrientes) y componentes no nutritivos (agua, celulosa, hemicelulosa, pectina, glucoalcaloides, ácidos orgánicos y enzimas entre otros minoritarios). Luego de su cosecha los tubérculos contienen en promedio 80% de agua y 20% de materia seca (60% de esta corresponde a almidón). La composición se puede modificar por factores tales como la variedad, la localidad donde se produce, el tipo de suelo, el clima y las condiciones de cultivo. El aporte nutricional de los tubérculos está dado por el contenido de macro y micronutrientes y por la biodisponibilidad de los mismos, en promedio 100 gramos de papa, la porción que consume un individuo adulto, contiene; según lo reportado por la FAO (2009), la composición química del tubérculo corresponde a los siguientes porcentajes:

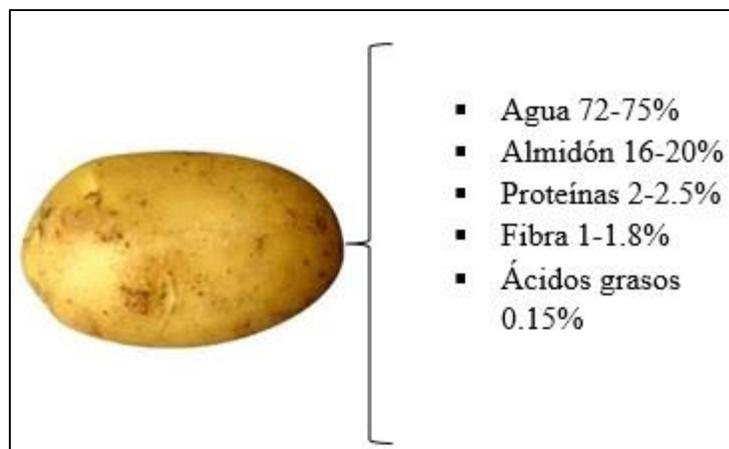


Figura 3. Composición química del tubérculo de papa (FAO, 2009)

Energía. Tradicionalmente se ha reconocido que los tubérculos cumplen un rol energético en la alimentación por cuanto su componente mayoritario en materia seca corresponde al almidón. A pesar de ello, comparado con alimentos equivalentes tales como el plátano y la yuca, su aporte calórico es menor y se le considera de baja densidad calórica.

Carbohidratos. La papa es un alimento que contiene cantidades importantes de éstos; los cuales se encuentran mayoritariamente como almidón y un pequeño porcentaje como azúcares (sacarosa, fructuosa, glucosa).

Proteína. La proteína de este alimento sobresale por un alto contenido de lisina y bajos contenidos de aminoácidos azufrados. El contenido de proteína de la papa, aunque inferior al aportado por alimentos de origen animal, es superior al aportado por la mayoría de los cereales, tubérculos y raíces. La calidad de la proteína es inferior por la presencia de glucoalcaloides y de inhibidores de las proteinasas.

Vitaminas. Los tubérculos aunque contienen vitaminas, no son considerados alimentos fuente de estos nutrientes. Las vitaminas que se encuentran en el tubérculo son el ácido ascórbico, B1, B6 y niacina. Se concentran principalmente en la piel y en la cáscara. La vitamina C sobresale por su alta reactividad y por las altas pérdidas por oxidación. Tras la cocción o el procesamiento a nivel industrial las pérdidas son significativas.

Minerales. El contenido de minerales en el tubérculo depende directamente de la naturaleza del suelo donde es cultivado, por tal razón el contenido de minerales es variable. Sobresalen los altos aportes de potasio, fósforo y el bajo contenido de ácido fítico y de sodio.

Respecto a los componentes no nutritivos, destacan los siguientes:

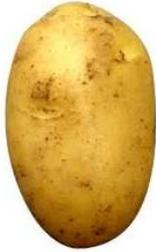
Fibra. En la cáscara o piel los tubérculos tienen pectina en forma de pectatos solubles de calcio que favorecen la adhesión a la médula, celulosa, lignina y hemicelulosas.

Enzimas. La papa contiene las siguientes enzimas endógenas: fosforilasas, polifenoloxidasas y lipooxigenasas.

Ácidos orgánicos. Los ácidos orgánicos contribuyen con el pH característico del alimento, pH de 5.6 a 6.2. Los más representativos son el málico, el cítrico y el clorogénico que reacciona con iones de hierro.

Flavonoides y antocianinas. Estos compuestos son objeto de investigación actual por cuanto son asociados como posibles antioxidantes de la dieta. Se han evidenciado algunos comportamientos antioxidantes en variedades cuya piel es de color rojo violeta.

**Tabla 1. Micronutrientes de una papa cruda
(FAO, 2009)**

Micronutrientes		
	Minerales	
	Potasio	897 mg
	Fósforo	121 mg
	Magnesio	49 mg
	Hierro	1,66 mg
	Vitaminas	
	Vitamina C	42 mg
	Niacina	2,2 mg
Vitamina B6	0,62 mg	
Tiamina	0,17 mg	

Otros componentes que están presentes en pequeñas cantidades (en promedio 0.075 mg por gramo de papa) son algunos compuestos tóxicos como la solanina y la achaconina, un glucoalcaloide de sabor amargo, presente en todas las partes verdes, incluidas las papas mismas cuando están aún verdes en el cual su contenido se puede incrementar ante determinadas condiciones (por exposición prolongada a la luz o lesiones mecánicas).

2.2 Distribución de agua en los alimentos

El término contenido de agua de un alimento se refiere, en general a toda el agua de manera global. Sin embargo en los tejidos animal y vegetal, el agua no está uniformemente distribuida por muchas razones, por ejemplo, debido a los complejos hidratados que se producen con proteínas, a los carbohidratos y otros, a las diversas estructuras internas propias de cada tejido, a los microcapilares que se forman, a su incompatibilidad con los lípidos que no permiten su presencia, etc. El citoplasma de las células presenta un alto porcentaje de polipéptidos capaces de retener más agua que los organelos que carecen de macromoléculas hidrófilas semejantes. Esta situación de heterogeneidad de la distribución del agua también se presenta en productos procesados debido a que sus componentes se encuentran en distintas formas de dispersión. Por estas razones, en los alimentos existen diferentes estados energéticos en los que se encuentra el agua; es decir, no toda el agua de un producto tiene las mismas propiedades fisicoquímicas, y esto se puede comprobar fácilmente por las diversas temperaturas de congelamiento. Este tipo de consideraciones ha llevado a que se clasifiquen tres distintos tipos de agua presentes en los alimentos para hacer referencia a la forma y al estado energético que dicho líquido guarda en un alimento (Badui Dergal, 2006)

- A. Agua libre, también llamada agua congelable y agua capilar, es la que se volatiliza fácilmente, se pierde en el calentamiento, se congela primero y es la principal responsable de la actividad del agua.
- B. Agua ligada, también llamada agua no congelable; su determinación se puede efectuar mediante el análisis térmico-diferencial, por resonancia magnética nuclear. Algunos investigadores consideran que esta agua, está fuertemente unida al alimento por medio de puentes de hidrógeno, pero otros establecen que dicha agua sólo está físicamente atrapada en una matriz muy viscosa que no permite su movilidad y difusión, y por lo tanto, no está disponible.
- C. Agua de constitución, se encuentra formando parte de la matriz del material y no puede ser eliminada mediante el proceso de secado. Ya que su separación puede implicar la destrucción parcial de la estructura de los carbohidratos.

La siguiente figura muestra las tres zonas hipotéticas en las que se puede dividir el agua contenida en un alimento. La que integra la zona III se considera “libre”, se encuentra en macrocapilares y forma parte de las soluciones que disuelven las sustancias de bajo peso molecular, es la más abundante, fácil de congelar y evaporar, y su eliminación reduce la actividad del agua a 0.8. En la zona II el agua se localiza en diferentes capas más estructuradas y en microcapilares; es más difícil de quitar que la anterior, pero al lograrlo se obtienen valores de A_w de aproximadamente 0.25, esta fracción correspondería, junto con la monocapa al agua “ligada”.

Por último, el agua en la zona I equivale a la capa monomolecular y es la más difícil de eliminar en los procesos de secado; en algunos casos se puede reducir parcialmente en la deshidratación, pero esto no es recomendable, ya que, además de que se requiere mucha energía y se daña al alimento, su presencia ejerce un efecto protector, sobre todo contra las reacciones de oxidación de lípidos, porque actúa como barrera del oxígeno.

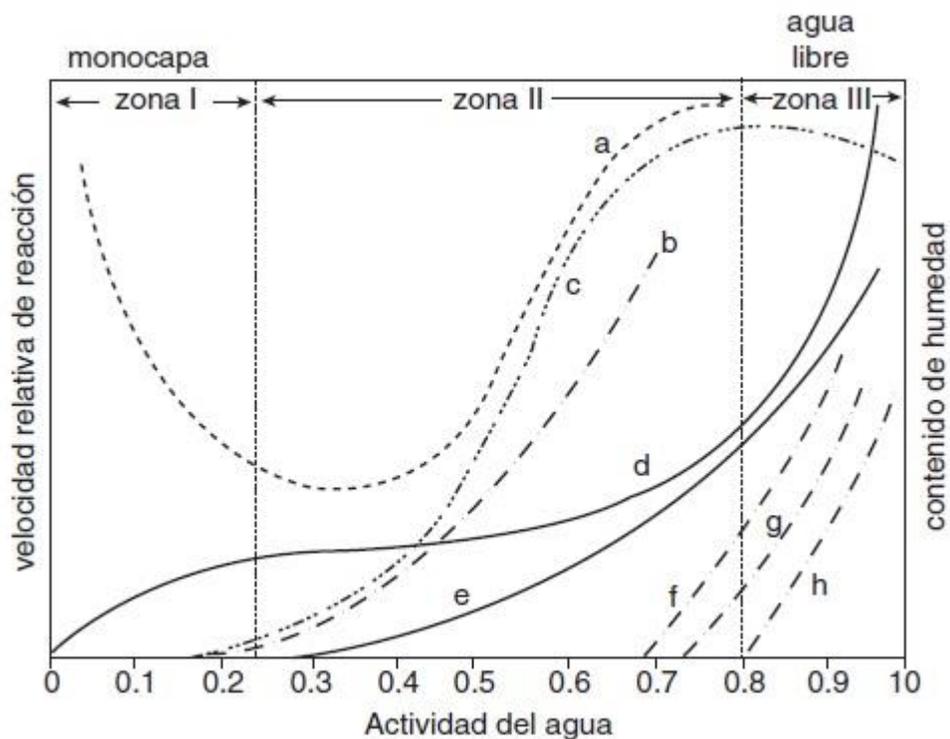


Figura 4. Cambios que ocurren en los alimentos en función de la A_w (Badui Dergal, 2006)

a) oxidación de líquidos; b) reacciones hidrolíticas; c) oscurecimiento no enzimático; d) isoterma de adsorción; e) actividad enzimática; f) crecimiento de hongos; g) crecimiento de levaduras y h) crecimiento de bacterias

2.2.1 Actividad de agua

El deterioro de los alimentos por microorganismos puede llevarse a cabo con rapidez, mientras que las reacciones enzimáticas y químicas tienen lugar más lentamente durante el almacenamiento. En cualquiera de los casos, el agua es el factor más importante que controla la velocidad de deterioro; el conocimiento del contenido de humedad por sí solo no es suficiente para predecir la estabilidad de los alimentos. Algunos alimentos son inestables a bajo contenido de humedad, mientras que otros son estables a contenidos relativamente altos de humedad. Esta disponibilidad de agua para llevar a cabo reacciones químicas, microbianas y enzimáticas que determina la vida útil de un alimento, se mide por la actividad de agua A_w . El agua en los alimentos ejerce una presión de vapor y el grado de la presión de vapor depende de:

1. La cantidad de agua presente
2. La temperatura
3. La concentración de solutos disueltos (particularmente sales y azúcares) en el agua.

La actividad de agua se define como la relación entre la presión de vapor del aire alrededor de un alimento y la presión de vapor del agua pura, permaneciendo a una misma temperatura.

$$A_w = \frac{P}{P_0} \quad \text{Ecuación 1}$$

Donde P (Pa) es la presión de vapor del alimento y P_0 (Pa) la presión de vapor del agua, la A_w está relacionada con el contenido de humedad por la ecuación de Brunauer-Emmett-Teller (BET).

$$\frac{A_w}{M(1-A_w)} = \frac{1}{M_1 C} + \frac{C-1}{M_1 C} A_w \quad \text{Ecuación 2}$$

Donde A_w es la actividad de agua, M la humedad como porcentaje en peso seco, M_1 la humedad (en base seca) de la monocapa y C una constante.

Una proporción del total de agua en un alimento se une fuertemente a los sitios específicos (por ejemplo, grupos hidroxilo de los polisacáridos, carbonilo y amino de proteínas, la unión de hidrógeno). Cuando todos los sitios son ocupados por agua absorbida el contenido de humedad se denomina el valor monocapa BET. Por consiguiente, el valor de la monocapa de BET representa el contenido de humedad en el que el alimento es más estable. A contenidos de humedad por debajo de este nivel, hay una mayor tasa de oxidación de los lípidos y, a mayores contenidos de humedad, el pardeamiento de Maillard y, a continuación actividades enzimáticas y microbiológicas se promueven. El movimiento de vapor de agua de un alimento hacia el aire circundante depende tanto del contenido de humedad, su composición, la temperatura y la humedad del aire. A una temperatura constante el contenido de humedad de los alimentos cambia hasta que entra en equilibrio con el vapor de agua en el aire circundante. El alimento, entonces ni gana ni pierde peso en el almacenamiento en esas condiciones. Esto se conoce como el contenido de humedad de equilibrio, y la humedad relativa de la atmósfera de almacenamiento se conoce como la humedad relativa de equilibrio. Cuando se representan diferentes valores de humedad relativa contra el contenido de humedad de equilibrio, se obtiene una curva conocida como isoterma de sorción de agua (Jangam et al., 2010).

Por tanto la A_w no debe confundirse con el contenido de humedad, ya que éste sólo nos da una medida cuantitativa del agua en una muestra sobre base seca o húmeda y es una propiedad extensiva que depende de la cantidad de materia; mientras que la A_w es una medida cualitativa que mide el estado del agua en un sistema, ya que es una cualidad interna que no depende de la cantidad de material y algunas de las ventajas de esta medida son: que proporciona información detallada del desarrollo de microorganismos, migración de humedad, estabilidad química y bioquímica, propiedades físicas (como la textura) y la vida útil de un alimento.

2.3 Mecanismos del secado

El secado consiste generalmente en la eliminación de humedad de un material por evaporación del agua de la superficie del producto, transfiriéndose al aire circundante. La rapidez de este proceso depende del aire (la velocidad con la que éste circule alrededor del producto, su grado de humedad, etc.), y de las características del producto (composición, contenido de humedad, tamaño de las muestras, etc.). El secado es un proceso en el que se intercambian calor y masa. Incluye una operación energética elemental y representa una de las acciones térmicas básicas en la industria de procesos y agro-alimentaria. El secado o deshidratación se usa como una técnica de preservación, pues muchas enzimas y microorganismos que causan cambios químicos en los alimentos y otros materiales, no pueden crecer y desarrollarse en ausencia de agua (Guine, 2006). Los microorganismos dejan de ser activos cuando el contenido de agua se reduce por debajo del 10% en peso; sin embargo, generalmente es necesario reducir este contenido de humedad por debajo del 5% en peso en los alimentos, para preservar su sabor y su valor nutritivo.

Las razones para su empleo son de diversos tipos:

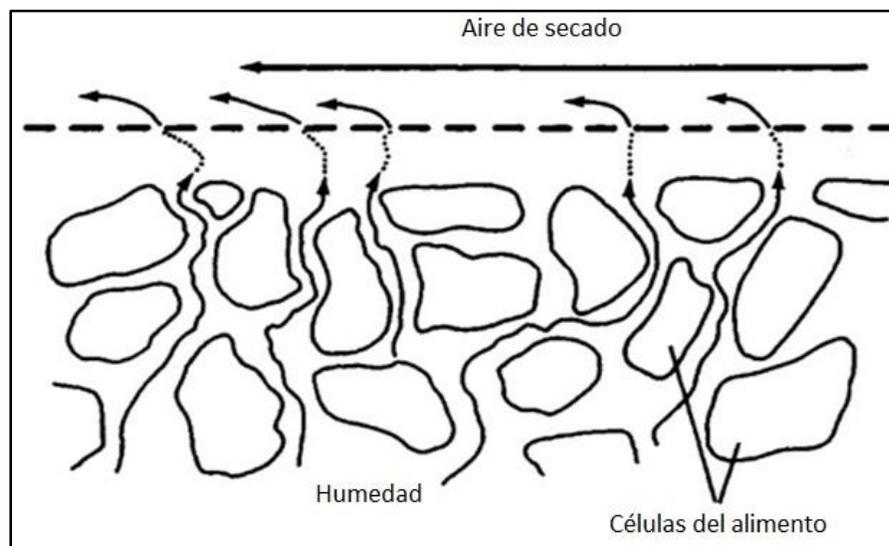
- Facilitar la manipulación en etapas posteriores
- Reducir los gastos de transporte
- Facilitar la conservación o vida de anaquel durante largos periodos
- Aumenta el valor del producto
- Reducir volumen y aumentar la capacidad de equipos en otras etapas del proceso.

Cuando el aire caliente pasa sobre la superficie húmeda del alimento, el calor es transferido a la superficie, y el calor latente de vaporización causa que el agua se evapore. El vapor de agua se difunde a través de una película límite de aire y es llevado por el aire en movimiento (Figura 5). Esto genera una región de presión de vapor de agua en la superficie del alimento, y un gradiente de presión de vapor de agua se establece de la humedad del interior del alimento al aire seco. Este gradiente proporciona la fuerza impulsora para remover el agua del alimento.

El agua se mueve a la superficie por los siguientes mecanismos:

1. Movimiento líquido por fuerzas capilares.
2. Difusión de líquidos, causado por diferencias en la concentración de solutos en diferentes regiones del alimento.
3. Difusión de líquidos, los cuales son adsorbidos en capas en la superficie de los componentes del sólido del alimento.
4. Difusión del vapor de agua en los espacios de aire dentro del alimento causados por los gradientes de presión de vapor.

Los alimentos son caracterizados como higroscópicos y no higroscópicos. Los alimentos higroscópicos son aquellos en los cuales la presión parcial de vapor de agua varía con el contenido de humedad. Los segundos tienen una presión de vapor de agua constante en diferentes contenidos de humedad. Las diferencias se encuentran mediante el uso de las isotermas de sorción.



*Figura 5. Movimiento de la humedad durante el secado
(Fellows, 2009)*

2.3.1 Etapas durante el proceso de Secado

Cuando el alimento se coloca dentro del secador, hay un periodo breve inicial de ajuste, donde la superficie se calienta hasta la temperatura de bulbo húmedo. Es decir, se empieza en el tiempo cero y el contenido inicial de humedad libre corresponde al punto A. Al principio, el sólido suele estar a una temperatura inferior a la que tendrá al final y la rapidez de evaporación irá en aumento. Al llegar al punto B, la temperatura de la superficie alcanza su valor de equilibrio. Este periodo inicial de ajuste o “estabilización” con estado inestable suele ser bastante corto y generalmente se ignora en el análisis de los tiempos de secado. La curva de la figura es recta entre los puntos B y C, por lo que la pendiente y la velocidad son constantes durante este periodo. A esta zona se le conoce como región de velocidad de secado constante. El secado entonces comienza y hace que el agua se mueva desde el interior del alimento a la misma velocidad como se evapora de la superficie, la superficie permanece húmeda. Esto es conocido como el periodo de velocidad constante y continúa hasta el punto C de la gráfica. Las tres principales características del aire que son necesarias para un secado adecuado en este periodo de velocidad constante son:

1. Una temperatura moderadamente alta de bulbo seco
2. Una baja humedad relativa
3. Una alta velocidad del aire

La rapidez de secado comienza a disminuir durante el periodo de velocidad decreciente, hasta llegar al punto D. Finalmente, en el punto D, la rapidez de secado disminuye, hasta que llega al punto E, donde ya no es apreciable. Durante el periodo de secado constante, la superficie del sólido está muy mojada y sobre ella existe una película de agua. Esta capa de agua, llamada humedad no ligada, está siempre sin combinar y actúa como si el sólido no estuviera presente. Si el sólido es poroso, la mayor parte del agua que se evapora durante el periodo de rapidez constante proviene del interior del mismo sólido. Este periodo continuará mientras el agua siga llegando a la superficie con la misma rapidez con la que se evapora. Durante esta fase, la rapidez de secado depende de la velocidad de transferencia de calor a la superficie de desecación. La transferencia de masa se equilibra con la velocidad de transferencia de calor, de forma que la temperatura en la superficie de secado se mantiene constante.

El punto C de la gráfica corresponde a la situación en la cual no hay suficiente agua en la superficie para mantener una película continua. La superficie ya no está totalmente mojada, y la porción mojada comienza a disminuir durante este periodo y como la rapidez de secado es función del área total, esta decrecerá, aunque la rapidez de secado por unidad de área permanezca constante. El contenido de humedad en el punto C se conoce como humedad crítica y el periodo que continúa a partir de ese punto se conoce como periodo de rapidez decreciente. La naturaleza del movimiento de humedad desde el interior del sólido hacia la superficie influencia el comportamiento del sólido en el periodo de secado decreciente. Existen varios mecanismos que rigen el control de migración de humedad en el periodo decreciente de humedad. Los más importantes son difusión, capilaridad y gradiente de presión causado por el encogimiento del sólido.

El primer periodo de rapidez decreciente, que se conoce como periodo de secado de superficie no saturada, la rapidez de secado decrece linealmente con respecto al contenido de humedad. Este periodo puede estar o no presente en el proceso o puede representar todo el periodo de rapidez decreciente dependiendo del tipo de material. El segundo periodo de rapidez decreciente, que se conoce como periodo de difusión, empieza en el punto D. El plano de evaporación comienza a desplazarse con lentitud por debajo de la superficie.

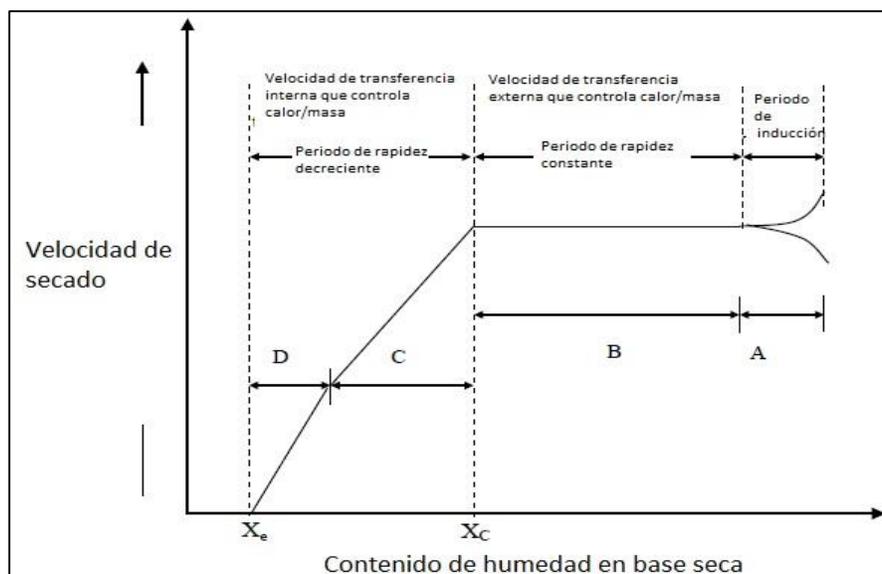


Figura 6. Curva típica de los periodos de rapidez en el secado (Jangam et al., 2010)

El calor para la evaporación se transfiere a través del sólido hasta la zona de vaporización. El agua vaporizada atraviesa el sólido para llegar hasta la corriente de aire en donde alcanza la humedad de equilibrio. Es posible que la cantidad de humedad que se elimina durante el periodo de velocidad decreciente sea pequeña, no obstante, el tiempo requerido puede ser largo, y a esta zona la identificamos como dominio higroscópico.

El fenómeno de capilaridad es el responsable del movimiento del líquido en los poros durante el proceso de secado durante las primeras horas.

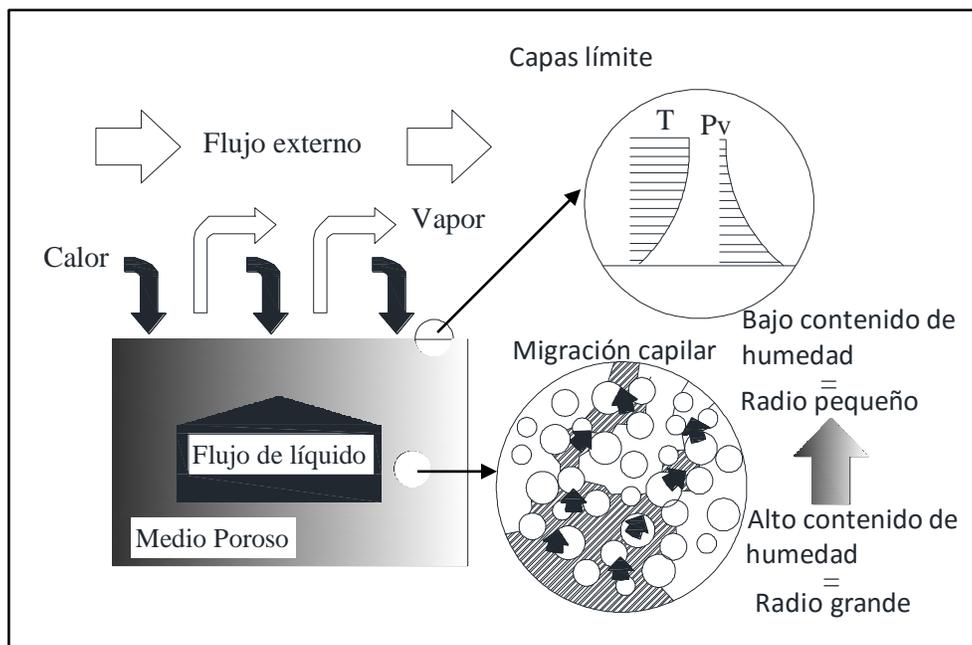


Figura 7. Periodo de rapidez constante
(Tsotsas and Mujumdar, 2011)

La humedad migra dentro del medio en su mayoría por fuerzas capilares, la evaporación ocurre como un intercambio de la superficie con un equilibrio dinámico con la capa límite entre el flujo de calor y vapor

2.4.2 Factores que influyen en la rapidez de secado

La rapidez del secado depende de las condiciones del secador (temperatura de bulbo seco, Humedad relativa, la velocidad del aire y los coeficientes de transferencia de calor) y de las propiedades del alimento (contenido de humedad, volumen, temperatura de la superficie y rapidez de la pérdida de humedad). El tamaño de las muestras del alimento tiene un importante efecto en la velocidad del secado en ambos periodos de rapidez constante y decreciente. En el periodo de rapidez constante, las piezas más pequeñas tienen un área de superficie más grande disponible para la evaporación, mientras que, en el período de rapidez decreciente, las piezas más pequeñas tienen una distancia más corta que la humedad viaja a través del alimento. Otros factores que influyen en la rapidez de secado incluyen:

1. El contenido de grasas del alimento (altos contenidos generalmente resultan en un secado más lento, como si el agua estuviera atrapada en su interior).
2. El método de preparación del alimento (las superficies sin cáscara más rápidamente pierden la humedad)
3. La cantidad del alimento colocado dentro del secador en relación a su tamaño (en un determinado secador, las menores cantidades de muestras alimenticias secan más rápido).
4. Naturaleza del material: Resulta evidente que se obtendrán curvas distintas dependiendo de las características de material a secar.
5. Temperatura del aire: Cuanto mayor sea la temperatura del aire de secado (manteniendo constante el resto de las variables), mayor será la velocidad de secado, y las curvas presentarán mayor pendiente.
6. Velocidad másica del aire: Con este parámetro se pueden presentar dos tipos de comportamiento. En el primero la velocidad de secado es directamente proporcional a la velocidad del aire. En el segundo caso, la velocidad de secado es prácticamente independiente de la velocidad del aire, lo que indica que en este caso la etapa controlante es la transferencia de materia a través del sólido, que lógicamente no se ve afectada por la velocidad del aire.

7. Humedad Relativa: La cantidad de vapor de agua contenida en el aire y es el porcentaje de la humedad de saturación, que se calcula normalmente en relación con la densidad de vapor de saturación.
8. Tamaño y geometría del sólido: Si las características del sólido permiten obtener partículas uniformes, al variar el tamaño se puede observar que la rapidez de secado aumenta al disminuir el tamaño de la muestra. Si se trata de un sólido que no permite obtener tamaños uniformes, la influencia de la profundidad o grosor de la muestra es similar a la anteriormente comentada. Al aumentar el grosor o tamaño para cierta geometría de las muestras, disminuye la velocidad de secado.

La velocidad de transferencia de calor del fluido al sólido se puede encontrar utilizando la siguiente fórmula:

$$Q = h_s(\theta_a - \theta_s) \text{ Ecuación 3}$$

La velocidad de transferencia de masa del sólido al fluido se puede encontrar mediante:

$$-m_c = k_g A(H_s - H_a) \text{ Ecuación 4}$$

Debido a que durante el periodo de rapidez constante, existe un equilibrio entre la rapidez de transferencia de calor al alimento y la rapidez de transferencia de masa en la forma de pérdida de humedad del mismo, estas velocidades están relacionadas por:

$$-m_c = \frac{h_c A}{\lambda} (\theta_a - \theta_s) \text{ Ecuación 5}$$

Donde Q (J/s) es la rapidez de transferencia de calor, h_c (W/m²K) el coeficiente de transferencia de calor de superficie para el calor convectivo, A (m²) la superficie o área disponible para el secado, θ_a (°C) la temperatura de bulbo seco promedio del aire de secado, θ_s (°C) la temperatura de bulbo húmedo promedio del aire de secado, m_c (kg/s) el cambio en la masa a un tiempo (rapidez de secado), k_g (kg/m²s) el coeficiente de transferencia de masa, H_s (kg de humedad por kilogramos de aire seco) la humedad del aire y λ (J/kg) el calor latente de evaporación a la temperatura de bulbo húmedo. El coeficiente de transferencia de calor de superficie (Karunasena et al.) está relacionado a la velocidad del flujo de masa del aire utilizando las siguientes ecuaciones para flujo paralelo del aire,

$$h_c = 14.3G^{0.8} \text{ Ecuación 6}$$

Y para el flujo perpendicular del aire,

$$h_c = 24.2G^{0.37} \text{ Ecuación 7}$$

Donde G (kg/m²s) es la velocidad del flujo de masa del aire.

2.4.3 Condiciones internas y externas del proceso

La transferencia de masa y energía en el secado depende de una serie de factores que van desde condiciones externas a internas. Se sabe que las condiciones externas tienen que ver directamente con la remoción de humedad por evaporación en la superficie del alimento hacia el aire circundante. A su vez los factores internos van alterando la migración de la humedad. Por su puesto que los factores dependen directamente del material a secar y del agente de secado, esto genera una relación con la transferencia de masa.

A. Las condiciones externas. La resistencia de transferencia de masa en la capa límite del aire es mayor que la resistencia de la migración de humedad interna, así que la intensidad de secado depende principalmente de las condiciones del gas (temperatura, humedad, flujo del aire, área de la superficie expuesta y presión) y es casi independiente de los parámetros del material. Es decir, dichas condiciones están definidas por la resistencia a la transferencia de calor y masa de la capa límite del gas, y en el caso que predominen, el secado no dependerá de las características del sólido sino de las condiciones del aire, y estará controlado por la transferencia de masa y calor entre el gas y la superficie del sólido, empleándose en la evaporación todo el calor que se recibe del gas, el cual se comporta como una superficie libre de agua. En algunos materiales puede existir encogimiento y excesiva evaporación en la superficie; después de que la humedad inicial ha sido removida dando lugar a altos gradientes de humedad del interior a la superficie. Este fenómeno es causado por un secado intenso y encogimiento; y consecuentemente las altas tensiones dentro del material, dan como resultado agrietamiento y deformación.

B. Las condiciones internas. Están definidas, por la transferencia de calor y de masa a través del sólido. En el caso que predominen, es decir, que la resistencia a la transferencia de masa a través del material sea muy superior a la de la capa límite del gas, la difusión interna controlará el proceso y lo más importante serán las propiedades del sólido. A partir de la transferencia de calor hacia un sólido húmedo, un gradiente de temperatura se desarrolla dentro del mismo, mientras la evaporación de la humedad ocurre en la superficie. La evaporación produce una migración de humedad desde adentro del sólido hacia la superficie, la cual ocurre a través de uno o más mecanismos, normalmente por difusión, flujo capilar y presión interna causada por el encogimiento durante el secado (Fanta et al., 2014). Se puede describir cuál de las condiciones predomina más, usando el número de Biot tanto de calor como de masa.

2.5 Mecanismos de transporte

Durante este proceso, existe una transferencia simultánea de materia (humedad) y de energía (calor); en que la transferencia de calor dentro del alimento ocurre por conducción y la transferencia de masa toma lugar principalmente por difusión de acuerdo con los gradientes de temperatura y concentración de humedad respectivamente (Srikiatden and Roberts, 2008), por lo tanto en este proceso intervendrán:

- A. Una transmisión de calor que proporcione el calor latente de vaporización necesario para provocar un cambio de fase y eliminar el agua en fase gaseosa.
- B. Una transmisión de agua desde el interior del alimento hacia la capa exterior.

Ambos procesos se realizan simultáneamente, influyendo uno sobre el otro.

2.5.1 Transferencia de energía

El proceso de secado principalmente involucra dos modos de transferencia del calor los cuales son conducción (en el interior del alimento) y convección en la interfase sólido-aire.

2.5.1.1 Ley de Fourier para la conducción de calor

La transferencia de calor por conducción se expresa con la ley de Fourier para la conducción de calor en fluidos y sólidos.

$$\frac{q_x}{A} = -k \frac{dT}{dx} \quad \text{Ecuación 8}$$

Donde q_x es la velocidad de transferencia de calor en la dirección x (W), A es el área de corte transversal normal a la dirección del flujo de calor (m^2), K es la conductividad térmica (W/mK). La cantidad q_x/A se llama flujo específico (flux) de calor (W/m^2), la cantidad dT/dx es el gradiente de temperatura en la dirección x . Esta ecuación es aplicable para el estado estacionario, lo cual implica que no hay cambio en las condiciones de un sistema con el tiempo; mientras que el estado transitorio implica cambios con el tiempo o dependencia respecto a este. En el estado transitorio se considera que las condiciones cambian en diversos puntos con respecto a un periodo de tiempo, en tanto que el estado estacionario se supone condiciones constantes en un punto e instante de tiempo determinado, la ley de Fourier entonces se transforma en la siguiente ecuación, sin generación de calor:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \alpha \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \quad \text{Ecuación 9}$$

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \alpha \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) \quad \text{Ecuación 10}$$

Donde las ecuaciones relacionan la temperatura T con la posición x,y,z y el tiempo t . Es importante considerar las variables conductividad y difusividad que intervienen en las ecuaciones.

2.5.1.2 Ley de enfriamiento de Newton de la convección

Este mecanismo de transferencia de calor se da en fluidos más calientes que están en contacto con sólidos más fríos. La fase gaseosa otorga su energía al sólido. Durante la convección se forman remolinos por los cambios de densidad producidos por la temperatura del aire y la superficie del sólido. La transferencia de calor por convección está determinada por la Ley de enfriamiento de Newton que indica:

$$q = h_c A (T_\infty - T_i) \quad \text{Ecuación 11}$$

Donde h_c es el coeficiente individual de transferencia de calor por convección a través del fluido, A es el área de transmisión de calor perpendicular a la dirección del flujo, T_∞ la temperatura del medio circundante y T_i la temperatura de la interfase. Cuando un fluido a una temperatura hace contacto con un sólido de una temperatura diferente, se forma una capa límite térmica en el líquido. La capa límite se desarrolla debido a una diferencia en las temperaturas, las partículas del fluido que hacen contacto con la placa alcanzan el equilibrio térmico a la temperatura de la superficie de la placa. A su vez estas partículas intercambian energía con las de la capa adyacente del fluido, y se producen en el fluido gradientes de temperatura, la región del fluido en la que existen estos gradientes de energía es la capa límite térmica. Al aumentar la distancia desde el inicio de la placa, los efectos de transferencia de calor penetran más en el flujo libre y crece la capa límite térmica. En la superficie no hay movimiento de fluido y la transferencia ocurre sólo por conducción. Por ello, las condiciones en la capa límite térmica que influyen en el gradiente de temperatura de la superficie determinan la transferencia de calor en la misma, y el h_c disminuirá a medida que la distancia “ x ” aumente, esta capa sólo existe cuando hay diferencias entre las temperaturas del sólido y el fluido.

2.5.2 Transporte de masa por difusión

La difusión es un proceso natural muy común que ocurre en todas partes; en un sistema físico, químico, biológico o geológico (Basu and Kumar, 2014). La difusión molecular o difusión de Fick en la fase fluida es ampliamente aceptada como un mecanismo predominante de la transferencia de masa dentro de los alimentos sólidos; por ejemplo, en los procesos de secado y lixiviación (Aguilera, 2005). El conocimiento de la difusividad es esencial en la simulación de un proceso de secado, ésta es una función compleja y específica del sistema. En un enfoque global fenomenológico, la difusión de humedad representa a todos los gradientes de humedad impulsados por mecanismos de transferencia tales como el flujo capilar (difusión en fase líquida), la migración en la capa absorbida, el vapor de condensación y la difusión de vapor en el aire. Para el alimento, la difusión líquida se supone ser el principal mecanismo de transporte de humedad en el primer periodo de velocidad decreciente mientras la difusión de vapor se supone dominar en el segundo periodo de rapidez decreciente (Hassini et al., 2007).

La primera Ley de Fick establece que dentro de un medio continuo y bajo la presencia de un gradiente de concentración, la migración neta de moléculas de soluto debido al movimiento aleatorio ocurre de una región de alta concentración a una de baja concentración. Por tanto, la fuerza impulsora para la difusión es un gradiente de concentración. Técnicamente la difusión puede ser definida por un potencial químico, el cual es la medida de la energía libre disponible para mover un mol de partículas de una región a otra. Otra manera de establecer la difusión es el movimiento molecular de regiones de alto potencial químico a áreas de menor potencial químico.

La primera ecuación prominente de la difusión es la primera Ley de Fick, la cual expresa el flux J , en $\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ que es proporcional a un gradiente de concentración C en $\text{mol}\cdot\text{m}^{-3}$ en una posición del vector \mathbf{r} a un tiempo t :

$$J = -D\nabla C(\mathbf{r}, t) \quad \text{Ecuación 12}$$

Donde D simboliza un coeficiente de difusión en $\text{m}^2\cdot\text{s}^{-1}$ y ∇ es el operador diferencial vectorial nabra. Esta ecuación aplicada a una dimensión se reduce a:

$$J_{AZ} = -D_{AB} \frac{dC_A}{dz} \quad \text{Ecuación 13}$$

Donde J_{AZ} es el flujo molar del componente A en la dirección z causado por la difusión molecular, D_{AB} es la difusividad molecular de la molécula A en B, C_A es la concentración de A en mol kg/m³ y z es la distancia de difusión en m. La segunda ley de Fick, también llamada ecuación de difusión, establece que la rapidez a la que este proceso continua en un punto en el espacio para los sistemas binarios diluidos (es decir, un soluto y una gran parte del disolvente) es proporcional a la variación de la pendiente del gradiente de concentración. El coeficiente de difusión D_{AB} depende de la presión, de la temperatura y de la composición del sistema, como es de esperarse de acuerdo a la movilidad de las moléculas, los coeficientes de difusión son generalmente mayores en relación con los gases; los coeficientes de difusión para líquidos son del orden de 10⁻⁵ (cm²/s), para gases del orden de 10⁻¹(cm²/s) y para sólidos 10⁻⁹(cm²/s). Cuando no se cuenta con datos experimentales de los coeficientes de difusividad para distintos sistemas, se puede recurrir a expresiones basadas en su mayoría en la teoría cinética de los gases, para el cálculo de la difusividad.

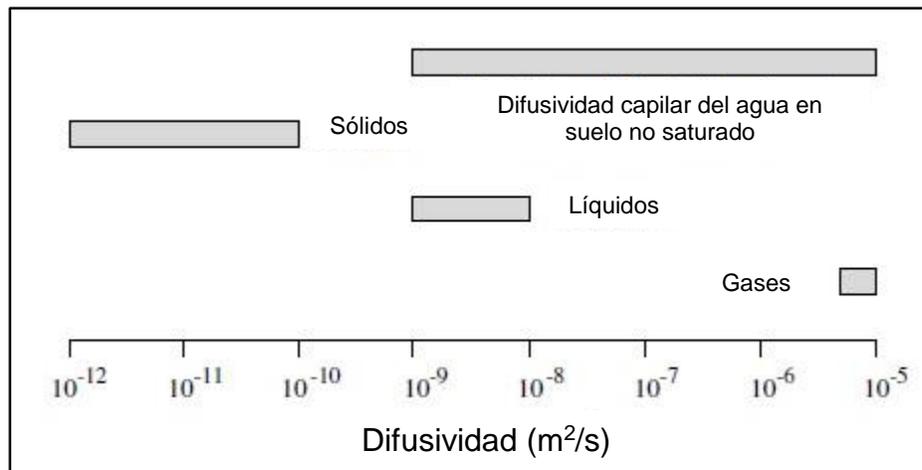


Figura 8. Rango de valores típicos para la difusividad (Datta, 2002)

2.5.3 Transporte de masa por convección

La transferencia de masa por convección es análogo a la transferencia de calor por convección. Es el movimiento de masa a través de un medio como resultado del movimiento neto de un material en otro por ejemplo, una superficie húmeda en contacto con un flujo de aire, el cual transporta el vapor de agua. Como en la transferencia de calor, se puede tener una convección forzada o convección natural. La convección forzada es debida a una fuerza tal como un ventilador, mientras que la convección natural es impulsada por una diferencia de densidades en el fluido creada por una concentración o diferencia de temperatura. La transferencia de masa por convección sobre una superficie esta descrita por:

$$N_{A1-2} = h_m A (C_1 - C_2) \quad \text{Ecuación 14}$$

Donde N_{A1-2} es el flujo de masa del medio 1 al 2, A es el área normal a la dirección del flujo de masa, $C_1 - C_2$ es la diferencia de concentración entre la superficie y el fluido, h_m es el coeficiente de transferencia de masa convectivo, también llamado coeficiente de película.

Las unidades de h_m se muestran a continuación:

$$h_m = \frac{[N_{A1-2}]}{[A][C_1 - C_2]} = \frac{\left[\frac{kg}{s}\right]}{[m^2] \left[\frac{kg}{m^3}\right]} = \left[\frac{m}{s}\right]$$

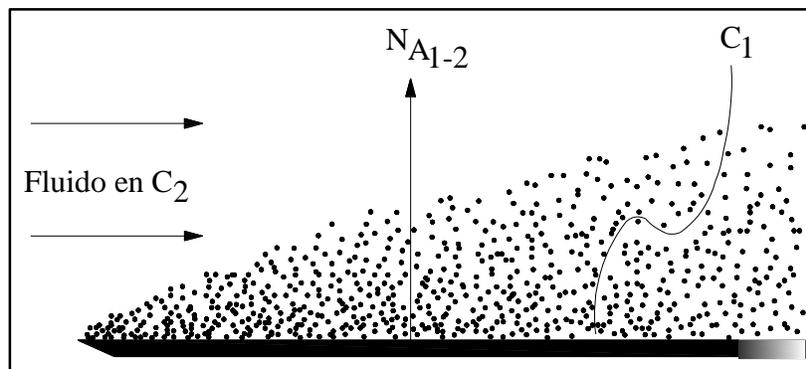


Figura 9. Esquema del fenómeno de convección-difusión sobre una superficie (Datta, 2002)

El coeficiente de transferencia de masa incluye los efectos de difusión y flujo de masa, como el coeficiente de transferencia de calor, h_m depende de la geometría del sistema, propiedades del fluido, saturación del fluido y la magnitud de las concentraciones.

2.5 Microestructura del secado en materiales porosos

Un medio poroso, es un sistema heterogéneo hecho de una matriz sólida con espacios vacíos llenos de fluidos, puede ser tratado como un medio continuo porque representa el papel de cada fase en el transporte a través de este sistema de fases. La mayoría de los materiales sólidos sometidos al proceso de secado se tratan como medios porosos higroscópicos con el transporte de múltiples fases de calor y masa. Los espacios de los poros están llenos de humedad (agua líquida) si el material está completamente saturado o con humedad y aire; si está parcialmente saturado. Una teoría muy conocida para el transporte de medios porosos es el propuesto por Whitaker (1977) con el concepto de volumen promedio o volumen de elemento representativo (EVR) donde existe un volumen de material poroso y rígido asociado a una serie de puntos en el espacio; el volumen de un material poroso rígido se puede asociar a una serie de puntos en el espacio, como se muestra en la siguiente figura.

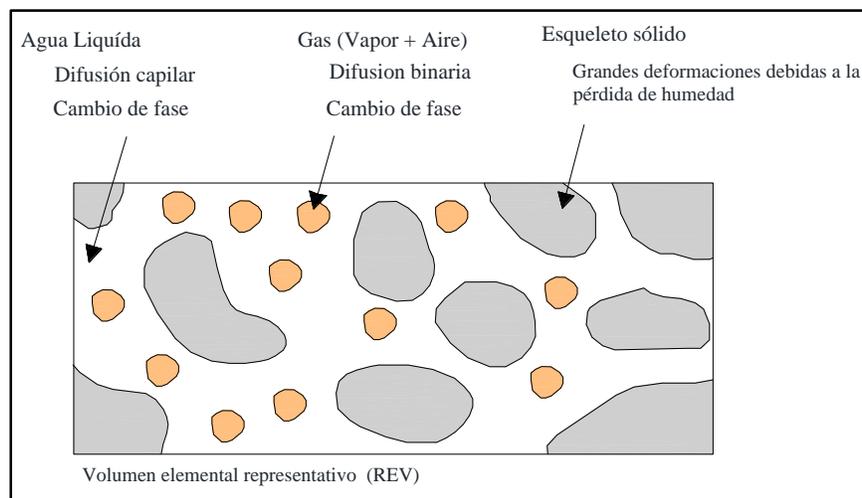


Figura 10. Diferentes fases en un medio poroso y modos de transporte (Gulati and Datta, 2015)

Cada uno de estos puntos contiene las tres fases, de tal manera que el volumen promedio puede ser determinado no importa en qué lugar del dominio del material se encuentre, este siempre contendrá las tres fases, el elemento de volumen representativo debe ser suficientemente grande para que las cantidades promedio sean definidas y suficientemente pequeño para evitar las variaciones debido a los gradientes macroscópicos y configuraciones de no equilibrio a nivel macroscópico.

Durante el secado, el proceso de eliminación de agua puede afectar a la composición química de donde las moléculas de agua se mantuvieron dentro del dominio marcado por las superficies del material antes del mismo. La eliminación de las moléculas de agua deja espacios vacíos, que pueden ser llenados parcial o totalmente por una especie cercana. Estos movimientos afectan a la formación de la microestructura del material que se está secando y que pueden incluir reordenación de las moléculas de soluto y la contracción (con formación de una costra o la formación de una superficie dura) o la ruptura de la estructura sólida (formación de grietas, por ejemplo). Se generan cambios estructurales, una vez que se producen a nivel de nanoestructura/microestructura; la eliminación de agua puede causar el movimiento permanente de las estructuras blandas que apoyan la estructura físico-química de la pared celular o membranas de las células. Esto se explica con una visión intuitiva, microestructural del proceso de secado convectivo con la ayuda de medios porosos húmedos, que se simplifica de Chen (2007). Las direcciones del calentamiento y de transferencia de vapor de agua son opuestas entre sí. Los capilares aquí tienen diámetros idénticos a nivel micro y las paredes son hidrófilas, sin intercambio de calor y de masa a través de las paredes capilares (simplemente, las paredes son impermeables), suponiendo que fueron inicialmente llenas de agua, se inicia la evaporación.

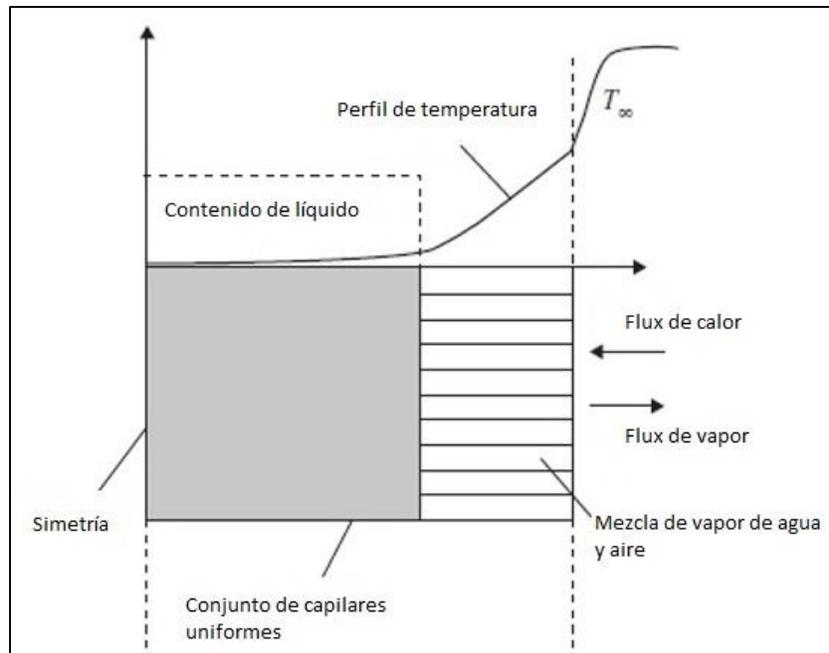


Figura 11. Conjunto de capilares durante el secado
(Chen and Putranto, 2013)

Esta se produce aquí de manera uniforme para todos los tubos en la misma condición de convección, en sus salidas. Una mezcla compleja surge de este sistema ideal como diferentes diámetros de los vasos capilares y paredes permeables, (por ejemplo, membranas) que están involucradas. El intercambio de calor es posible al cruzar la pared capilar y la rapidez de evaporación entre los tubos (en las mismas condiciones de secado aplicados en las salidas) ahora son diferentes. No existe uniformidad en las interfaces de líquido a gas entre los tubos, dando una distribución del contenido medio de agua líquida a lo largo de la dirección horizontal, por otra parte si las paredes están hechas de material higroscópico, el movimiento molecular del agua a lo largo de la superficie de la pared también es posible. Aunque el intercambio de la humedad y el calor entre los tubos pueden tratar de igualar la rapidez de evaporación y contenido de agua líquida, todavía se espera una distribución más amplia de los contenidos de agua líquida. Además, debido a las interfaces de líquido a gas extendidos, la evaporación no se produce sólo en el menisco. La evaporación se producirá en una región de dimensión finita: la aparición de una zona de evaporación en el nivel micro, así como en el macro.

En una situación no ideal, tal como en un medio poroso normal con poros (abiertos y cerrados) y canales interconectados, se reduce la probabilidad de la ocurrencia de retroceso brusco de líquido. En otras palabras, la situación mostrada en la figura 2 no es común. Cuando el sistema se mezcla en el nivel micro (una situación más realista para un medio poroso), los capilares de diferentes dimensiones se orientan en muchas direcciones y se interconectan entre sí. Incluso a nivel local a nivel de micrones, los tamaños de diámetro capilar pueden ser desigual. La transferencia de masa es multidireccional, siguiendo las leyes de la física, que está siguiendo la dirección de las fuerzas impulsoras.

El movimiento del líquido puede ser difusivo o conducido por fuerzas capilares y transportándose en caminos más simples. El espesor de pared de los capilares (la estructura aparentemente sólida) y propias microestructuras porosas de la pared (aún otro nivel, más pequeño de las redes o sistemas de poros), y su falta de uniformidad en la distribución espacial, se suman a la situación general de hacer la transición más uniforme.

Los materiales que crean las paredes de las microestructuras también son importantes ya que pueden tener muy diferentes afinidades hacia las moléculas de agua (esto se refleja por sus isothermas de equilibrio o capacidad de retención de agua líquida en la misma humedad relativa y temperatura). La evaporación puede ocurrir sobre todo en la zona de transición, donde la rapidez depende de la fuerza de conducción local para la transferencia de vapor.

La propagación de la zona de evaporación, o una zona de transición blanda, desde el núcleo todavía muy húmedo y la región de la superficie ya seca es, por lo tanto esperada. Los pre-tratamientos (remojo, escaldado, etc.), utilizando soluciones acuosas particularmente ayudan a acelerar el proceso de transferencia de agua.

Este entendimiento ha sido particularmente útil en el apoyo a las ideas de la revisión de los cálculos con números convencionales de Biot y Lewis cuando el secado convectivo es de interés, por lo que las condiciones para el modelo de la simplificación se pueden hacer de manera más realista, y los conceptos de modelo pueden ser discernidos con el apoyo más cuantitativo.

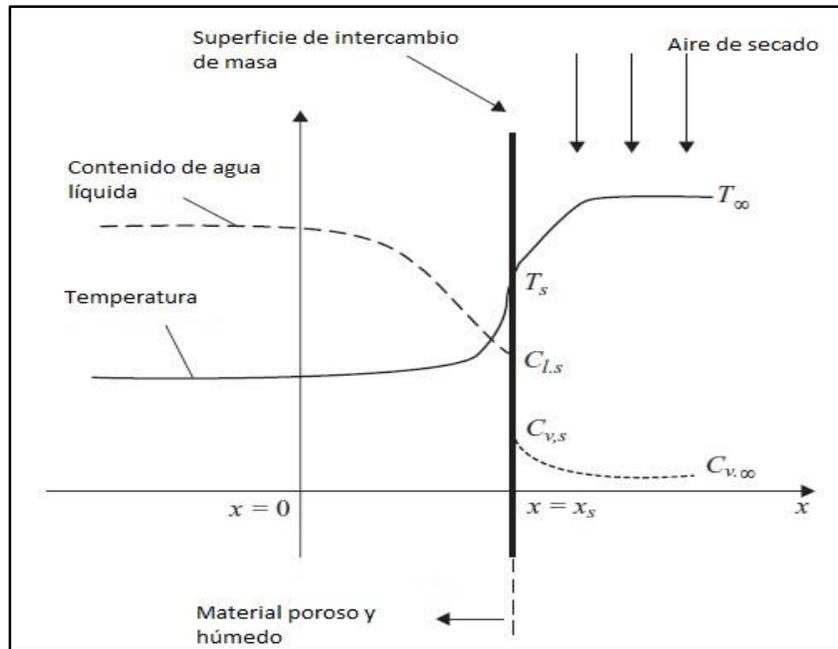


Figura 12. Esquema común de secado al aire de un sólido húmedo (Chen and Putranto, 2013)

Las funciones de difusividad efectiva publicados en la literatura pueden ser comparados y discutidos en función de sus relaciones con los descubrimientos con imágenes de resonancia magnética (RMI) u otras herramientas interesantes. Ahora se reconoce que la microestructura del material y su naturaleza (composición, tamaño de los poros, etc) es interactivo con los fenómenos de transferencia y formación de microestructuras, que tiene mucho que ver con la velocidad y el tiempo de los procesos de transferencia. El Secado induce la contracción, que es el cambio estructural más evidente y visible. Como el secado se produce en los canales de los poros en el material, el agua restante restringe a las paredes estructurales a crear una fuerza de tracción que arrastra la estructura.

2.6 Cambios microestructurales producidos por el secado

El procesamiento de materias primas vegetales provoca cambios irreversibles en los tejidos de frutas y verduras. Estos cambios son particularmente visibles después de un tratamiento térmico tal como el secado, que causa notorias modificaciones estructurales y físicas en los tejidos de papa (Krokida et al., 2003, Mulet et al., 1989). Así también la pérdida de agua y la segregación de compuestos que ocurren durante esta operación, pueden causar rigidez, daños, trastornos de las paredes celulares y colapso del tejido celular. Los principales cambios se explican a continuación:

2.6.1 Deformación y encogimiento

El encogimiento puede entenderse como una deformación estructural significativa en la forma y tamaño de la muestra que ocurre a lo largo de la transferencia simultánea de masa y calor (Mayor and Sereno, 2004), durante el secado de vegetales cuando la humedad es removida de la superficie del tejido, las paredes de los poros llenos de agua experimentan una presión que arrastra toda la matriz hacia el centro. Este estrés de contracción resulta en cambios estructurales prominentes en la forma y tamaño (Yang et al., 2001). En condiciones drásticas de secado, las muestras alimenticias también pueden desarrollar agrietamientos sobre su superficie lo cual se debe a perturbaciones mecánicas y tensiones de equilibrio dentro de la estructura de la matriz debido a un encogimiento no uniforme.

La contracción puede influir sobre la velocidad de secado y la calidad del producto final, el encogimiento ocurre primero en la zona expuesta al aire, es por esto, que el gradiente de humedad del material genera esfuerzos y tensiones internas, algunos de estos efectos generados pueden verse ilustrados en la siguiente figura.

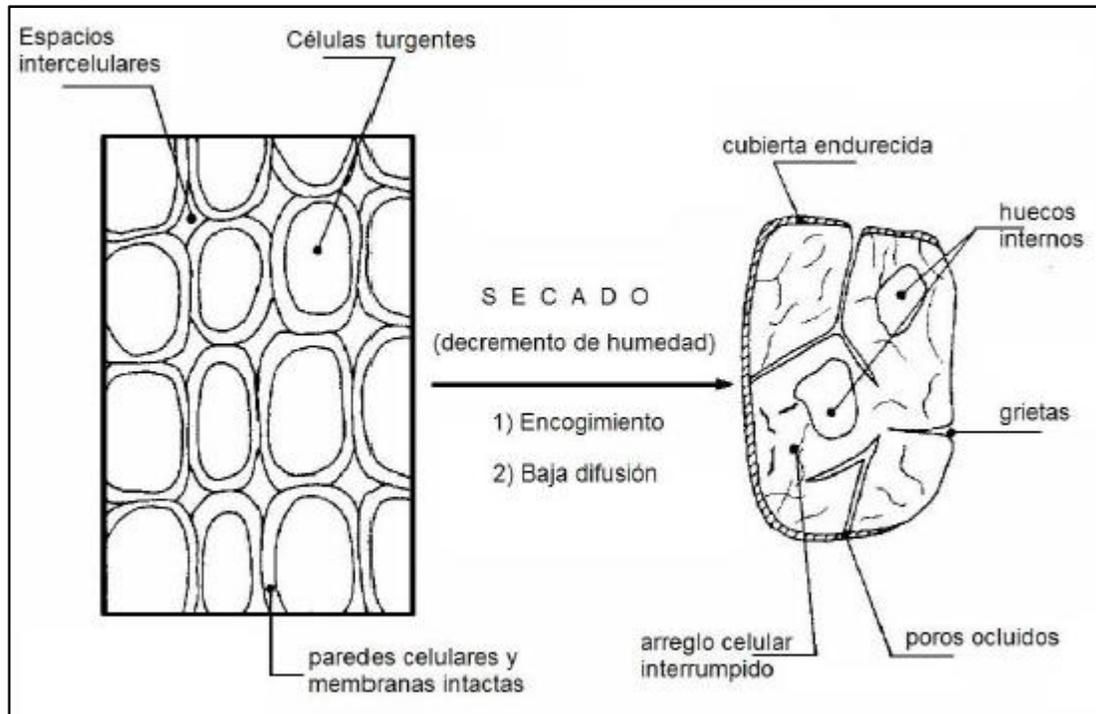


Figura 13. Cambios microestructurales durante el secado de tejidos vegetales (Aguilera and Stanley, 1999)

Además se considera que el efecto combinado de las condiciones de proceso facilita la formación de una capa rígida o costra en la superficie externa del producto durante la etapa inicial del proceso, lo que determina el tipo y la magnitud del encogimiento. A velocidades iniciales de secado muy altas, las capas exteriores del producto se hacen rígidas y su volumen final casi se alcanza a principios de éste. A medida que continúa el secado, los tejidos se rompen internamente, formando una estructura abierta (Mayor and Sereno, 2004).

A nivel micromecánico celular la textura de frutas y verduras es dependiente de la presión de turgencia, y la composición de las paredes celulares individuales y la lamela media, que une a las células individuales (Barrett et al., 2010). Las paredes celulares son aceptadas como el principal componente estructural que afecta a las propiedades mecánicas de frutas y verduras. También la presión de turgencia, tamaño, forma celular, el volumen de vacuola y el volumen de los espacios intercelulares así como la composición química; que tienen una gran influencia en la resistencia del tejido y de forma macroscópica en la firmeza de la fruta (Fanta et al., 2014).

2.6.2 Disminución de la capacidad de rehidratación

Muchos de los alimentos deshidratados son consumidos después de su rehidratación, ésta intenta regenerar la estructura del alimento fresco, es por ello que uno de los efectos que se busca evitar en los alimentos sometidos a deshidratación sea el colapso estructural. Por lo que la rehidratación puede ser considerada como una medida de los daños al material causados por el secado y los tratamientos previos de la deshidratación (Lewicki, 1998). La rehidratación está compuesta por tres procesos simultáneos; el primero, la entrada del agua al material seco, el segundo es el hinchamiento y el tercero es la pérdida de sólidos solubles, y que el hinchamiento, para materiales biológicos, es proporcional a la cantidad de agua ganada (Krokida et al., 2003).

Los vegetales deshidratados poseen propiedades convenientes para la rehidratación: la primera es la capacidad de embeber agua rápida y uniformemente la cual depende de las interacciones fisicoquímicas y los eventos relacionados con la difusión, como cuando ocurre un endurecimiento superficial o cuando el producto ha sido fijado como una estructura densa y la segunda, es la capacidad de retener el agua en forma similar que el producto natural (Aguilera and Stanley, 1999).

Mayor & Sereno (2004) reportan papa deshidratada a diferentes temperaturas del aire, donde obtuvieron muestras con humedades similares pero con diferentes grados de encogimiento, debido a las diferentes condiciones de secado, una capacidad de rehidratación inversamente proporcional al grado de encogimiento. McMinn & Magee (1997) reportaron como resultado de estudio del secado convectivo de papa a diferentes temperaturas de proceso, que las muestras más contraídas por efecto de las condiciones de secado tienen una capacidad más baja de rehidratación. Por su parte en 1990 Jayaraman y colaboradores, citado por (Krokida and Marinos-Kouris, 2003), estudiaron el secado convectivo de coliflor y concluyeron que la incapacidad del tejido vegetal para rehidratarse completamente era consecuencia de la estructura densa y colapsada del material deshidratado, con capilares muy reducidos.

2.6.3 Endurecimiento del tejido y su influencia en el encogimiento a nivel celular

Así también, debido a la reducción de humedad, con frecuencia se puede llegar a formar un endurecimiento del tejido; fenómeno conocido como case-hardening, ya que el tejido que interactúa directamente con el entorno de secado a través de las células externas en la frontera, están sometidas a una reducción de humedad intensa en cada etapa del secado, en comparación con las capas celulares interiores. Esto propicia la formación de una capa endurecida o costra, la cual opone resistencia al transporte de humedad de las capas celulares de los tejidos interiores y bajo ciertas condiciones de secado, el endurecimiento puede llegar a producir agrietamientos, mientras que las capas celulares internas están todavía húmedas (Karunasena et al., 2015). Además, debido a que existe un mayor valor de presión de turgencia en las células con alta humedad, el colapso de las células está también limitado, sobre todo en las capas celulares interiores, esto finalmente resulta en la formación de arrugas en la pared celular sin patrón alguno. Igualmente de otros cambios relacionados con algunos parámetros geométricos (área celular, perímetro, redondez, elongación y compactación) para cada diferente tipo de tejido vegetal. De lo anterior resulta una influencia de este endurecimiento en el encogimiento del material. El tamaño de la célula, la presión de turgencia debido a los fluidos celulares, el espesor de la pared y la rigidez del material son algunos de los elementos importantes a considerar.

Este fenómeno es de gran interés para la industria del secado de alimentos, particularmente con respecto a la calidad y desarrollo del proceso, por consiguiente a fin de establecer una mejor comprensión de este efecto en diferentes tejidos vegetales se toman en cuenta las características morfológicas y propiedades físicas, tales como el tamaño celular, espesor de la pared, rigidez de la pared celular, contracción de la pared celular, presión de turgencia, dimensiones de la capa de pectina y su rigidez.

2.7 Propiedades termofísicas en frutas y vegetales

Las propiedades térmicas en los alimentos se pueden definir, como aquellas propiedades que controlan la transferencia de energía en un alimento específico. Estas propiedades se clasifican usualmente en propiedades termodinámicas y propiedades de transporte (Lozano, 2006). Al considerar el calentamiento o enfriamiento de alimentos, algunas otras propiedades físicas deben ser consideradas por su relación intrínseca con las propiedades térmicas que se mencionan, como la densidad y viscosidad. Por lo tanto, existe un grupo de propiedades conocidas como propiedades termofísicas, las cuales son una herramienta poderosa para el diseño y predicción en las operaciones de transferencia de calor durante el manejo y procesamiento de alimentos.

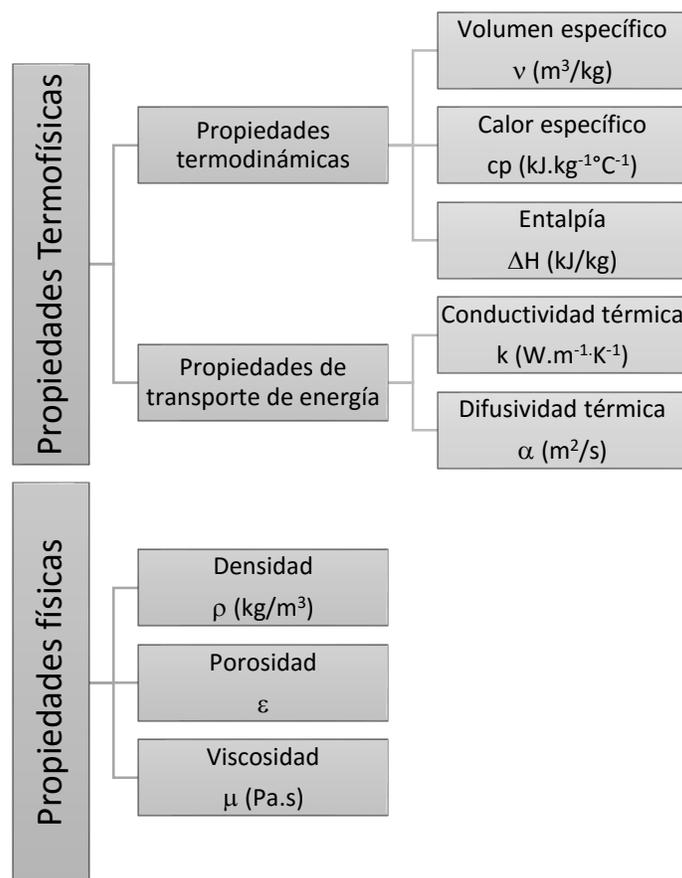


Figura 14. Propiedades termofísicas asociadas al procesamiento de frutas y vegetales (Lozano, 2006)

Las propiedades termofísicas de cualquier material controlan el transporte de energía térmica y/o el almacenamiento dentro de ella, así como las transformaciones experimentadas por el material bajo la acción del calor. Las frutas y vegetales no son una excepción; ya que son dependientes de la temperatura, la composición química y la estructura física; puesto que son materiales complejos y, generalmente estos valores se dan como valores promedio o efectivos. Y representan ciertos niveles de complejidad, el primero; microscópicamente las frutas pueden parecer como una sola fase continua y homogénea, sin embargo, están compuestas de diferentes componentes químicos incluyendo proteínas, carbohidratos, grasas, fibra, agua y otros componentes menores. En segundo término, pueden considerarse como una matriz sólida y una fase dispersa de aire y agua. Esta descripción corresponde a materiales porosos y debe considerarse la fracción volumétrica y la distribución espacial de cada fase. Y deben estar en función de la temperatura a través de la dependencia de sus componentes, porosidad y contenido de humedad.

2.7.1 Calor específico

El calor específico es la cantidad de calor requerida para elevar la temperatura de una unidad de masa un grado centígrado a una temperatura dada. En sólidos y líquidos depende de la temperatura pero no es sensible a la presión para fines prácticos, es común utilizar el calor específico a presión constante, el cual termodinámicamente representa el cambio de entalpía para un cambio dado en la temperatura cuando ocurre a presión constante. Se han obtenido aproximaciones para predecir el calor específico en términos de calores específicos parciales de sus componentes individuales, donde existe una relación lineal con la concentración de sus componentes aplicados en alimentos como el propuesto por Choi y Okos en (1983) citado por (Lozano, 2006). Respecto al calor específico en papa se encontró que éste varía linealmente con la temperatura y cuadráticamente con el contenido de humedad de acuerdo al modelo de Wang y Brennan (1993), quien desarrolló un modelo empírico para describir los efectos de la temperatura y contenido de humedad basándose en el modelo propuesto por Siebel (1892).

2.7.2 Conductividad térmica

La conductividad térmica es una propiedad intrínseca del material que mide la capacidad de conducción del calor y se puede definir como la razón de transferencia de calor a través de un espesor unitario del material por unidad de área por unidad de diferencia de temperatura.

La conductividad térmica en alimentos es una de las propiedades térmicas utilizadas para estimar la rapidez de la transferencia de calor conductivo en el procesamiento de alimentos tales como en el congelamiento, esterilización, secado, cocción y freído. Se sabe que el contenido de agua en los alimentos juega un papel importante en determinar la conductividad térmica mientras que la parte no acuosa es de menor importancia (Maroulis et al., 2002).

La conductividad térmica de los alimentos decrece con el decremento del contenido de agua y la formación de una fase de aire en los alimentos durante el procesamiento disminuye aún más la conductividad. Es común adoptar una relación lineal entre la conductividad térmica y el contenido de agua, sin embargo; esta correlación lineal solamente está limitada y los parámetros de correlación varían con el tipo de material alimenticio (Rahman and Chen, 1995). En el estudio de la conductividad térmica en papa, Wang y Brennan, (1992) concluyeron que el contenido de humedad tiene un gran efecto sobre la conductividad térmica, ya que existe un decremento con el decremento del contenido de humedad y en el caso de la papa es independiente de la temperatura dentro del rango de 40°C a 70°C.

2.7.3 Difusividad térmica

Otra propiedad de los materiales que aparece en el análisis de la conducción del calor en régimen transitorio es la difusividad térmica, la cual representa cuán rápido se difunde el calor por un material y se define como:

$$\alpha = \frac{\text{Calor conducido}}{\text{Calor almacenado}} = \frac{k}{\rho C_p} = \frac{m^2}{s} \quad \text{Ecuación 15}$$

Se puede observar que la conductividad térmica k representa lo bien que un material conduce el calor y la capacidad calorífica ρC_p representa cuánta energía almacena un material por

unidad de volumen. Por lo tanto, la difusividad térmica de un material se puede concebir como la razón entre el calor conducido a través del material y el calor almacenado por unidad de volumen. Es obvio que un material que tiene una alta conductividad térmica o una baja capacidad calorífica tiene una gran difusividad térmica. Entre mayor sea la difusividad térmica, más rápida es la propagación del calor por el medio. Un valor pequeño de la difusividad significa que, en su mayor parte, el calor es absorbido por el material y una pequeña cantidad de ese calor será conducida a través de él. Las frutas y vegetales frescos están constituidos en su mayor parte por agua y, por lo tanto, poseen las propiedades térmicas de ésta.

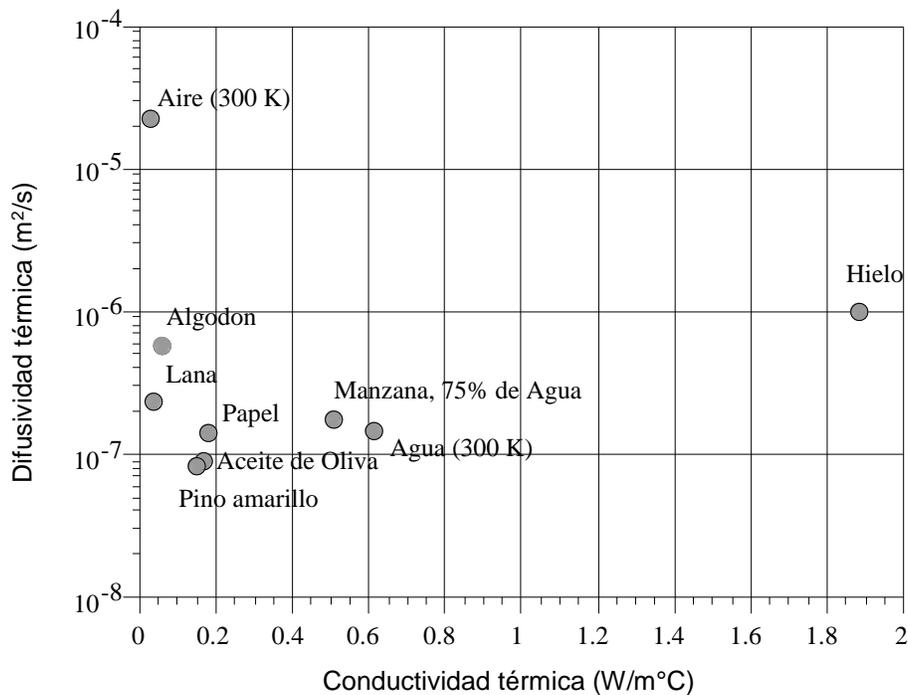


Figura 15. Conductividad y difusividad térmica de algunos biomateriales (Datta, 2002)

2.8 Modelado matemático fenomenológico

El modelado matemático es el uso de un lenguaje matemático para describir el comportamiento de un proceso o sistema, de esta manera un modelo puede definirse como una versión simplificada y selecta de un sistema real o fenómeno que toma lugar dentro de él, lo cual aproximadamente simula las relaciones de estímulo-respuesta del sistema que son de interés (Bear and Cheng, 2010). Dentro de este contexto, un modelo matemático en el proceso de secado de sólidos puede utilizarse para determinar los perfiles de varias variables que serían difíciles de medir ya sea por técnicas experimentales directas o indirectas y el punto clave en el desarrollo de un modelo es la identificación de varios mecanismos de transporte basado en teorías bien definidas (Wang et al., 2007).

2.8.1 Elementos básicos que integran un modelo

En este paso, el modelo conceptual se expresa en la forma de un modelo matemático a través de un modelo de medio continuo. En el modelo planteado por la mecánica de medio continuo, las magnitudes físicas como la energía o la masa pueden ser manejadas en el límite infinitesimal; por esta razón las relaciones básicas toman la forma de ecuaciones diferenciales. Por lo que en este tipo de modelo, una ecuación de balance diferencial parcial describe el comportamiento de cada punto dentro del dominio. En la física de una ecuación de continuidad se expresa una ley de conservación de una manera matemática, ya sea en forma integral como diferencial. el cual está formado por los siguientes elementos:

- **La dimensionalidad** (una, dos o tres dimensiones).
- **Definición de la geometría** de las superficies que delimitan el dominio.
- **El comportamiento del sistema**, en estado estacionario o dependiente del tiempo.
- **Ecuaciones de conservación**, que expresan los balances de las cantidades extensivas relevantes; tales como energía, masa y cantidad de movimiento.
- **Ecuaciones constitutivas**, que caracterizan las propiedades del material que trata de modelarse, como una relación entre las variables termodinámicas o mecánicas de un sistema físico y matemáticamente el propósito de estas ecuaciones es establecer

conexiones entre los campos cinemático, térmico y mecánico. Las cuales se requieren durante la solución de las ecuaciones diferenciales que describen el modelo.

- **Condiciones iniciales**, que describen el estado conocido del sistema en un momento inicial.
- **Condiciones frontera**, las cuales describen la interacción del dominio con su entorno (es decir, fuera del dominio delimitado) a través de sus fronteras comunes. Tres tipos de condiciones frontera comúnmente se encuentran en la transferencia de calor, la primera condición corresponde a una situación para la cual la superficie se mantiene en una temperatura fija, condición tipo Dirichlet o de primer clase, la segunda condición corresponde a la existencia de un flujo de calor constante o fijo en la superficie, el cual está relacionado al gradiente de temperatura en la superficie, un caso especial de esta condición corresponde a un estado de aislamiento o superficie adiabática en el cual $-k \frac{\partial T}{\partial x} = 0$. La condición frontera de tercer tipo o condición tipo Robinson, corresponde a la existencia de calentamiento por convección (o enfriamiento) en la superficie y se obtiene a partir del balance de energía de superficie.



Figura 16. Elementos que integran un modelo del medio continuo (Bear and Cheng, 2010)

2.9 La adimensionalización como técnica de solución

Los números adimensionales son expresiones algebraicas, es decir, fracciones donde tanto el numerador y el denominador son potencias de cantidades físicas con la dimensión física total igual a la unidad (Ruzicka, 2008). Estos surgen como productos o cocientes de cantidades que sí tienen unidades de tal forma que todas éstas se simplifican. Dependiendo de su valor estos números tienen un significado físico que caracteriza unas determinadas propiedades para algunos sistemas. Y son útiles por las siguientes razones:

- a. Reducen el número de variables necesitadas para la descripción del problema.
- b. De este modo, se pueden utilizar para reducir la cantidad de datos experimentales y correlaciones hechas, así como reducir la cantidad de experimentos computacionales o numéricos a realizar
- c. Simplifican las ecuaciones de balance, tanto al hacerlas sin dimensión como por reducir grandes términos.
- d. Organizan y muestran los resultados en forma más compacta y ordenada, ya que se consiguen expresiones simplificadas donde varios parámetros de la expresión original se agrupan en términos adimensionales.
- e. Cuando se forman adecuadamente, tienen una interpretación física clara y por lo tanto contribuyen a la comprensión física del fenómeno en estudio. Además, la elección de las escalas pertinentes, indican los procesos dominantes.

Los mecanismos de transferencia de masa y calor pueden deducirse directamente de las ecuaciones diferenciales de transferencia si se vuelven a escribir en términos de variables adimensionales. Esta es una práctica común en ingeniería, por tanto se han derivado grupos y números adimensionales como Reynolds, Nusselt, Biot, Prandtl, Schmidt, Sherwood y otros (Pavón-Melendez et al., 2002).

2.10 Teorema fundamental del modelo

Teorema del Transporte de Reynolds

Sea A una cierta propiedad genérica (escalar, vectorial o tensorial) de un medio continuo, y sea $\Psi(x,t)$ la cantidad de esta propiedad A por unidad de masa. Por consiguiente, $\rho\Psi(x,t)$ es la cantidad de la propiedad por unidad de volumen.

Se considera un volumen material arbitrario de medio continuo que en el instante t ocupa el espacio un volumen $V=V_t$, la cantidad de la propiedad genérica A en el volumen material V_t en el instante t será:

$$Q(t) = \int_{V_t} \rho\Psi dV \quad \text{Ecuación 16}$$

La derivada material en el tiempo de una integral se define de forma que mida la velocidad de cambio de la cantidad total que se mueva a través del sistema másico. La variación a lo largo del tiempo del contenido de la propiedad A en el volumen material V_t vendrá dada por la derivada temporal de Q (t).

$$Q'(t) = \frac{d}{dt} \int_{V_t} \rho\Psi dV = \int_V \left[\frac{d(\rho\Psi)}{dt} + \rho\Psi\nabla \cdot v \right] dV \quad \text{Ecuación 17}$$

Por lo que:

$$\frac{d}{dt} \int_{V_t=V} \rho\Psi = \int_V \left[\rho \frac{d\Psi}{dt} + \Psi \frac{d\rho}{dt} + \rho\Psi\nabla \cdot v \right] dV = \int_V \left[\rho \frac{d\Psi}{dt} + \Psi \left(\frac{d\rho}{dt} + \rho\nabla \cdot v \right) \right] dV$$

=0

$$\text{Ecuación 18}$$

$$\frac{d}{dt} \int_{V_t=V} \rho\Psi dV = \int_V \rho \frac{d\Psi}{dt} dV \quad \text{Ecuación 19}$$

Consideremos el volumen arbitrario V, fijo en el espacio. La cantidad de la propiedad A que atraviesa este volumen de control será:

$$Q(t) = \int_V \rho \Psi dV \quad \text{Ecuación 20}$$

La variación de la cantidad de la propiedad A en el volumen material V_t que en cada instante coincide con el instante t con el volumen de control $V(V_t=V)$, vendrá dada por la derivada material es:

$$Q'(t) = \frac{d}{dt} \int_{V_t=V} \rho \Psi dV = \int_V \frac{\partial(\rho \Psi)}{\partial t} + \int_V \nabla \cdot (\rho \Psi v) dV \quad \text{Ecuación 21}$$

Utilizando la ecuación 19 y el teorema de la divergencia:

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} \int_{V_t=V} \rho \Psi dV &= \int_V \rho \frac{d\Psi}{dt} dV \\ &= \int_V \frac{d(\rho \Psi)}{dt} + \int_V \nabla \cdot (\rho \Psi v) dV = \int_V \frac{\partial(\rho \Psi)}{\partial t} + \int_{\partial V} \rho \Psi v \cdot n \cdot dV \end{aligned}$$

$$\text{Ecuación 22}$$

Que puede ser ordenada como:

$$\frac{d}{dt} \int_{V_m(t)} \Psi(x, t) dV = \int_{V_m(t)} \frac{\partial \Psi}{\partial t} dV + \int_{S_m(t)} \Psi(v \cdot n) dS$$

$$\text{Ecuación 23} \quad \text{Teorema del Transporte de Reynolds}$$

Tasa de cambio de Ψ dentro del sistema que se mueve	=	Tasa de cambio de Ψ dentro del volumen de control	+	Flux transportado a través de la superficie de control
--	---	--	---	--

$(v \cdot n)$ es el término utilizado para agrupar los términos de entrada y salida

CAPÍTULO III MATERIALES Y MÉTODOS

Las pruebas experimentales para el presente trabajo se desarrollaron en el laboratorio de Tecnología Agroalimentaria del IPN-CIIDIR Unidad Oaxaca, en el cual se encuentra el equipo a utilizar para la obtención de las cinéticas de secado y preparación de las muestras.

3.1 Material

El material que se utilizó fue papa (*Solanum tuberosum*) variedad Alpha, en estado fresco, las cuales se compraron en el mercado local; con un mismo proveedor para controlar que fueran del mismo lugar de procedencia (provenientes del estado de Sinaloa), mismo estado de madurez y tener mayor homogeneidad entre estas. Pudiendo ser almacenadas por un corto periodo de tiempo no mayor a dos días a una temperatura de 10-16°C (McGregor, 1989), para mantener su frescura y alentar el proceso de maduración.

3.1.1 Preparación de las muestras

Se lavaron y pelaron las muestras con el fin de eliminar la cáscara para posteriormente obtener rodajas de 5.4 cm de diámetro y 1.5 cm de altura, utilizando un cortador cilíndrico. Se optó por esta geometría en el material, debido a que se observó que las muestras deforman de una manera más uniforme y proporcional

3.1.2 Escaldado por inmersión en agua

Las muestras fueron sometidas a un tratamiento de escaldado en agua a 70°C por un periodo de un minuto (Leeratanarak et al., 2006), para la inactivación de enzimas que actúan en el oscurecimiento de los carbohidratos tales como: Polifenoloxidasas y peroxidasas. Sin embargo otros autores sugieren que este tipo de tratamiento causa un cierto ablandamiento en el material lo que provoca una mayor eliminación de humedad (Senadeera et al., 2005). De

acuerdo con Leeratanarak (2006) cuando el tejido es escaldado las células pueden llegar a ser más permeables a la humedad. Sin embargo, el exceso de tiempo de escalde puede causar un descenso en la rapidez de la remoción de humedad; esto podría ser debido al efecto de la gelatinización del almidón, cambios estructurales y absorción del contenido de agua durante el escalde. Por lo que niveles altos de gelatinización pueden afectar la estructura celular e incrementar la resistencia interna al movimiento de agua, lo cual resulta en una menor difusividad.

3.1.3 Obtención inicial del peso y contenido de humedad

Posterior al tratamiento de escaldado, se eliminó el exceso de agua y se pesaron en una balanza electrónica marca Sartorius modelo ED 42025-CW con una capacidad de 4200 g de carga y sensibilidad de 0.01 g, para cuantificar el peso inicial de las muestras, previo a ser introducidas a la cámara de secado.

El contenido de humedad se define como la cantidad de agua presente en una muestra de material, expresado en función del peso seco de la muestra. En los materiales de origen biológico (tejidos animal y vegetal), el agua no está uniformemente distribuida debido a los complejos hidratados que se establecen con carbohidratos, lípidos, proteínas y otros constituyentes. En general el contenido de humedad de un alimento se refiere a toda el agua en forma global, para tal fin se utilizó el Método de la estufa, introduciendo las muestras durante 24 horas a 105°C (AOAC, 1980). Al inicio del proceso de secado para determinar el contenido inicial de humedad la muestra y al final, del proceso.

3.2 Diseño experimental

Para las condiciones de secado, se utilizó un diseño de un solo factor; la temperatura con tres niveles; 40, 50 y 60°C la velocidad del aire se mantuvo constante a 1.5 m/s, así como la humedad relativa de la cámara de secado a un valor del 25%, cada experimento se repetirá por duplicado para establecer un grado de confianza; generándose un total de 6 experimentos.

Tabla 2. Factores y niveles de estudio

Factor 1: Temperatura	Niveles
T1	40°C
T2	50°C
T3	60°C

Tabla 3. Tratamientos y factor temperatura

Tratamientos	Factor Temperatura	
1	T1	40°C
2	T2	50°C
3	T3	60°C
Repeticiones	2	
Tratamientos	3	
Total de experimentos	6	

Siendo las variables respuesta a obtener: los perfiles de contenido de humedad y la evolución de la temperatura en las muestras.

3.3 Descripción del equipo

3.3.1 Secador Convectivo tipo Túnel

Se utilizó un secador por convección forzada, tipo túnel con flujo longitudinal, el cual calienta el aire mediante resistencias eléctricas conectadas en paralelo de 20 Ω cada una manteniéndose a una temperatura constante mediante un control PID (proporcional integral diferencial), y la velocidad de flujo de aire se regula con un variador de frecuencia conectado al motor de un ventilador centrífugo marca Armee Chicago tamaño 12 ¼ con motor de ½ Hp.

El túnel cuenta con una computadora personal que contiene un controlador automático programable National Instrument® con el que se realiza y programa el control del proceso.



Figura 17. Túnel de secado por convección forzada

3.3.2 Humidificador de la cámara del secador

Para proporcionar una humedad relativa del 25% en el interior de la cámara de secado, se realizó la humidificación del aire, conectando un dispersor de vapor a uno de los ductos del secador; utilizando para ello un generador de vapor marca Anguinetti SRL, modelo TV/G2F con una capacidad para 5 L.

3.3.3 Celda de carga del Túnel y colocación de las muestras

Para el monitoreo de la pérdida de peso, la cámara de secado utiliza una balanza electrónica SHS Super Hybrid Sensor modelo GF6100 con una carga máxima de 6100 g y una sensibilidad de 0.01 g, conectada a una computadora programada para registrar los pesos de las muestras por un periodo de cada minuto mediante un sistema de adquisición FieldPoint®. Dicha balanza está unida a una jaula o celda de carga, dentro de la cual se colocaron las muestras de papa.



Figura 18. Cámara de secado, donde fueron colocadas las muestras

Las muestras se colocaron distribuidas espacialmente en una sola charola central, la cual contaba con una malla de plástico con perforaciones cuya finalidad fue de evitar el contacto directo de las muestras con el metal de la charola, y evitar la transferencia de calor por conducción hacia las caras inferiores de éstas.

3.3.4 Distribución espacial de la temperatura

Para el análisis y monitoreo de la distribución espacial de la temperatura en las muestras, se utilizaron tres termopares tipo J insertados en tres puntos de la muestra en estudio, marca VAISALA, Veriteq con un rango de -130°C a $+90^{\circ}\text{C}$ y con una precisión de $\pm 0.28^{\circ}\text{C}$ unidos a un logger registrador de datos. Los termopares se insertaron en dirección radial dentro de la muestra, equidistantes uno del otro en tres posiciones fijas con una misma profundidad, dos en el interior y el tercero en el límite superior de la superficie de la muestra.



Figura 19. Termopares insertados en 3 puntos de la muestra

3.3.5 Humedad relativa del aire

Para medir la humedad relativa del aire en el interior de la cámara y monitorear que esta sea constante a un valor del 25%, se utilizó un termo-higrómetro BK Datalogger Humidity Temperature meter que tiene un rango de 0-100% y una precisión de $\pm 2.5\%$ en humedad relativa. El cual cuenta con una probeta que contiene el sensor de humedad y temperatura; que fue insertado por un orificio en la parte superior de la cámara. Los datos se almacenaron en el Datalogger o se pueden ver directamente en la computadora a través del software del equipo.

CAPÍTULO IV DESARROLLO DEL MODELO

4.1 Formulación matemática

Las consideraciones teóricas para el desarrollo del modelo en una muestra con un espesor $2L$, se resumen a continuación:

1. El encogimiento se da principalmente en un eje, cuyo espesor del centro hacia la superficie de la muestra es L .
2. La transferencia por radiación es despreciable.
3. La humedad al inicio del proceso está distribuida de manera uniforme en toda la muestra.
4. El coeficiente de difusión es variable, y es función del contenido de humedad y de temperatura.
5. Las propiedades termofísicas son funciones del contenido de humedad y temperatura.
6. La densidad de la fase fluida es constante.
7. La densidad de la fase sólida es constante.

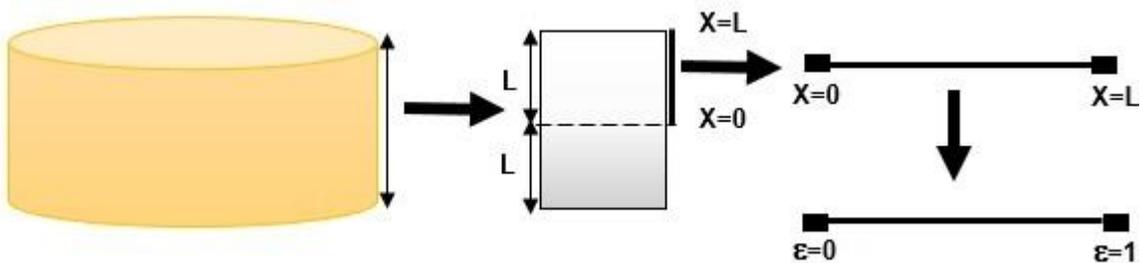


Figura 20. Muestra de espesor $2L$, geometría 1D y fronteras adimensionales

4.2 Ecuaciones de Conservación

4.2.1 Ecuación de conservación de masa

Suponiendo que el transporte de masa ocurre sólo por difusión, la ley de Fick puede aplicarse para representar el flux líquido hacia la superficie del material en un espesor x e incluyendo el término fuente representado por un coeficiente de contracción para definir la ecuación de transporte de masa tenemos:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{v}) = 0 \quad \text{Ecuación 24}$$

$$\rho_s \frac{\partial M}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(D \rho_s \frac{\partial M}{\partial x} \right) + \rho_s U \frac{\partial M}{\partial x} \quad \text{Ecuación 25}$$

En la ecuación dos se puede apreciar el término acumulativo, la entrada menos la salida de material y el término fuente que está representado por:

$$\rho_s U \frac{\partial M}{\partial x} = \text{coeficiente de contracción (cambio de masa respecto al espacio "x")}$$

Simplificando la expresión tenemos:

$$\frac{\partial M}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(D \frac{\partial M}{\partial x} \right) + U \frac{\partial M}{\partial x} \quad \text{Ecuación 26}$$

ε representa la variable adimensional en el espacio mediante la relación

$$\varepsilon = \frac{x}{L(t)}$$

Cuya condición es: $0 < \varepsilon < 1$, puesto que al inicio del proceso, es decir; al tiempo 0, x será igual a $L(t)$ por tanto, el valor máximo para ε será de 1.

Sustituyendo la variable x en la ecuación 26 nos queda:

$$\frac{\partial M}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial(\varepsilon.L)} \left[D \frac{\partial M}{\partial(\varepsilon.L)} \right] + U \frac{\partial M}{\partial(\varepsilon.L)} \quad \text{Ecuación 27}$$

Sustituyendo $U = \frac{dx}{dt}$ variación de x respecto al tiempo y simplificando tenemos:

$$\frac{\partial M}{\partial t} = \frac{1}{L^2} \frac{\partial}{\partial \varepsilon} \left[D \frac{\partial M}{\partial \varepsilon} \right] + \frac{1}{L} \frac{d(\varepsilon.L)}{dt} \frac{\partial M}{\partial \varepsilon} \quad \text{Ecuación 28}$$

$$\frac{\partial M}{\partial t} = \frac{1}{L^2} \frac{\partial}{\partial \varepsilon} \left[D \frac{\partial M}{\partial \varepsilon} \right] + \frac{\varepsilon}{L(t)} \frac{dL}{dt} \frac{\partial M}{\partial \varepsilon} \quad \text{Ecuación 29}$$

4.2.2 Ecuación de conservación de energía

Tomando en cuenta que en el interior de material la transferencia de calor sólo se lleva a cabo por conducción se utiliza la expresión de Fourier.

$$\rho_s C_p \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left[k \frac{\partial T}{\partial x} \right] + \rho_s C_p U \frac{\partial T}{\partial x} \quad \text{Ecuación 30}$$

Sustituyendo “x” en la ecuación 30 tenemos:

$$x = \varepsilon.L(t)$$

$$\rho_s C_p \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial(L.\varepsilon)} \left[k \frac{\partial T}{\partial(L.\varepsilon)} \right] + \rho_s C_p \frac{\partial(L.\varepsilon)}{\partial t} \frac{\partial T}{\partial(L.\varepsilon)} \quad \text{Ecuación 31}$$

Simplificando la expresión para “L” y $\rho_s C_p$ tenemos:

$$\rho_s C_p \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{1}{L(t)^2} \frac{\partial}{\partial \varepsilon} \left[k \frac{\partial T}{\partial \varepsilon} \right] + \rho_s C_p \frac{\varepsilon}{L(t)} \frac{\partial L(t)}{\partial t} \frac{\partial T}{\partial \varepsilon} \quad \text{Ecuación 32}$$

$$\alpha = \frac{k}{\rho_s C_p}$$

Sustituyendo α (difusividad térmica) en la ecuación 32 finalmente tenemos, la ecuación que representa el balance de energía

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{1}{L^2(t)} \frac{\partial}{\partial \varepsilon} \left(\alpha \frac{\partial T}{\partial \varepsilon} \right) + \frac{\varepsilon}{L(t)} \frac{dL}{dt} \frac{\partial T}{\partial \varepsilon} \quad \text{Ecuación 33}$$

4.3 Condiciones iniciales

Las condiciones iniciales describen el estado conocido del sistema en un momento inicial, y estableciendo éstas para el tiempo igual con cero, tenemos:

$$M = M_0; T = T_0; L = L_0;$$

4.4 Condiciones frontera

Para la condición frontera en $x=0$ se asume que ninguna masa o calor se transfiere a través de esa superficie del material de secado, por lo tanto en el centro no existen entradas ni salidas de calor o masa.

Tabla 4. Condiciones frontera de masa y energía en $x=0$

Frontera 1 en $x=0$	Para masa	Para energía
Condición tipo Neumann	$\vec{n} \cdot \frac{\partial M}{\partial x} = 0$	$\vec{n} \cdot \frac{\partial T}{\partial x} = 0$

La condición frontera 2 en $x=L$, está representada por la expresión matemática del hecho de que el flux líquido a la superficie debe ser igual al flux de vapor que se va de la superficie al medio. La humedad del material, se transporta en la superficie por convección que se explica mediante el coeficiente de transferencia de masa (h_m), análogo al de calor.

Tabla 5. Condiciones frontera de masa y energía en x=L

Frontera 2 en x=L	Para masa	Para energía
Condición tipo Robinson	$\vec{n} \cdot \left(D\rho_s \frac{\partial M}{\partial x} \right) = h_m (C_s - C_a)$	$\vec{n} \cdot \left(-k \frac{\partial T}{\partial x} \right) = h_c (T_a - T_s) + \lambda D\rho_s \frac{\partial M}{\partial x}$

En la superficie del material el calor se transfiere por convección, que se explica mediante el coeficiente de transferencia convectivo (Karunasena et al.) por la diferencia de temperaturas, entre la superficie y la temperatura del aire, además de lo que se transfiere en la superficie por evaporación. Donde; $\lambda D\rho_s(\partial M/\partial x)$ representa la cantidad de calor requerido para evaporar el flux líquido de la superficie.

4.5 Cambio de Volumen en el proceso

La expresión que relaciona el cambio de volumen debido a la contracción por una pérdida global de humedad está dada por el Teorema de Transporte de Reynolds (RTT).

El RTT es una expresión matemática que describe el transporte de una propiedad desde una perspectiva lagrangiana y euleriana. Y se refiere a la razón de cambio de cualquier propiedad extensiva, (en este caso el volumen) dentro de un sistema que puede cambiar de forma y tamaño; y que se mueve, el cual es igual a la tasa de cambio de esa propiedad dentro de un volumen de control fijo más el flux transportado a través de la superficie de control; es decir, el flux de masa líquida que abandona o cruza el dominio.

Para encontrar la variable L se relaciona el cambio de volumen debido a la contracción de una pérdida global de humedad.

Se relaciona la siguiente formula:

$$V_m(t) = A \cdot L(t) = \int_{V_m} dv \quad \text{Ecuación 34}$$

Considerando una pequeña región de espesor que varía respecto al tiempo en $L=L(t)$ está dada por una integral de volumen donde:

$V_m(t)$ = región del material

Y si se quiere encontrar un cambio de volumen respecto al tiempo tenemos:

$$\frac{\partial V(t)}{\partial t} = \frac{\partial [A \cdot L(t)]}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial t} \int dv \quad \text{Ecuación 35}$$

Asumiendo que el área de contacto es constante, tenemos que $A=1$, y esta ecuación representará la contracción del dominio.

Aplicando la ecuación del teorema de transporte de Reynolds:

$$\frac{d}{dt} \int_{V_{m(t)}} \Psi(x, t) dV = \int_{V_{m(t)}} \frac{d\Psi}{dt} dV + \int_{S_{m(t)}} \Psi(vn) dS$$

Tasa de tiempo de cambio de Ψ dentro del sistema = Tasa de cambio de Ψ dentro del volumen de control + Flux transportado a través de la superficie de control

Donde $\Psi(x,t)$ es una propiedad extensiva del material y podemos considerarla con el valor de 1, puesto que solamente queremos hallar el volumen (la integral de volumen); por tanto:

$$\frac{d}{dt} \int dv = \int_{sm} V \cdot n ds \quad \text{Ecuación 36}$$

Donde; V_n = velocidad de salida del flujo de la superficie con dirección a la normal, sustituyendo V_n tenemos:

$$V \cdot n = \frac{\rho_s D \frac{\partial M}{\partial x}}{\rho_w} \quad \text{Ecuación 37}$$

$$\frac{dL}{dt} = \int_0^L \frac{\rho_s}{\rho_w} D \frac{\partial M}{\partial x} dS \quad \text{Ecuación 38}$$

$$\frac{d}{dt} \int dV = \frac{\rho_s}{\rho_w} D \left. \frac{\partial M}{\partial x} \right|_{x=L}^{x=0} \quad \text{Ecuación 39}$$

$$\frac{dL}{dt} = \left[\frac{\rho_s}{\rho_w} \frac{D}{L} \frac{\partial M}{\partial \varepsilon} \right] \quad \text{Ecuación 40}$$

4.6 Ecuaciones Constitutivas

Las propiedades térmicas son descritas como funciones del contenido de humedad y temperatura; así como algunas otras relaciones que fueron encontradas en la literatura.

Tabla 6. Ecuaciones constitutivas o parámetros de entrada

Parámetro	Expresión	Referencia
Conductividad térmica del material (W/m·K)	$k = 0.276 + 0.293 \log(M)$	Wang & Brennan, 1992
Calor latente de vaporización (kJ/kg)	$\lambda = 2501.3 - 2.301T - 0.00142T^2$	Srikiatden & Roberts, 2008
Capacidad calorífica del material (Cal/g K)	$C_p = 0.008W + 0.20$	Siebel, 1892
Coefficiente de difusividad efectiva (m ² /s)	$D_{eff} = a \exp\left(\frac{b}{T}\right) \exp\left(\frac{c}{M}\right)$	Plawsky, 2014
Coefficiente de transferencia de calor (W/m ² K)	$h_c = (Nu * k_{air}) / L_c$ $Nu = 0.664 Re^{1/2} Pr^{1/3} \quad Pr < 1$ estimado entre (48.8 – 59.3)	Afaghi et al., 2013 (Flujo laminar)
Coefficiente de transferencia de masa (m/s)	$h_m = \frac{Sh \cdot D_{AB}}{L_c}$ $Sh = 0.664 Re^{1/2} Sc^{1/3} \quad 0.6 \leq Sc \leq 50$ estimado entre (0.11 – 0.124)	Analogía números adimensionales
Presión de vapor saturado (Pa)	$P_{vsat} = 100 \exp\left[20.9006 - \frac{5204.9}{T_a}\right]$	Turner, 1996

Concentración de vapor en la superficie (kg/m ³)	$C = 2.166 \times 10^{-3} \left(\frac{P_{vsat}}{T_{sup}} \right)$	Wang & Brennan, 1995
Densidad del agua (kg/m ³)	$\rho_w = 1000$	Constante
Densidad del sólido seco (kg/m ³)	1071	Yang et al., 2001
Longitud inicial de la muestra (m)	0.0075	Experimental
Contenido de humedad inicial (base seca)	4.262 (40°C), 4.348 (50°C), 4.129 (60°C)	Experimental

Coefficiente de transferencia de masa

El coeficiente de transferencia de masa h_m (m/s) es calculado para la condición frontera 2; en la interfase del sólido-gas; mediante la semejanza de los números adimensionales; donde el número de Prandtl es reemplazado por el número de Schmidt (Sc) y el número de Nusselt por el número de Sherwood (Sh).

$$Sc = \frac{\nu}{D_{AB}} \quad \text{Ecuación 41}$$

$$Sh = \frac{h_m L_c}{D_{AB}} \quad \text{Ecuación 42}$$

Donde:

$$h_m = \frac{Sh \cdot D_{AB}}{L_c}$$

D_{AB} = Coeficiente de difusión del vapor de agua en el aire (m²/s)

ν = Viscosidad cinemática del aire a una temperatura dada (m²/s)

Para determinar el número de Sherwood se utilizó la siguiente ecuación para flujo por convección forzada y para una geometría de placa plana con flujo laminar

$$Sh = 0.664 Re^{1/2} Sc^{1/3} \quad \text{Ecuación 43}$$

$$0.6 \leq Sc \leq 50$$

Para determinar el Coeficiente de difusión del vapor de agua en el aire a diferentes temperaturas se utilizó la correlación empírica propuesta por Marrero y Mason (1972), citados por (Yunus, 2003)

$$D_{agua-aire} = 1.87 \times 10^{-10} \frac{T^{2.072}}{P} \quad \text{Ecuación 44}$$

$$280K < T < 450K$$

Los valores obtenidos a partir de la correlación de las ecuaciones anteriormente señaladas fueron estimados entre (0.11 – 0.124)

4.7 Adimensionalización de las ecuaciones de balance y condiciones frontera

La siguiente tabla muestra las variables adimensionales, las cuales se sustituyen en cada una de las ecuaciones de balance y frontera, para sí obtener las ecuaciones adimensionales. Los procedimientos matemáticos se muestran en las siguientes hojas.

Tabla 7. Magnitudes características utilizadas para definir las variables adimensionales

Variables primarias		
Contenido de humedad	Temperatura	Posición de interfase
$\bar{M} = \frac{M - M_e}{M_0 - M_e}$ $M = \bar{M}(M_0 - M_e) + M_e$	$\bar{T} = \frac{T - T_0}{T_a - T_0}$ $T = \bar{T}(T_a - T_0) + T_0$	$S = \frac{L}{L_0}$ $L = S \cdot L_0$
Eje adimensional		
$\varepsilon = \frac{x}{L}$	$\tau = \frac{D_0 t}{L_0^2}$	$t = \frac{\tau L_0^2}{D_0}$
Números Adimensionales		
$Bi_m = \frac{h_m L_0}{D_0}$	$Bi = \frac{h_c L_0}{k}$	$Le = \frac{\alpha}{D_0}$
Variables adimensionales	$\bar{\lambda} = \frac{\lambda(M_0 - M_e)}{C p_s (T_a - T_0)}$	$\alpha = \frac{k}{\rho_s C p_s}$

Adimensionalización de las ecuaciones de conservación

A) Ecuación de conservación de masa:

$$\frac{\partial M}{\partial t} = \frac{1}{L^2} \frac{\partial}{\partial \varepsilon} \left[D \frac{\partial M}{\partial \varepsilon} \right] + \frac{\varepsilon}{L(t)} \frac{dL}{dt} \frac{\partial M}{\partial \varepsilon} \quad \text{Ecuación 29}$$

Término 1
Término 2
Término 3

Se sustituyen las variables adimensionales primarias mostradas en la tabla 7, en la ecuación 29 que representa el balance de masa, la cual fue dividida en tres términos para poder realizar la sustitución como a continuación se muestra:

Para el término 1 de la ecuación 29, tenemos que:

$$\frac{\partial M}{\partial t} = \frac{\partial \bar{M}(M_0 - M_e) + M_e}{\partial \frac{\tau L_0^2}{D_0}} \quad \text{Ecuación 45}$$

Multiplicamos toda la ecuación 45, la cual representa el término 1 por $\frac{\frac{L_0^2}{D_0}}{(M_0 - M_e) + M_e}$

$$\frac{\partial \bar{M}(M_0 - M_e) + M_e}{\partial \frac{\tau L_0^2}{D_0}} \cdot \frac{\frac{L_0^2}{D_0}}{(M_0 - M_e) + M_e}$$

Simplificando términos nos queda:

$$\frac{\partial M}{\partial t} = \frac{\partial \bar{M}}{\partial \tau} \quad \text{Ecuación 46}$$

Sustituyendo las variables adimensionales primarias de la tabla 7, para el término 2 de la ecuación 29, tenemos que:

$$\frac{1}{L^2} \frac{\partial}{\partial \varepsilon} \left[D \frac{\partial M}{\partial \varepsilon} \right] = \frac{1}{(S \cdot L_0)^2} \frac{\partial}{\partial \varepsilon} \left[\frac{\bar{D} D_0 \partial \bar{M}(M_0 - M_e) + M_e}{\partial S L_0 \varepsilon} \right]$$

Ecuación 47

Multiplicando a la ecuación 47 por $\frac{L_0^2}{D_0(M_0 - M_e) + M_e}$ para simplificar términos, tenemos:

$$\frac{1}{(S \cdot L_0)^2} \frac{\partial}{\partial \varepsilon} \left[\frac{\bar{D} D_0 \partial \bar{M} (M_0 - M_e) + M_e}{\partial S L_0 \varepsilon} \right] \cdot \frac{L_0^2}{D_0 (M_0 - M_e) + M_e}$$

Reduciendo términos de la expresión anterior nos queda:

$$\frac{\partial}{\partial S^2 L_0^2 \varepsilon} \left[\frac{\bar{D} D_0 \partial \bar{M} (M_0 - M_e) + M_e}{\partial \varepsilon} \right] \frac{L_0^2}{D_0 (M_0 - M_e) + M_e}$$

$$\frac{1}{S^2} \frac{\partial}{\partial \varepsilon} \left[\bar{D} \frac{\partial \bar{M}}{\partial \varepsilon} \right]$$

$$\frac{1}{L^2} \frac{\partial}{\partial \varepsilon} \left[D \frac{\partial M}{\partial \varepsilon} \right] = \frac{\bar{D}}{S^2} \frac{\partial}{\partial \varepsilon} \left(\frac{\partial \bar{M}}{\partial \varepsilon} \right) \quad \text{Ecuación 48}$$

De la misma manera, sustituyendo las variables de la tabla 7, para el término 3 de la ecuación

29 y multiplicando por la expresión $\frac{L_0^2}{D_0(M_0 - M_e) + M_e}$ tenemos que:

$$\frac{\varepsilon}{L} \frac{dL}{dt} \frac{\partial M}{\partial \varepsilon} = \frac{dL \varepsilon}{dt} \frac{\partial M}{\partial \varepsilon L}$$

$$\frac{dS L_0 \varepsilon}{d \frac{\tau L_0^2}{D_0}} \frac{\partial \bar{M} (M_0 - M_e) + M_e}{\partial \varepsilon S L_0} \cdot \frac{L_0^2}{D_0 (M_0 - M_e) + M_e}$$

Simplificando términos nos queda:

$$\frac{dS \varepsilon}{d\tau} \frac{\partial \bar{M}}{\partial S \varepsilon} = \frac{dS \varepsilon}{d\tau S} \frac{\partial \bar{M}}{\partial \varepsilon}$$

$$\frac{\varepsilon}{L} \frac{dL}{dt} \frac{\partial M}{\partial \varepsilon} = \frac{\varepsilon}{S} \frac{dS}{d\tau} \frac{\partial \bar{M}}{\partial \varepsilon} \quad \text{Ecuación 49}$$

B) Ecuación de conservación de energía:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{1}{L^2(t)} \frac{\partial}{\partial \varepsilon} \left(\alpha \frac{\partial T}{\partial \varepsilon} \right) + \frac{\varepsilon}{L(t)} \frac{dL}{dt} \frac{\partial T}{\partial \varepsilon} \quad \text{Ecuación 33}$$

Sustituyendo las variables primarias adimensionales mostradas en la tabla 7 en la ecuación 33 que representa la ecuación de conservación de energía, tenemos que:

$$\frac{\partial [\bar{T}(T_a - T_0) + T_0]}{\partial \frac{\tau L_0^2}{D_0}} = \frac{\alpha}{[s(t) \cdot L_0]^2} \frac{\partial^2 [\bar{T}(T_a - T_0) + T_0]}{\partial \varepsilon^2} + \frac{\varepsilon}{s(t) L_0} \frac{d[s(t) \cdot L_0]}{d \left[\frac{\tau L_0^2}{D_0} \right]}$$

Se elimina T_0 y se acomodan términos

$$\frac{D_0(T_\infty - T_0)}{L_0^2} \frac{\partial \bar{T}}{\partial \tau} = \frac{\alpha (T_\infty - T_0)}{s(t)^2 L_0^2} \frac{\partial^2 \bar{T}}{\partial \varepsilon^2} + \frac{D_0 \varepsilon L_0 (T_\infty - T_0)}{L_0^2 s(t) L_0} \frac{ds(t)}{d\tau} \frac{\partial \bar{T}}{\partial \varepsilon}$$

Ecuación 50

Para simplificar la ecuación 50, se multiplica por L_0^2 y se divide también entre la expresión $(T_\infty - T_0)$, obteniéndose la ecuación 51

$$\frac{D_0 \partial \bar{T}}{\partial \tau} = \frac{\alpha}{s(t)^2} \frac{\partial^2 \bar{T}}{\partial \varepsilon^2} + \frac{D_0 \varepsilon}{s(t)} \frac{ds(t)}{d\tau} \frac{\partial \bar{T}}{\partial \varepsilon} \quad \text{Ecuación 51}$$

Dividimos a toda la ecuación 51 entre D_0 y sustituyendo el número de Le, tenemos:

$$\frac{\partial \bar{T}}{\partial \tau} = \frac{\alpha}{D_0 s(t)^2} \frac{\partial^2 \bar{T}}{\partial \varepsilon^2} + \frac{\varepsilon}{s(t)} \frac{ds(t)}{d\tau} \frac{\partial \bar{T}}{\partial \varepsilon}$$

$$Le = \frac{\alpha}{D}$$

$$\frac{\partial \bar{T}}{\partial \tau} = \frac{1}{s^2} Le \frac{\partial^2 \bar{T}}{\partial \varepsilon^2} + \varepsilon \frac{1}{s} \frac{ds}{d\tau} \frac{\partial \bar{T}}{\partial \varepsilon} \quad \text{Ecuación 52}$$

Ecuación que representa la contracción

$$\frac{dL}{dt} = \left[\frac{\rho_s D}{\rho_w L} \frac{\partial M}{\partial \varepsilon} \right] \quad \text{Ecuación 40}$$

Sustituyendo las variables primarias adimensionales (tabla 7) en la ecuación 40, tenemos:

$$\frac{dSL_0}{d\tau \frac{L_0}{D_0}} = \left[\frac{\rho_s \bar{D} D_0}{\rho_w SL_0} \frac{\partial \bar{M}(M_0 - M_e) + M_e}{\partial \varepsilon} \right] \quad \text{Ecuación 53}$$

Multiplicando a toda la ecuación 53 por $\frac{L_0}{D_0}$ nos queda:

$$\frac{dSL_0 D_0}{d\tau L_0^2} = \left[\frac{\rho_s \bar{D} D_0}{\rho_w SL_0} \frac{\partial \bar{M}(M_0 - M_e) + M_e}{\partial \varepsilon} \right] \left[\frac{L_0}{D_0} \right]$$

Reduciendo términos y simplificando tenemos:

$$\frac{dS}{d\tau} = \frac{\rho_s \bar{D}}{\rho_w S} \frac{\partial M((M_0 - M_e) + M_e)}{\partial \varepsilon}$$

$$\frac{dS}{d\tau} = \frac{\rho_s \bar{D}}{\rho_w S} \frac{\partial M(M_0 - M_e)}{\partial \varepsilon} + \frac{\partial M_e}{\partial \varepsilon}$$

$$\frac{dS}{d\tau} = \frac{\rho_s \bar{D}}{\rho_w S} \frac{\partial M(M_0 - M_e)}{\partial \varepsilon} + 0$$

Finalmente se obtiene la expresión que representa la contracción adimensional:

$$\frac{dS}{d\tau} = \frac{\bar{D} \rho_s (M_0 - M_e)}{S \rho_w} \frac{\partial \bar{M}}{\partial \varepsilon} \quad \text{Ecuación 54}$$

Adimensionalización de las condiciones iniciales y frontera

De la misma manera, al sustituir las variables primarias adimensionales mostradas en la tabla 7, en las ecuaciones frontera de masa y energía; se obtuvieron las ecuaciones adimensionales para las fronteras 1 y 2 respectivamente.

1. Transporte de energía

Frontera 1

$$\frac{\partial \bar{T}}{\partial \varepsilon} = 0 \quad \text{en } \varepsilon = 0 \quad \text{Ecuación 55}$$

Frontera 2

$$\frac{\partial \bar{T}}{\partial \varepsilon} = SBi(1 - T) - \frac{\bar{\lambda} \bar{D}}{Le} \frac{\rho_w}{\rho_s} \frac{\partial \bar{M}}{\partial \varepsilon} \quad \text{en } \varepsilon = 1 \quad \text{Ecuación 56}$$

2. Transporte de masa

Frontera 1

$$\frac{\partial \bar{M}}{\partial \varepsilon} = 0 \quad \text{en } \varepsilon = 0 \quad \text{Ecuación 57}$$

Frontera 2

$$\frac{\partial \bar{M}}{\partial \varepsilon} = \frac{S Bi_m C_a}{(M_0 - M_e) \rho_s} \left[\frac{C_s}{C_a} - 1 \right] \quad \text{en } \varepsilon = 1 \quad \text{Ecuación 58}$$

Las condiciones iniciales son:

$$\bar{M} = 0$$

$$\bar{T} = 0$$

$$S = 1 \quad \text{cuando } \tau = 0$$

De esta manera, las ecuaciones adimensionales que describen el mecanismo simultáneo de transporte y las ecuaciones frontera, se resumen en las siguientes tablas. La formulación general sigue la siguiente estructura, en donde épsilon representa al eje adimensional:

$$\frac{\partial U}{\partial \tau} + \frac{\partial J}{\partial \varepsilon} = q$$

$$0 \leq \varepsilon \leq 1$$

Tabla 8. Sistema de ecuaciones de conservación y encogimiento adimensionales

	U	J	Q
Conservación de masa	\bar{M}	$-\frac{\bar{D}}{S} \frac{\partial \bar{M}}{\partial \varepsilon}$	$\frac{\varepsilon}{S} \frac{dS}{d\tau} \frac{\partial \bar{M}}{\partial \varepsilon}$
Conservación de energía	\bar{T}	$-\frac{Le}{S^2} \frac{\partial \bar{T}}{\partial \varepsilon}$	$\frac{\varepsilon}{S} \frac{dS}{d\tau} \frac{\partial \bar{T}}{\partial \varepsilon}$
Encogimiento	S	0	$\frac{\bar{D}\rho_s(M_0 - M_e)}{\rho_w S} \frac{\partial \bar{M}}{\partial \varepsilon}$

Tabla 9. Ecuaciones frontera adimensionales

n.J=g J en	Frontera 1 en $\varepsilon=0$		Frontera 2 en $\varepsilon=1$	
	Masa	0		$\frac{SBi_m C_a}{(M_0 - M_e)\rho_s} \left[\frac{C_s}{C_a} - 1 \right]$
Energía	0		$SBi(1 - T) - \frac{\bar{\lambda}\bar{D}\rho_w}{Le\rho_s} \frac{\partial \bar{M}}{\partial \varepsilon}$	

CAPÍTULO V RESULTADOS Y DISCUSIONES

Las ecuaciones fueron implementadas en COMSOL Multiphysics 4.3b[®] utilizando el módulo general de ecuaciones diferenciales parciales para las ecuaciones de conservación de calor y masa; y una ecuación diferencial ordinaria que describe el encogimiento, las cuales se resolvieron utilizando un paso de tiempo de 60 segundos con una tolerancia relativa de 0.01, la tolerancia relativa necesita ser un escalar, ya que ésta permite controlar las incógnitas.

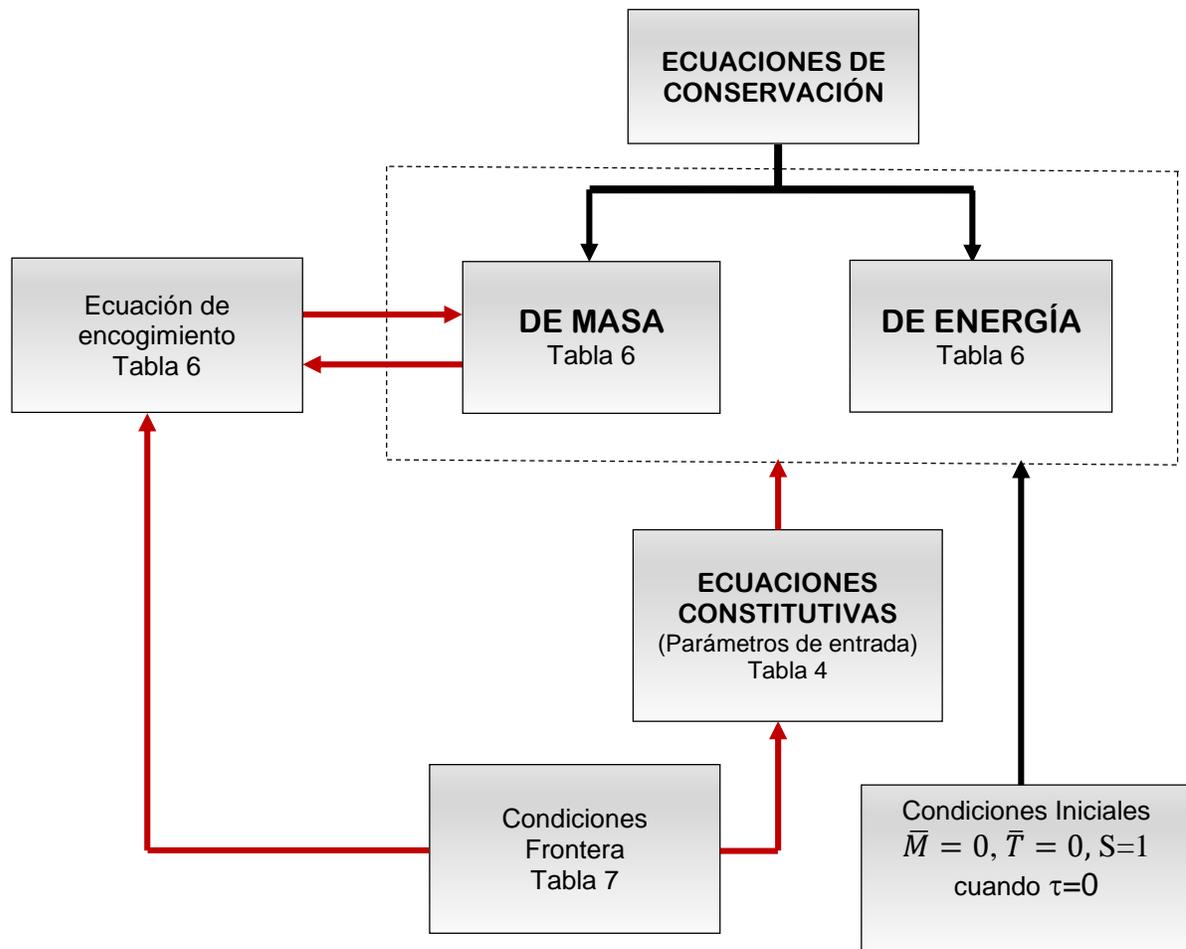


Figura 21. Descripción matemática del acoplamiento entre las ecuaciones del sistema

5.1 Magnitud del error en la predicción

Para poder conocer la magnitud del error de la predicción se utilizó el RMSD por sus siglas en inglés (Root mean square deviation) o raíz del error (desviación) cuadrático medio. El RMSD es una medida de las diferencias entre los valores predichos por un modelo o un estimador y los valores observados o reales. Es decir, representa la desviación estándar de la muestra de las diferencias entre los valores pronosticados y los valores observados. Los valores de estas diferencias individuales, llamados residuos, al final proporcionan un solo valor predictivo, cuyo valor nos da un indicador de la precisión del modelo. Los valores del RMSD calculado tendrán unidades de la variable que se trate (temperatura, contenido de humedad, etc). Un RMSD que se aproxima a cero, tiene una predicción más cerca al valor de los datos experimentales (McMinn, 2006).

La fórmula es:

$$RMSD = \left[\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (X_{exp,i} - X_{model,i})^2 \right]^{1/2}$$

Donde:

$X_{exp,i}$ = Valor i real o experimental

$X_{model,i}$ = Valor i predictivo dado por el modelo

n= Número total de datos o valores del sistema

5.2 Contenido de humedad y evolución de la temperatura

Las figuras 22 y 23, presentan las cinéticas de secado y la evolución de la temperatura en la superficie del material, a 40 y 50°C. Estas figuras representan los datos experimentales y los obtenidos por simulación numérica.

En la figura 22 se observa que el modelo es capaz de predecir correctamente la cinética de secado durante las primeras 6 horas, a partir de ese tiempo observamos una separación de la predicción numérica ponderada por un $RMSD=0.22$ que corresponde prácticamente al periodo de rapidez de secado decreciente. Inicialmente la muestra está saturada de agua en fase líquida y el calentamiento del material provoca una ligera disminución de la viscosidad de esta fase, como consecuencia el flux de humedad es intenso respecto a las etapas posteriores. Esto provoca que durante las primeras 6 horas de secado, la muestra pierda casi la mitad de su contenido de humedad (4.2 a 1.9 kg agua/kg sólido seco). El teorema considera que el volumen de la fase líquida que abandona el dominio corresponde a un cambio en la dimensión del sólido, lo cual es bien representado por la solución numérica. Sin embargo, durante el periodo de rapidez de secado decreciente, la migración de humedad corresponde principalmente a un flux de vapor de agua en un medio poroso que se ha retraído y cuya estructura ha sido modificada. Por consecuencia, el coeficiente de difusión de la fase gaseosa en un medio poroso deberá considerar la alteración de la microestructura.

Halder y colaboradores (2011) proponen dos tipos de ruta que sigue la migración de humedad en la papa: la primera ruta es conocida como transporte intracelular y se da por debajo de los 52°C (bajas temperaturas), la segunda es conocida como transporte extracelular, la cual ocurre a temperaturas superiores a 52°C (altas temperaturas), mecanismos que dependen de la preservación y/o rompimiento de las estructuras celulares del material. Ellos demuestran que el transporte de agua en tejido celular a baja temperatura es intracelular pues las membranas celulares permanecen intactas. Este hecho no ha sido considerado en nuestro planteamiento de modelado, por lo cual podemos esperar algunas desviaciones respecto de la realidad. Para valores menores de contenido de humedad las pérdidas de humedad se transportan en fase gaseosa, lo cual no está completamente considerado por el RTT. La teoría nos dice también que a medida que el tamaño de poro de un material disminuye, la selectividad es mayor, y por consiguiente el flux másico disminuye.

Nuestro modelo considera a la humedad como una sola especie que engloba a tres entidades: agua líquida, vapor de agua y agua ligada. Por otro lado, la difusión en sólidos porosos está muy relacionada con la porosidad y la ruta de difusión molecular incluyendo la tortuosidad (Lewicki, 2004, Datta, 2007), hecho que no ha sido considerado en el presente estudio.

Por lo anterior será necesario en un futuro considerar un acoplamiento de transferencia de masa para la fase gaseosa, considerando la isoterma de sorción del tubérculo.

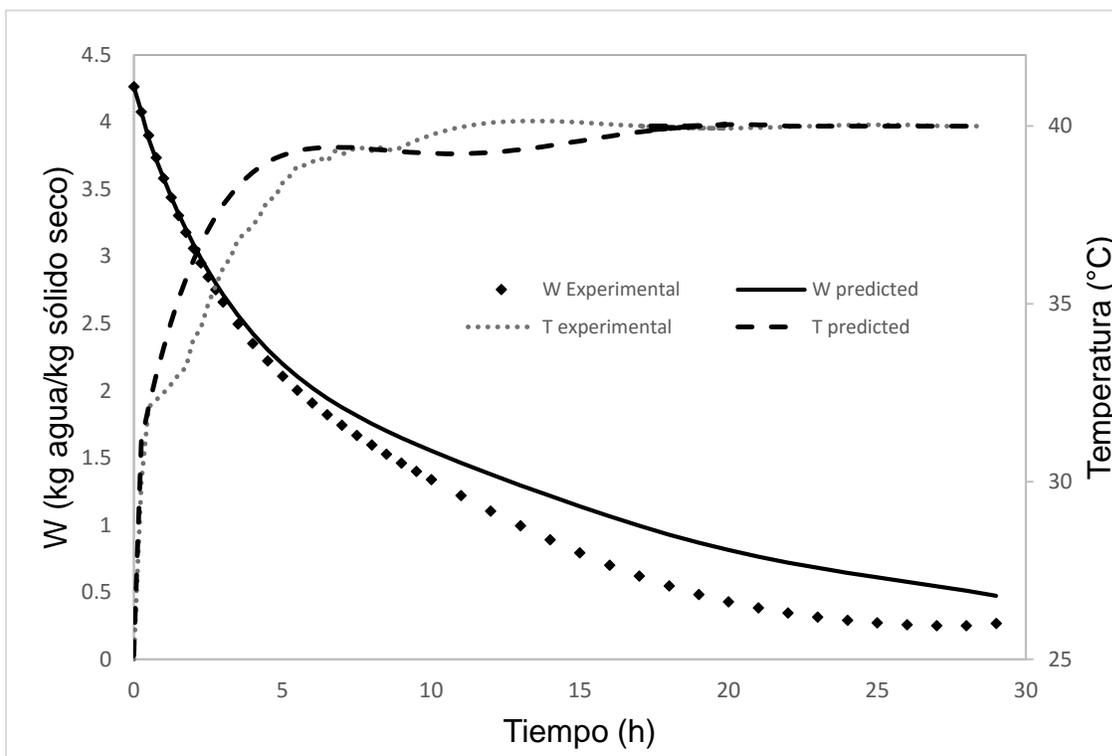


Figura 22. Cinéticas de contenido de humedad vs evolución de la temperatura superficial experimental y simulada a 40°C

Respecto a la evolución de la temperatura (figura 22), observamos durante las primeras 6 horas, un incremento de la temperatura de las muestras, seguida por un incremento más lento hasta alcanzar la temperatura de equilibrio. A medida que la cantidad de agua es evaporada de la superficie, la temperatura del sólido se incrementa. El modelo describe el proceso de calentamiento del material.

Las desviaciones pueden ser explicadas por las variaciones en las propiedades físicas del material (ecuaciones constitutivas), las cuales son función del contenido de humedad y la temperatura principalmente. Por otra parte, Rahman y Chen (1995) mencionan que la conductividad térmica en los alimentos decrece la pérdida del contenido de agua, y que la formación de bolsas de aire disminuye aún más la conductividad. En nuestros experimentos, observamos la formación de pequeñas bolsas de aire al interior del material. Estas bolsas de aire son originadas por la expansión de la fase gaseosa durante el secado, las cuales modifican la conductividad térmica del material. Asimismo, se observó un encostramiento (case-hardening) superficial del material, que altera la conducción del calor, fenómeno que no pudo ser considerado en nuestro modelo matemático. La conductividad térmica de papa, es considerada generalmente como una relación lineal entre ésta y el contenido de agua, sin embargo; esta correlación está limitada, pues no considera los cambios en porosidad y la formación de la capa de encostramiento que opone resistencia al transporte de humedad.

En la figura 23 se presenta la cinética de secado para una condición de temperatura del aire a 50°C. Observamos una mejor predicción de la evolución del contenido de humedad (RMSD=0.18), así como una mejor descripción de la forma de la curva de temperatura experimental. Sabemos que en esta condición de temperatura, el flux de humedad será mayor, y el acoplamiento de masa considerará un cambio de volumen más intenso. El teorema de Reynolds traduce mejor la migración de humedad pues el RMSD=0.18, y la temperatura muestra un error de RMSD=1.78.

De acuerdo a Halder y colaboradores (2011), estaríamos en el límite de temperatura para que el material experimente un rompimiento de las membranas celulares. El flux de humedad es mayor respecto al experimento a temperatura del aire igual a 40°C, por lo cual a las 6 horas de secado, el contenido de humedad de las muestras llega a 1.75 kg de agua/kg de sólido seco.

La predicción de temperatura es correcta globalmente, y las desviaciones pueden ser explicadas por la evolución de las propiedades termofísicas variables durante el secado. Hemos constatado que a esta temperatura de secado, las muestras también forman bolsas de

aire no uniformes, y un endurecimiento superficial visible. Es importante señalar, que el tubérculo sufre cambios importantes durante el secado. En un principio tenemos un material húmedo, con un porcentaje de agua igual a 72-75%, y un contenido de almidón del 16-20%. La interacción de estos componentes y su transformación durante el secado puede hacer variar la conductividad térmica del material, es decir los cambios en la constitución química del material no son tomados en cuenta en la ecuación de conductividad térmica de nuestro modelo.

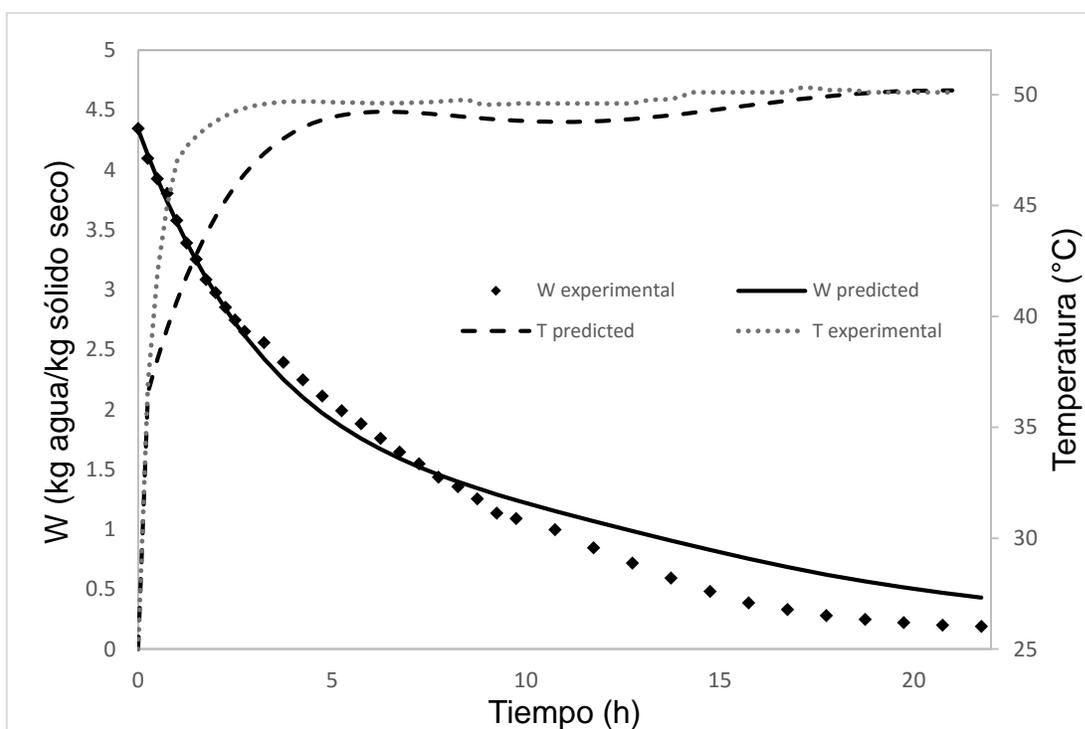


Figura 23. Cinéticas de contenido de humedad vs evolución de la temperatura superficial experimental y simulada a 50°C

La figura 24 muestra la cinética de secado y la evolución de temperatura de las rodajas a una condición de temperatura del aire a 60°C. Como es de esperarse, la rapidez de secado será mayor, por lo cual a las 6 horas de proceso, el contenido de humedad es de 1.4 kg de agua por kg de materia seca. Se observa una mejor predicción de la simulación numérica, la cual es confirmada por un RMSD=0.11 kg agua/kg materia seca. Ahora estamos en una condición de secado más agresiva para el material ($T > 52^{\circ}\text{C}$), por lo cual podemos decir que el transporte de humedad sigue un flujo extracelular, con una resistencia mucho menor al transporte de agua. De acuerdo con Halder y colaboradores (2011), a este nivel de temperatura, las membranas celulares han sido dañadas y el transporte de humedad sigue una vía extracelular, a través de espacios intercelulares y los espacios creados por las células deterioradas. Observamos una predicción de la cinética más cercana a la experimental. Entendemos que el modelo a través del teorema de Reynolds explica mejor la pérdida de humedad del material. Quiere decir que cuando los fluxes de materia son mayores, el teorema describe mejor la física de evacuación de humedad del material. En este caso, la temperatura se ha incrementado, y la viscosidad de la fase líquida ha disminuido, por lo cual podemos esperar una difusividad de materia mayor, aunado a una tasa de evaporación más grande reflejado en la rapidez de secado. Asimismo, la aplicación de una temperatura alta ($T = 60^{\circ}\text{C}$), permite disminuir la resistencia al transporte de humedad debido al daño/rompimiento de las membranas celulares, que conduce a valores de difusividad de humedad más grandes.

Para esta temperatura a 60°C como es de esperarse, hay una aceleración del proceso de secado debido al incremento de la temperatura del aire. Es decir, tomó menor tiempo en alcanzar el contenido de humedad de equilibrio debido a la existencia de una fuerza impulsora mayor para la transferencia de calor. El teorema de transporte de Reynolds nos dice que la razón de cambio de cualquier propiedad extensiva, (en este caso el volumen) dentro de un sistema es igual a la razón de cambio de esa propiedad dentro de un volumen de control fijo más el flux transportado a través de la superficie de control; es decir, el flux de masa líquida que abandona o cruza el dominio. Por lo que a mayor temperatura, el flux de humedad es acoplado al requerimiento energético del material y a los cambios en la dimensión 1D de nuestro modelo. La simulación a 60°C es mucho mejor (RMSD=0.11).

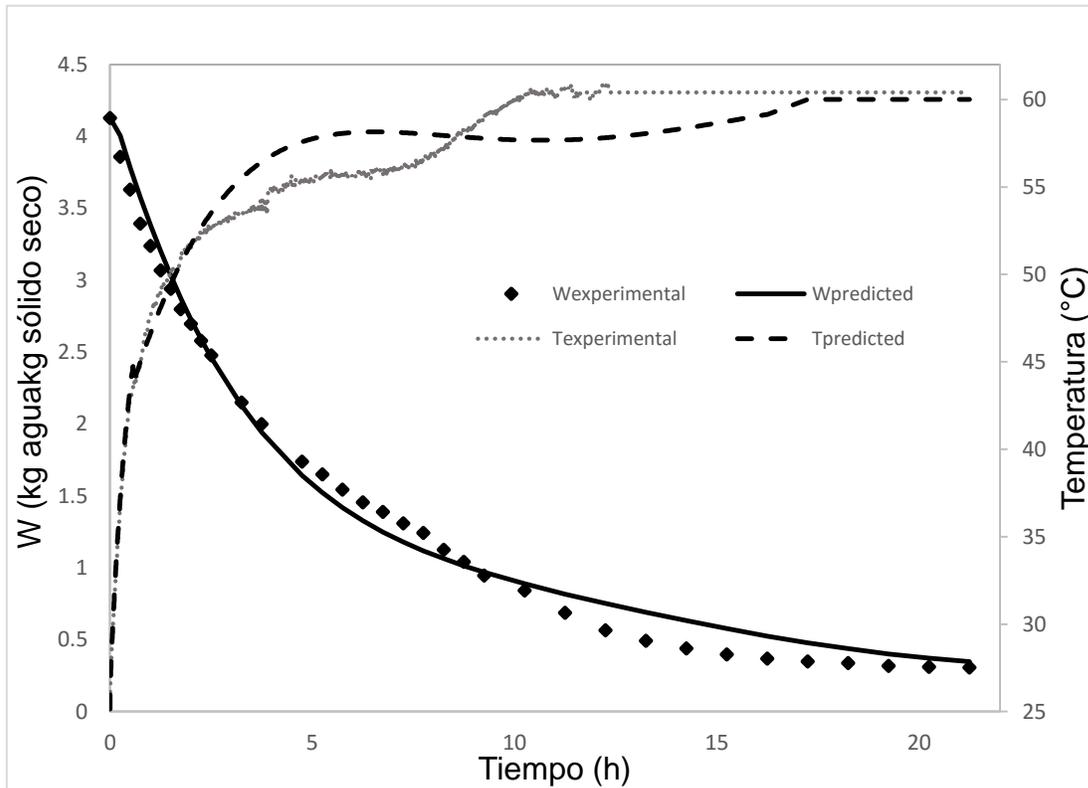
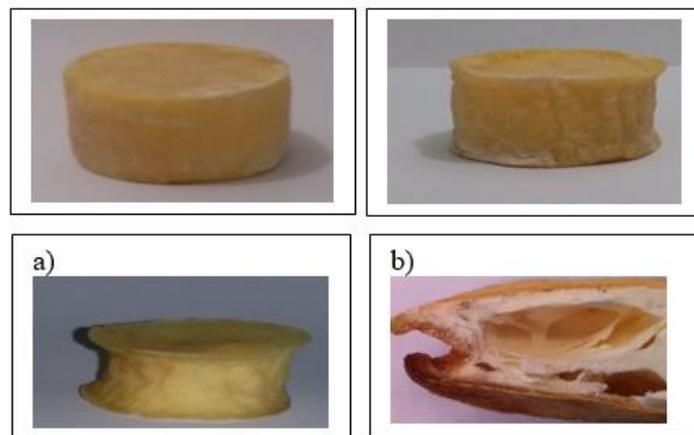


Figura 24. Cinéticas de contenido de humedad vs evolución de la temperatura superficial experimental y simulada a 60°C

Para la evolución de la temperatura la curva simulada coincide con la experimental durante las primeras tres horas del proceso con un $RMSD=1.83$. Sin embargo, la curva experimental presenta tres fases de calentamiento en el cual se observa un comportamiento casi sigmoidal; es decir, en la primera fase la temperatura se incrementa con rapidez hasta llegar a los 53°C, para posteriormente presentar una fase más lenta de incremento de temperatura (fase 2) y la última fase presenta un tercer incremento más pronunciado, y rápido hasta estabilizarse y llegar a la temperatura final de equilibrio a las 12 horas de proceso. La transferencia de calor en la superficie está relacionada con el coeficiente de transferencia de calor por convección y éste depende de las condiciones de la capa límite como la geometría de la superficie, la cual se ve afectada por el encogimiento. Por otro lado la conductividad térmica y la difusividad también cambian en la superficie (Lewicki, 2004) y en el caso de las muestras sometidas a una temperatura de 60°C experimentó la formación de una capa dura superficial, que modifica la transferencia de calor y por tanto la temperatura así como el flux de humedad.

Una rapidez de secado elevada considera un proceso de difusión mayor hacia la superficie, lo cual conduce a una contracción del tejido y formación de una capa dura superficial, identificada como case-hardening (Aprajeeta et al., 2015), en dicha capa pueden existir grandes desviaciones particularmente a altas temperaturas, velocidades de aire grandes y humedades relativas bajas (Gulati and Datta, 2015).

Y en el caso de la papa (*Solanum tuberosum*) la degradación de los carbohidratos, encogimiento y la formación de bolsas de aire en el interior del material implican mayor complejidad ya que modifican las propiedades de transporte. En la figura 25 se muestran fotografías de las muestras deshidratadas a 60°C. Como se puede observar, el encogimiento es de magnitud importante, y la formación de bolsas de aire en su interior también.



**Figura 25. a) Cambios en el espesor del material y encogimiento a 60°C
b) Formación de cavidades de aire dentro de la muestra**

Diversos trabajos han realizado esfuerzos por comprender mejor el proceso de secado y el encogimiento de agroalimentos. En particular para la papa, se han propuesto modelos que a continuación ponemos a discusión. La figura 26 muestra las cinéticas experimentales y simuladas desarrolladas por Aprajeeta y colaboradores (2015) para rodajas de papa de 4.5 cm de diámetro y 0.7 cm de espesor en un modelo 2D axisimétrico a una temperatura de 62°C y una velocidad de aire de 0.25 m/s. En dicho modelo evalúan un encogimiento radial

de las rodajas a través de una expresión algebraica e incluyendo la porosidad en la ecuación de difusividad. La figura 26 muestra los resultados numéricos obtenidos por Aprajeeta y colaboradores (2015) con y sin encogimiento. Asimismo, se presentan los resultados numéricos propuestos en el presente trabajo. Como se puede observar, las simulaciones de Aprajeeta presentan una gran desviación en las primeras horas de secado, disminuyendo dicha desviación a las 3.5 horas de secado. El modelo de Aprajeeta, es un modelo de difusión (ley de Fick) y de conducción (ley de Fourier). El autor considera el encogimiento como una relación lineal respecto a la pérdida de humedad, para posteriormente calcular la relación de cambio del tamaño de radio de la rodaja respecto al radio original. El cambio en dimensión es escrito como una ecuación algebraica $Y=A+B*W$.

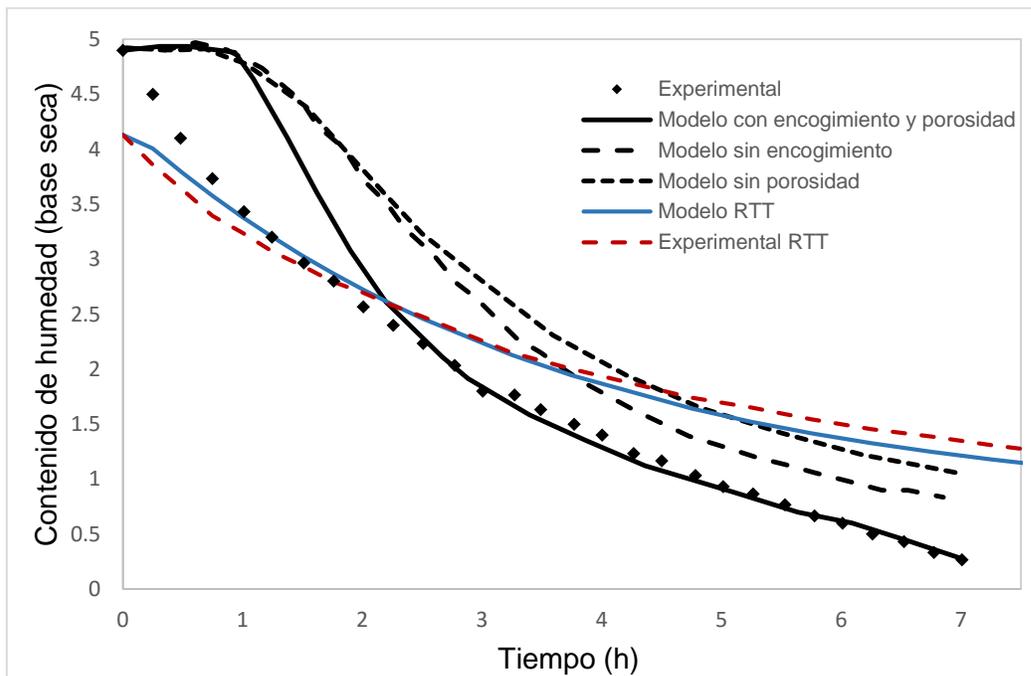


Figura 26. Perfiles de contenido de humedad en papa simuladas por el modelo de (Aprajeeta et al., 2015) y utilizando el teorema de Reynolds

Los cambios de radio de las rodajas son obtenidos a $T=60^{\circ}\text{C}$. El modelo propuesto en este trabajo es un modelo más complejo, en el sentido que considera leyes de conservación que traducen la pérdida de humedad de un dominio, en cambios en un volumen de control. El contenido de humedad de las muestras de Aprajeeta es cercano a 5 kg agua/kg materia seca,

en nuestros experimentos, el contenido de humedad inicial fue de 4.2 kg agua/kg materia seca. Nuestras simulaciones describen correctamente la pérdida de humedad de las muestras.

Por otra parte, Yang y colaboradores (2001), realizaron estudios de secado de papa, para muestras (rodajas) de e cm de diámetro y 1.5 cm de espesor, aplicando una temperatura de 60°C, humedad relativa de 5.4% y una velocidad de aire de 1.6 m/s. En la figura 27 se muestran las cinéticas de secado publicadas por Yang, y las simulaciones numéricas obtenidas en el presente trabajo. Las condiciones aplicadas son muy similares a las nuestras, por lo cual en esta figura comparamos las cinéticas adimensionalizadas. Observamos que las simulaciones de Yang y colaboradores, describen sus datos experimentales hasta las 3.5 horas, y posteriormente se presentan desviaciones importantes. Yang y colaboradores consideran una ecuación de conservación de masa y calor, además de considerar a la papa como un material elastoplástico. Los autores consideran coeficientes de encogimiento direccional, en donde el encogimiento del diámetro y circunferencia de la rodaja, es considerado proporcional a la disminución de volumen con un exponente a la 0.18, y un encogimiento axial de 0.64.

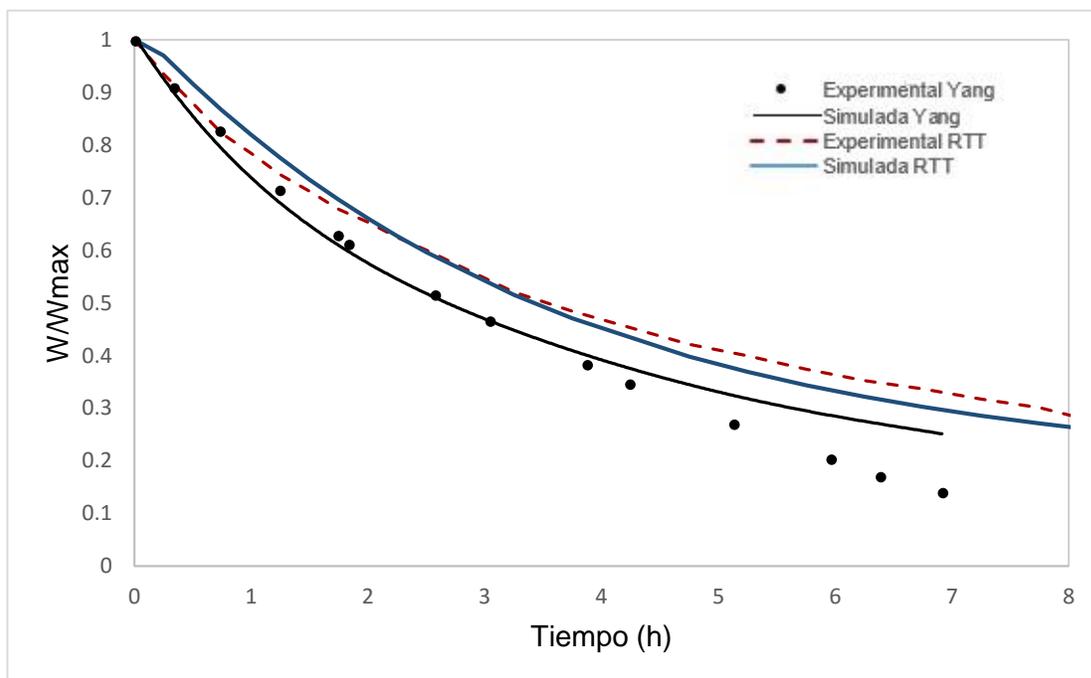


Figura 27. Perfiles de contenido de humedad adimensional en papa simuladas por el modelo de (Yang et al., 2001) y simuladas por el teorema de Reynolds

5.3 Rapidez de secado

La figura 28, muestra las curvas de rapidez de secado simuladas a tres diferentes temperaturas, las cuales fueron obtenidas a partir de la función que describe la cinética del contenido de humedad W y aplicando la primera derivada a dicha función ($-dW/dt$ vs W) (Kemp et al., 2001).

Las curvas fueron estandarizadas para poderlas comparar respecto a los contenidos de humedad inicial, ya que las muestras presentaron ligeras diferencias entre estos valores. La estandarización se realizó con las relaciones $(dw/dt)/(dw/dt)_{\text{máximo}}$ vs $W/W_{\text{máximo}}$.

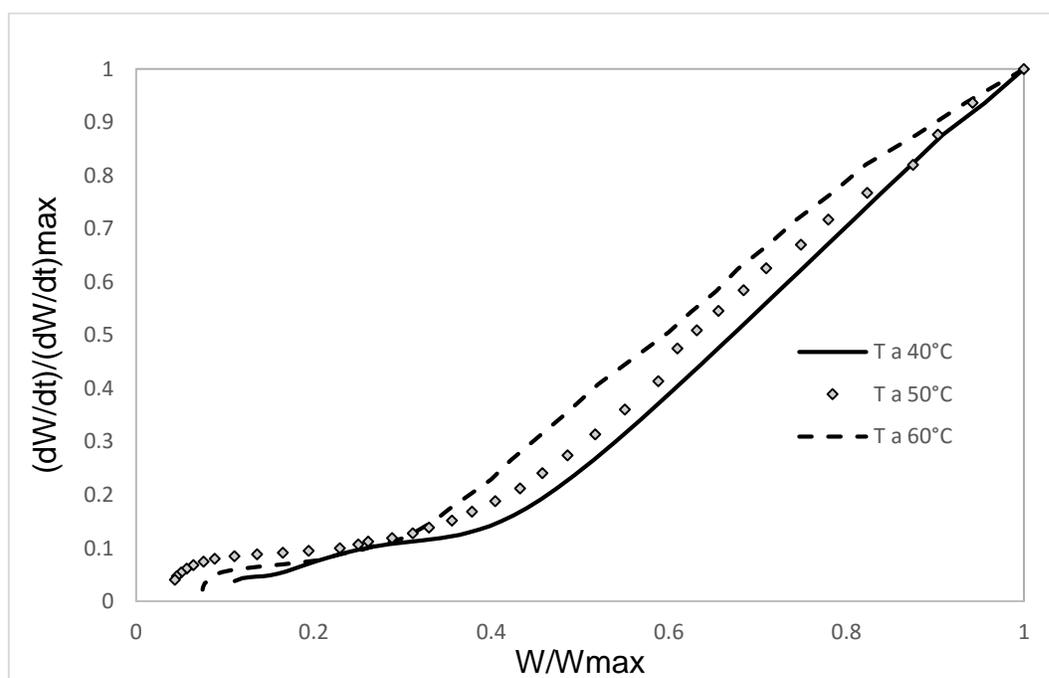


Figura 28. Curvas de rapidez de secado simuladas por el modelo estandarizadas a tres temperaturas

La figura 28 revela que a mayor temperatura, tenemos una mayor rapidez de secado. A 60°C, el rompimiento de las membranas celulares, permite un transporte de humedad más grande constatado por la derivada de la cinética de secado. Debido a que a mayores temperaturas de secado, existe una mayor difusividad (Leeratanarak et al., 2006). La teoría nos dice que la temperatura tiene mayor efecto en la rapidez de secado, mientras que el efecto de la velocidad

del aire y la humedad relativa se consideran menores (Krokida et al., 2003). La rapidez de secado en todos los casos es siempre mayor al inicio del secado (alto contenido de humedad), seguido de un periodo de rapidez decreciente. Resultados similares han sido reportados previamente por (Yadollahinia and Jahangiri, 2009), para temperaturas de 60, 70 y 80°C con velocidades de 0.5 y 1 m/s en rodajas de papa. En teoría el primer periodo de rapidez decreciente es por lo general el periodo más largo y depende principalmente de la temperatura del aire y del espesor del material. Lo anterior no se observó en nuestros experimentos, pues tenemos un material que experimental encogimiento y cambios en su estructura interna.

En las primeras horas de un proceso de secado, son las condiciones externas las que dominan el proceso, mientras que en tiempo posteriores (cuando estamos en la fase higroscópica), son las condiciones del material las que dominan la rapidez de secado. Este periodo no es afectado por la humedad relativa (excepto en la interfase), la transferencia de humedad ocurre por la difusión del líquido y del vapor. Y el segundo periodo de rapidez decreciente empieza cuando la superficie está seca en su totalidad. El plano de evaporación comienza a desplazarse con lentitud por debajo de la superficie y el calor de evaporación se transfiere a través del sólido hasta la zona de vaporización, el agua evaporada atraviesa el sólido para llegar a la corriente de aire y este periodo culmina cuando el material alcanza el equilibrio termodinámico con el medio.

En la figura 29 se muestra la rapidez de secado en $\text{kg/m}^2\text{s}$, después de un periodo corto inicial la rapidez de secado a 2.8 kg agua/kg sólido seco, la humedad desciende abruptamente, lo que produce perfiles de humedad con pendientes muy pronunciadas y según lo reportado por Gulati y Datta (2015) este marcado descenso da como resultado, la formación de una capa fina, seca y dura en el exterior que sella el núcleo del material formando una barrera para el transporte de calor y humedad del material al exterior, lo cual propicia gradientes de humedad entre la superficie y el núcleo. Se puede observar que la rapidez de secado para las tres temperaturas, es mayor al inicio del proceso ya que las muestras tienen un alto contenido de humedad, y a medida que se pierde el agua esta rapidez va disminuyendo, pues la tasa de evaporación decrece.

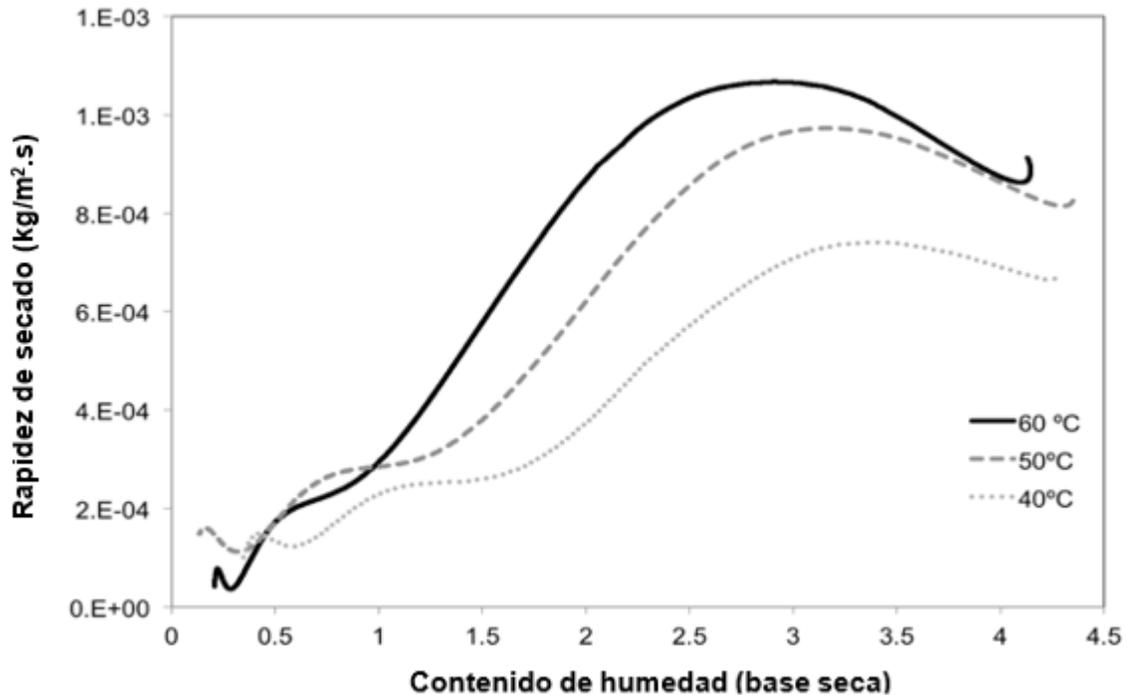


Figura 29. Rapidez de secado por unidad de área como función del contenido de humedad

5.4 Distribución espacial del contenido de humedad respecto al cambio de espesor

La distribución del contenido de humedad simulada se muestra en la figura 30. Observamos que a medida que el material pierde humedad, su matriz sólida va reduciendo en tamaño. El eje x representa sólo la mitad del espesor, y el eje y corresponde al contenido de humedad. Se observa que cuando el material ha perdido la mitad de su contenido de humedad, su espesor se ha reducido en más de la mitad. También se observa que cuando la muestra ha llegado a la mitad de su contenido de humedad ($W=2.06$ kg agua/kg sólido seco), la superficie estará ligeramente más seca que el interior, lo cual corresponde a la física de este proceso, pues la superficie está expuesta a condiciones más agresivas de secado que su interior.

El contenido de humedad durante el proceso decrece significativamente con el incremento de temperatura, y depende cada vez más de su equilibrio higroscópico. Además, el hecho de estar en una zona higroscópica, hace que el proceso de transporte de humedad sea más lento,

lo cual explica que las líneas estén más cernas unas de otras en contenidos de humedad por debajo del 2.2%. El patrón de encogimiento revela que la contracción y comportamiento sugieren una dependencia fuerte del contenido de humedad. Sin embargo, esta dependencia en la simulación se muestra menos intensa a contenidos de humedad menores a 2 kg agua/kg sólido seco. Esto significaría que en el dominio higroscópico, el encogimiento ya no es tan severo.

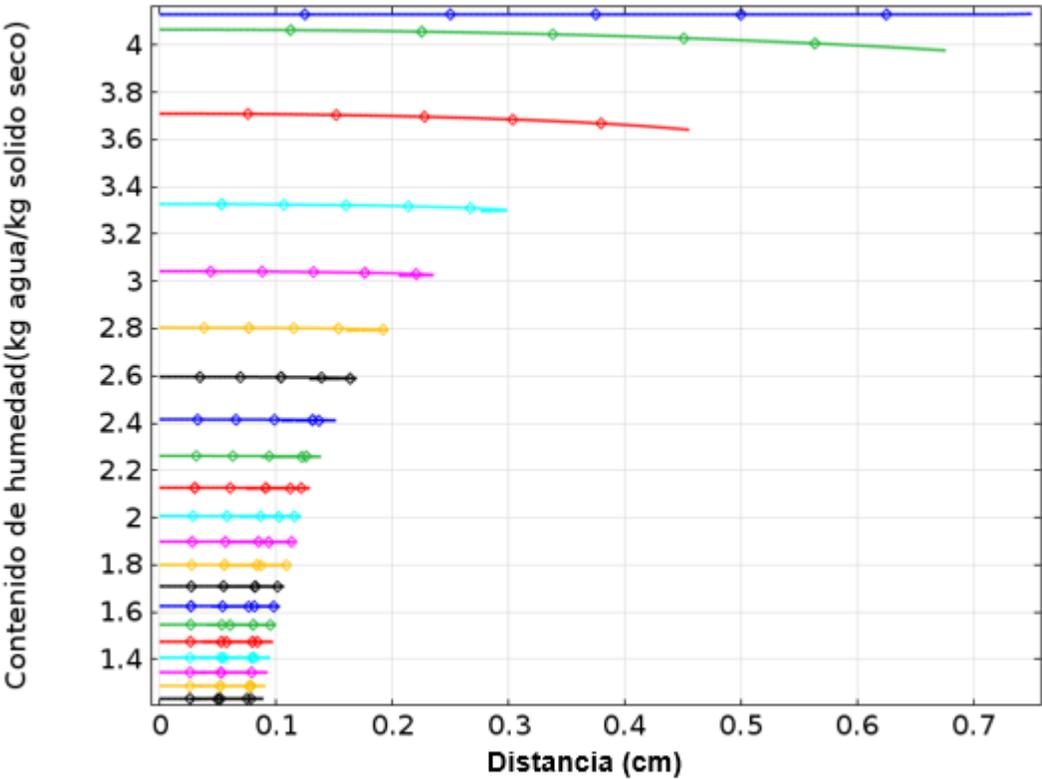


Figura 30. Distribución del contenido de humedad simulado como función de la posición y tiempo a 60°C

5.5 Evolución de la temperatura y cambio de espesor en el material

El modelo también predijo la distribución de los gradientes de temperatura del dominio durante todo el proceso de secado (figura 31). Observamos que la disminución del espesor del material es más intenso en las primeras horas de secado, lo cual corresponde al periodo en el cual la pérdida de humedad es más grande. Se puede observar que la temperatura será ligeramente mayor en la superficie del material respecto a la temperatura al interior de la muestra. Si comparamos la evolución de la temperatura (figura 24), con la simulación del encogimiento de la figura 30, observamos que en el momento en el cual la temperatura del material es casi la temperatura del aire ($T=60^{\circ}\text{C}$), el material deja de encoger, y la pérdida de humedad es despreciable. Es decir, que el encogimiento modelado está acoplado de manera intensa a la pérdida de humedad.

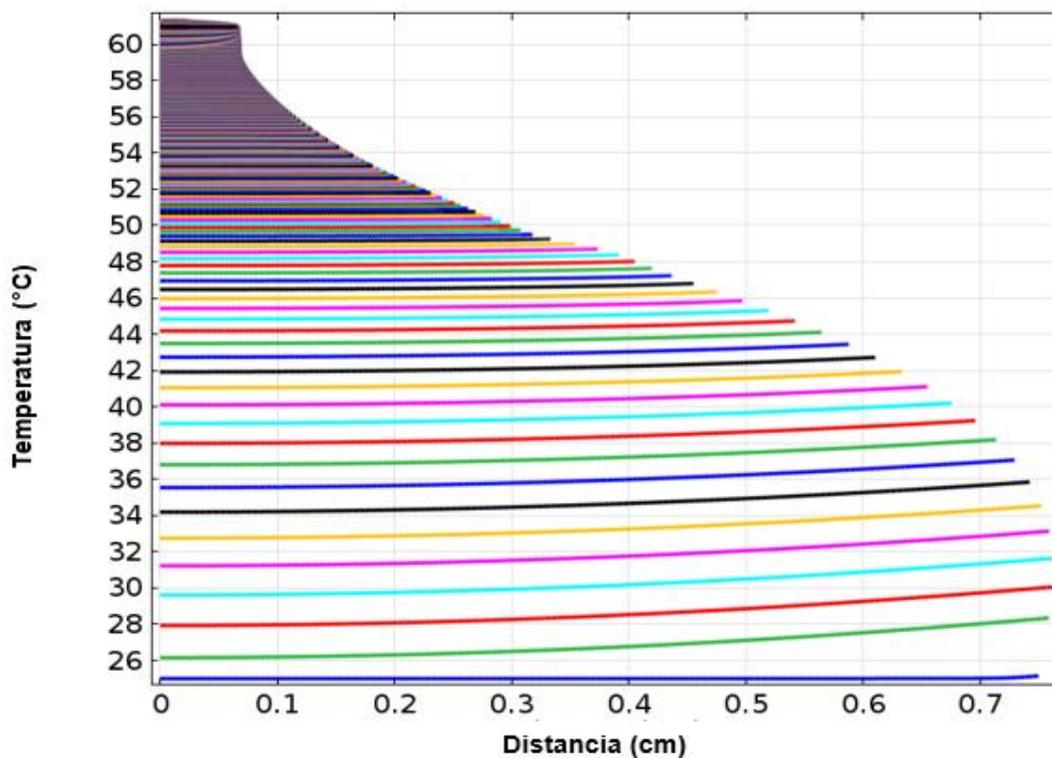


Figura 31. Distribución de la temperatura simulada como función de la posición y tiempo a 60°C

CONCLUSIONES

Se desarrolló un modelo basado sobre leyes físicas fundamentales. El modelo consta de balances de conservación de masa y calor en forma de ecuaciones diferenciales parciales que incluyen un término fuente afectado por la contracción. La contracción fue explicada a través del teorema de transporte de Reynolds debido a que es útil en materiales muy húmedos cuya variación volumétrica es notable respecto al flux que abandona al sistema.

La adimensionalización de ecuaciones permitió reducir el número de parámetros al obtener expresiones simplificadas, donde cada ecuación representa una relación entre las magnitudes coexistentes, y permitió reducir el tiempo en la solución numérica computacional. Asimismo, nuestro sistema de ecuaciones en su escritura adimensional puede ser útil para el escalamiento del proceso. Se obtuvieron cinéticas de contenido de humedad (RMSD=0.22, 0.18 y 0.11), y evolución de la temperatura superficial de la muestra para cada temperatura con el modelo, el cual predice un encogimiento a partir de una pérdida volumétrica de humedad, al describir las curvas de las cinéticas de secado correctamente.

Las simulaciones predicen el acoplamiento entre pérdida de humedad, calentamiento del material y encogimiento. Las cinéticas de secado simuladas se aproximan de manera satisfactoria a las cinéticas experimentales. Sin embargo, las desviaciones pueden ser explicadas principalmente por las siguientes causas:

1. Inexactitud o variación de las propiedades termofísicas de los materiales (ecuaciones constitutivas)
2. Formación de pequeñas bolsas de aire al interior del material.
3. La falta de distinción entre el transporte de humedad intra y extracelular en la formulación matemática.
4. Presencia de un encostramiento (case-hardening) que actúa como una resistencia al flux de masa.

REFERENCIAS

- AFAGHI, N., SEIEDLOU, S. S. & HASANPOUR, A. 2013. Simulation Shrinkage and Stress Generated During Convective Drying of Carrot Slices. *International journal of Advanced Biological and Biomedical Research*, 1, 1660-1668.
- AGUILERA, J. M. 2005. Why food microstructure? *Journal of Food Engineering*, 67, 3-11.
- AGUILERA, J. M. & STANLEY, D. W. 1999. *Microstructural principles of food processing and engineering*, Springer.
- 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.
- BADUI DERGAL, S. 2006. *Química de los alimentos*.
- BARRETT, D. M., BEAULIEU, J. C. & SHEWFELT, R. 2010. Color, flavor, texture, and nutritional quality of fresh-cut fruits and vegetables: desirable levels, instrumental and sensory measurement, and the effects of processing. *Critical reviews in food science and nutrition*, 50, 369-389.
- BASU, S. K. & KUMAR, N. 2014. *Modelling and Simulation of Diffusive Processes : Methods and Applications*, Dordrecht, Springer International Publishing.
- BEAR, J. J. & CHENG, H.-D. A. 2010. Groundwater Motion. *Modeling Groundwater Flow and Contaminant Transport*. Springer.
- BIGLIARDI, B. & GALATI, F. 2013. Innovation trends in the food industry: the case of functional foods. *Trends in Food Science & Technology*, 31, 118-129.
- BIMBENET, J.-J., SCHUBERT, H. & TRYSTRAM, G. 2007. Advances in research in food process engineering as presented at ICEF 9. *Journal of food engineering*, 78, 390-404.
- CHEN, X. D. & PUTRANTO, A. 2013. *Modelling Drying Processes: A Reaction Engineering Approach*, Cambridge University Press.
- DATTA, A. 2007. Porous media approaches to studying simultaneous heat and mass transfer in food processes. II: Property data and representative results. *Journal of food engineering*, 80, 96-110.
- DATTA, A. K. 2002. *Biological and bioenvironmental heat and mass transfer*, CRC Press.
- DHALL, A. & DATTA, A. K. 2011. Transport in deformable food materials: a poromechanics approach. *Chemical Engineering Science*, 66, 6482-6497.
- FANTA, S. W., ABERA, M. K., AREGAWI, W. A., HO, Q. T., VERBOVEN, P., CARMELIET, J. & NICOLAI, B. M. 2014. Microscale modeling of coupled water transport and mechanical deformation of fruit tissue during dehydration. *Journal of Food Engineering*, 124, 86-96.
- FAO, R. 2009. Año internacional de la papa 2008: nueva luz sobre un tesoro enterrado. Reseña de fin de año. International year of the potato 2008: new light on a hidden treasure. An end-of-year review. Année Internationale de la pomme de terre 2008: éclairage sur un trésor enfoui. Compte rendu de fin d'année.
- FELLOWS, P. J. 2009. *Food processing technology: principles and practice*, Elsevier.
- GUINE, R. 2006. Influence of drying method on density and porosity of pears. *Food and Bioproducts Processing*, 84, 179-185.

- GULATI, T. & DATTA, A. K. 2015. Mechanistic Understanding of Case-hardening and Texture Development During Drying of Food Materials. *Journal of Food Engineering*.
- HALDER, A., DATTA, A. K. & SPANSWICK, R. M. 2011. Water transport in cellular tissues during thermal processing. *AIChE Journal*, 57, 2574-2588.
- 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, 47-56.
- HERNANDEZ, J., PAVON, G. & GARCIA, M. 2000. Analytical solution of mass transfer equation considering shrinkage for modeling food-drying kinetics. *Journal of food engineering*, 45, 1-10.
- HO, Q. T., CARMELIET, J., DATTA, A. K., DEFRAEYE, T., DELELE, M. A., HERREMANS, E., OPARA, L., RAMON, H., TIJSKENS, E. & VAN DER SMAN, R. 2013. Multiscale modeling in food engineering. *Journal of food Engineering*, 114, 279-291.
- JANGAM, S., LAW, C. & MUJUMDAR, A. 2010. DRYING OF FOOD, VEGETABLES AND FRUITS.
- KARUNASENA, H., GU, Y., BROWN, R. & SENADEERA, W. 2015. Numerical Investigation of Case Hardening of Plant Tissue During Drying and Its Influence on the Cellular-Level Shrinkage. *Drying Technology*, 33, 713-734.
- KATEKAWA, M. & SILVA, M. 2006. A review of drying models including shrinkage effects. *Drying technology*, 24, 5-20.
- KEMP, I. C., FYHR, B. C., LAURENT, S., ROQUES, M. A., GROENEWOLD, C. E., TSOTSAS, E., SERENO, A. A., BONAZZI, C. B., BIMBENET, J.-J. & KIND, M. 2001. Methods for processing experimental drying kinetics data. *Drying Technology*, 19, 15-34.
- KHALLOUFI, S., ALMEIDA-RIVERA, C. & BONGERS, P. 2009. A theoretical model and its experimental validation to predict the porosity as a function of shrinkage and collapse phenomena during drying. *Food Research International*, 42, 1122-1130.
- KOC, B., EREN, I. & KAYMAK ERTEKIN, F. 2008. Modelling bulk density, porosity and shrinkage of quince during drying: The effect of drying method. *Journal of Food Engineering*, 85, 340-349.
- KROKIDA, M. & MARINOS-KOURIS, D. 2003. Rehydration kinetics of dehydrated products. *Journal of Food Engineering*, 57, 1-7.
- KROKIDA, M. K., KARATHANOS, V., MAROULIS, Z. & MARINOS-KOURIS, D. 2003. Drying kinetics of some vegetables. *Journal of Food engineering*, 59, 391-403.
- LEERATANARAK, N., DEVAHASTIN, S. & CHIEWCHAN, N. 2006. Drying kinetics and quality of potato chips undergoing different drying techniques. *Journal of food engineering*, 77, 635-643.
- LEWICKI, P. P. 1998. Some remarks on rehydration of dried foods. *Journal of Food Engineering*, 36, 81-87.
- LEWICKI, P. P. 2004. Water as the determinant of food engineering properties. A review. *Journal of food engineering*, 61, 483-495.
- LOZANO, J. E. 2006. *Fruit manufacturing*, Springer.
- LUTALADIO, N. & CASTALDI, L. 2009. Potato: The hidden treasure. *Journal of Food Composition and Analysis*, 22, 491-493.

- MALAGA, J. E. & WILLIAMS, G. W. 2006. Mexican Agricultural and Food Export Competitiveness. Texas A&M University, Agribusiness, Food, and Consumer Economics Research Center.
- MAROULIS, Z., KROKIDA, M. & RAHMAN, M. 2002. A structural generic model to predict the effective thermal conductivity of fruits and vegetables during drying. *Journal of Food Engineering*, 52, 47-52.
- MAY, B. & PERRÉ, P. 2002. The importance of considering exchange surface area reduction to exhibit a constant drying flux period in foodstuffs. *Journal of Food Engineering*, 54, 271-282.
- MAYOR, L. & SERENO, A. 2004. Modelling shrinkage during convective drying of food materials: a review. *Journal of Food Engineering*, 61, 373-386.
- MCCANN, M. & ROBERTS, K. 1991. Architecture of the primary cell wall. *The cytoskeletal basis of plant growth and form*, 109-129.
- MCCANN, M. C., BUSH, M., MILIONI, D., SADO, P., STACEY, N. J., CATCHPOLE, G., DEFERNEZ, M., CARPITA, N. C., HOFTE, H. & ULVSKOV, P. 2001. Approaches to understanding the functional architecture of the plant cell wall. *Phytochemistry*, 57, 811-821.
- MCGREGOR, B. M. 1989. Tropical products transport handbook.
- MCMINN, W. A. M. 2006. Thin-layer modelling of the convective, microwave, microwave-convective and microwave-vacuum drying of lactose powder. *Journal of Food Engineering*, 72, 113-123.
- MULET, A., BERNA, A. & ROSSELLO, C. 1989. DRYING OF CARROTS. I. DRYING MODELS. *Drying Technology*, 7, 537-557.
- PAVÓN-MELENDEZ, G., HERNÁNDEZ, J. A., SALGADO, M. A., GARCÍA, AMP, X & A, M. A. 2002. Dimensionless analysis of the simultaneous heat and mass transfer in food drying. *Journal of Food Engineering*, 51, 347-353.
- PERRÉ, P. 2011. A review of modern computational and experimental tools relevant to the field of drying. *Drying Technology*, 29, 1529-1541.
- PERRÉ, P. & MAY, B. 2001. A numerical drying model that accounts for the coupling between transfers and solid mechanics. Case of highly deformable products. *Drying Technology*, 19, 1629-1643.
- PLAWSKY, J. L. 2014. *Transport phenomena fundamentals*, CRC Press.
- RAHMAN, M. S. 2001. Toward prediction of porosity in foods during drying: a brief review. *Drying Technology*, 19, 1-13.
- RAHMAN, M. S. 2003. A theoretical model to predict the formation of pores in foods during drying. *International Journal of Food Properties*, 6, 61-72.
- RAHMAN, M. S. 2006. State diagram of foods: Its potential use in food processing and product stability. *Trends in Food Science & Technology*, 17, 129-141.
- RAHMAN, M. S. & CHEN, X. 1995. A general form of thermal conductivity equation for an apple sample during drying: variation with moisture content and temperature. *Drying technology (USA)*.
- RATTI, C. 1994. Shrinkage during drying of foodstuffs. *Journal of Food Engineering*, 23, 91-105.
- RUZICKA, M. C. 2008. On dimensionless numbers. *Chemical Engineering Research and Design*, 86, 835-868.

- SABLANI, S. S. & RAHMAN, M. S. 2002. Pore formation in selected foods as a function of shelf temperature during freeze drying. *Drying Technology*, 20, 1379-1391.
- SAGARPA, S. 2011. Servicio de información agroalimentaria y pesquera.
- SANDOVAL TORRES, S. & ALLIER GONZÁLEZ, A. L. 2015. Linear and nonlinear drying behavior in tuberous crop slices. *Drying Technology*, 33, 559-569.
- SENADEERA, W., BHANDARI, B. R., YOUNG, G. & WIJESINGHE, B. 2005. Modeling dimensional shrinkage of shaped foods in fluidized bed drying. *Journal of food processing and preservation*, 29, 109-119.
- SETIADY, D., TANG, J., YOUNCE, F., SWANSON, B., RASCO, B. & CLARY, C. 2009. Porosity, color, texture, and microscopic structure of russet potatoes dried using microwave vacuum, heated air, and freeze drying. *Applied Engineering in Agriculture*, 25, 719-724.
- SIEBEL, J. 1892. Specific heat of various products. *Ice and Refrigeration*, 256.
- SRIKIATDEN, J. & ROBERTS, J. S. 2008. Predicting moisture profiles in potato and carrot during convective hot air drying using isothermally measured effective diffusivity. *Journal of Food Engineering*, 84, 516-525.
- TSOTSAS, E. & MUJUMDAR, A. S. 2011. *Modern Drying Technology-Volume 3: Product Quality and Formulation*, John Wiley & Sons.
- TURNER, I. W. 1996. A two-dimensional orthotropic model for simulating wood drying processes. *Applied Mathematical Modelling*, 20, 60-81.
- VAN DER SMAN, R., VERGELDT, F., VAN AS, H., VAN DALEN, G., VODA, A. & VAN DUYNHOVEN, J. 2013. Multiphysics pore-scale model for the rehydration of porous foods. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*.
- WANG, N. & BRENNAN, J. 1992. Thermal conductivity of potato as a function of moisture content. *Journal of food engineering*, 17, 153-160.
- WANG, N. & BRENNAN, J. 1993. The influence of moisture content and temperature on the specific heat of potato measured by differential scanning calorimetry. *Journal of Food engineering*, 19, 303-310.
- WANG, N. & BRENNAN, J. 1995. A mathematical model of simultaneous heat and moisture transfer during drying of potato. *Journal of Food Engineering*, 24, 47-60.
- WANG, W., CHEN, G. & MUJUMDAR, A. S. 2007. Physical interpretation of solids drying: An overview on mathematical modeling research. *Drying Technology*, 25, 659-668.
- YADOLLAHINIA, A. & JAHANGIRI, M. 2009. Shrinkage of potato slice during drying. *Journal of Food Engineering*, 94, 52-58.
- YANG, H., SAKAI, N. & WATANABE, M. 2001. Drying model with non-isotropic shrinkage deformation undergoing simultaneous heat and mass transfer. *Drying Technology*, 19, 1441-1460.
- YUNUS, A. C. 2003. *Heat transfer: a practical approach*.