

## MODELADO MATEMÁTICO DE LA TRANSFERENCIA DE CALOR Y MATERIA Y DE LA PRESIÓN DURANTE LA DESHIDRATACIÓN CON MICROONDAS DE ALIMENTOS COMO MEDIOS POROSOS

Javier R. Arballo<sup>a,b</sup>, Laura A. Campañone<sup>a</sup> and Rodolfo H. Mascheroni<sup>a,b</sup>

<sup>a</sup>CIDCA (Centro de Investigación y Desarrollo en Criotecnología de Alimentos), (CONICET La Plata – UNLP). Calle 47 y 116, La Plata (1900), Argentina, [jraballo@cidca.org.ar](mailto:jraballo@cidca.org.ar),  
<http://www.cidca.org.ar>

<sup>b</sup>MODIAL-Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de la Plata.

**Palabras claves:** Simulación numérica; medios porosos; incremento de presión; transferencia de calor y materia; deshidratación con microondas.

**Resumen.** Estudios recientes han sido dedicados al desarrollo de modelos matemáticos para simular el procesamiento de alimentos utilizando el enfoque de medios porosos (enfoque mecanístico). El objetivo de este estudio es simular la deshidratación con microondas por medio del modelado de la transferencia de materia y energía usando el enfoque mecanístico. La deshidratación con microondas involucra mecanismos físicos complejos que deben ser considerados en la formulación del modelo matemático completo. Los mecanismos de difusión y convección, difusión binaria de Maxwell Stefan, flujo de Darcy y conducción y convección térmica fueron considerados con el propósito de modelar la transferencia de agua y vapor de agua, el incremento de presión en el interior del material poroso y la transferencia de calor, respectivamente. Un modelo matemático completo fue obtenido y simulado usando el software COMSOL Multiphysics. Mediante un estudio de sensibilidad tanto de la constante de evaporación de no-equilibrio como de la potencia de las microondas absorbida por la muestra fue posible encontrar un rango de valores adecuados para simular la deshidratación con microondas de alimentos.

## 1 INTRODUCTION

En años recientes las microondas han sido ampliamente utilizadas en el procesamiento industrial debido a sus ventajas comparadas con los procesos convencionales de procesamiento de alimentos (secado por aire caliente, calentamiento por radiación y convección, etc.). Entre sus principales ventajas aparecen: bajo impacto ambiental debido al uso de energía limpia, bajo consumo de energía y menor tiempo de procesamiento, y ahorro en espacio. En la industria de los alimentos sus usos incluyen descongelación, pasteurización, esterilización, calentamiento, escaldado, cocción, horneado y secado. En adición a esta amplia utilización en el ámbito industrial, un número importante de trabajos de investigación han sido publicados recientemente sobre el procesamiento de alimentos con microondas (Benlloch-Tinoco y col. 2013; Chowdhury y col. 2013; Liu y col. 2014; Xanthakis y col. 2014).

Las ventajas de las microondas mencionadas previamente son resultado de la habilidad de las microondas de penetrar y calentar los alimentos volumétricamente. Las microondas se propagan en forma de un campo electromagnético que interactúa con las moléculas polares del material irradiado (principalmente con las moléculas de agua) y genera inicialmente su calentamiento (Campañone y Zaritzky, 2005). Cuando el proceso de calentamiento con microondas continua, este promueve la vaporización del agua líquida y su remoción, este proceso es potenciado por el incremento de la presión de vapor aumentando la fuerza impulsora para la vaporización forzando al vapor a moverse hacia la superficie (Datta y Anantheswaran, 2001).

Con respecto al incremento de temperatura, para su cálculo es necesario obtener la potencia de microondas absorbida dentro del material debido a la interacción entre el alimento y el campo electromagnético. Las ecuaciones de Maxwell describen la distribución del campo electromagnético dentro de hornos de microondas vacíos o cargados. Actualmente, dos líneas de modelado están siendo utilizadas para predecir la distribución de la energía electromagnética dentro del alimento: resolviendo las ecuaciones de Maxwell (Dinčov y col. 2004; Marra y col. 2010; Rakesh y col. 2012) o la utilización de la Ley de Lambert que provee una descripción aproximada la cual considera un decaimiento exponencial de la energía dentro del material poroso (Sanga y col. 2002; Salagnac y col. 2004; Boldor y col. 2005).

Por otro lado, la eliminación del agua (líquida o en forma de vapor) durante la deshidratación con microondas es un fenómeno complejo que involucra diferentes mecanismos, tales como difusión de agua líquida y vapor de agua, flujo capilar y flujo hidrodinámico producido por el incremento de presión interna. Mientras menor es la escala de descripción física, mayor es la complejidad debido a un mayor detalle en la descripción del fenómeno. A este nivel, los modelos de fenómenos de transporte consideran el enfoque de medios porosos generalmente asociando las ecuaciones de transferencia de energía, materia y cantidad de movimiento con todos los flujos interactivos termodinámicos (Whitaker, 1977). Algunos investigadores han usado este enfoque para modelar el transporte de materia durante el secado con microondas (Salagnac y col. 2004; Datta, 2007).

Con el fin de ganar un mayor entendimiento de los fenómenos complejos involucrados en el proceso de deshidratación con microondas de alimentos es necesario obtener un modelo completo y simular el proceso bajo diferentes condiciones de operación. Para modelar los cambios de temperatura, humedad y presión interna durante la deshidratación con microondas de alimentos considerados como medios porosos se requiere resolver simultáneamente los balances de materia, energía y cantidad de movimiento. Estos balances con sus condiciones de contorno forman un sistema no-lineal de ecuaciones diferenciales parciales que están altamente acopladas. Debido a la complejidad del sistema de ecuaciones obtenido es necesario

aplicar técnicas numéricas para su resolución. Como resultado, el método de los elementos finitos (MEF) ha sido utilizado con este propósito en este estudio.

Teniendo en cuenta las consideraciones realizadas previamente el objetivo de este estudio es desarrollar un modelo matemático completo para simular la transferencia de calor y materia y el incremento presión durante la deshidratación con microondas de alimentos.

## 2 MATERIALES Y MÉTODOS

### 2.1 Modelado matemático

En el desarrollo del modelo matemático la muestra (alimento) puede ser considerada como un medio poroso constituido por una combinación de tres fases: una matriz sólida, una fase acuosa (agua líquida) y una fase gaseosa (aire y vapor de agua) (Datta, 2007). Un modelo matemático completo debe permitir resolver la transferencia de calor, materia y cantidad de movimiento simultáneamente, considerando el cambio de fase que tiene lugar que a la vez vincula las diferentes fases presentes en el material. Las siguientes consideraciones fueron realizadas para el desarrollo del modelo:

- La presión se considera constante en la superficie,
- El vapor se transfiere por convección desde la superficie,
- El flujo de agua líquida depende de la presión total y de las fuerzas capilares en el medio poroso,
- El flujo de vapor depende de la presión y de la difusión binaria en el aire en el medio poroso,
- Se considera equilibrio térmico entre todas las fases,
- El coeficiente de transferencia de calor convectivo se considera igual en todas las caras del material,
- Se utilizará el enfoque de no-equilibrio para modelar la tasa de evaporación de agua,
- Los cambios en la porosidad y volumen son considerados despreciables,
- El dominio computacional considera una geometría 2D.

#### 2.1.1 Transporte de materia multifásico a través del medio poroso

Durante el proceso de deshidratación con microondas, la ecuación de conservación de materia para las diferentes fases incluye los siguientes flujos: capilar (agua y vapor) y convectivo (agua, vapor y aire). El modelo en medios porosos además incluye el cambio de fase entre el agua líquida y el vapor a través de todo el dominio (Datta, 2007).

##### *Balance microscópico de materia para el agua líquida*

$$\frac{\partial C_w}{\partial t} + u_{w,me} \nabla C_w + C_w \nabla u_{w,me} = \nabla (D_{w,eff} \nabla C_w) - I \quad (1)$$

donde  $C_w$  es la concentración de agua líquida,  $u_{w,me}$  es la velocidad del agua moviéndose en el medio poroso,  $D_{w,eff}$  es el coeficiente efectivo de difusión del agua e  $I$  es la tasa volumétrica de evaporación/condensación del agua.

La velocidad del agua líquida  $u_{w,me}$  dentro del medio poroso está definida por la Ley de Darcy (Ni y col. 1999):

$$u_{w,me} = -\frac{1}{\varepsilon S_w} \frac{k_{wi} k_{wr}}{\eta_w} \nabla P \quad (2)$$

donde  $k_{wi}$  y  $k_{wr}$  son las permeabilidades intrínsecas y relativas del agua líquida dentro del medio poroso,  $S_w$  es la saturación del agua y  $\varepsilon$  es la porosidad del alimento,  $\eta_w$  es la viscosidad dinámica del agua y  $P$  es la presión dentro del alimento.

#### **Balance microscópico de materia para el vapor de agua**

$$\frac{\partial C_v}{\partial t} + u_{g,me} \nabla C_v + C_v \nabla u_{g,me} = \nabla \left( S_g \varepsilon \frac{C^2}{\rho_g} M_w M_a D_{g,eff} \nabla x_v \right) + I \quad (3)$$

donde  $C_v$  es la concentración de vapor de agua,  $u_{g,me}$  es la velocidad de la fase gaseosa dentro del medio poroso,  $C$  es la densidad molar del gas,  $M_a$  y  $M_w$  son las masas molares de aire y agua, respectivamente,  $x_v$  es la fracción molar del vapor de agua y  $D_{g,eff}$  es el coeficiente efectivo de difusión del gas.

La concentración de vapor de agua puede ser obtenida a partir de la fracción másica de vapor en la fase gaseosa utilizando la siguiente expresión:

$$C_v = \varepsilon S_g \rho_g \omega_g \quad (4)$$

Del mismo modo que se define la velocidad de flujo del agua líquida dentro de medio poroso, la velocidad del vapor de agua puede calcularse a partir de la Ley de Darcy:

$$u_{g,me} = - \frac{1}{\varepsilon S_g} \frac{k_{gi} k_{gr}}{\eta_g} \nabla P \quad (5)$$

donde  $k_{gi}$  y  $k_{gr}$  son las permeabilidades intrínsecas y relativas del gas dentro del medio poroso,  $S_g$  es la saturación de gas,  $\eta_g$  es la viscosidad dinámica del gas (aire y vapor).

#### **Balance microscópico de materia para la fase gaseosa**

$$\frac{\partial (\varepsilon S_g \rho_g)}{\partial t} + \nabla (\rho_g u_g) = I \quad (6)$$

donde  $\rho_g$  es la densidad del gas.

La densidad de la fase gaseosa se define a partir de la ecuación de los gases ideales y se calcula utilizando las fracciones molares del aire y el vapor de agua:

$$\rho_g = \frac{P}{RT} (x_v M_w + x_a M_a) \quad (7)$$

donde  $x_v$  y  $x_a$  son las fracciones molares del vapor de agua y del aire en la fase gaseosa.

### **2.1.2 Balance microscópico de energía en el medio poroso**

La ecuación de conservación de la energía incluye la convección debido al movimiento de las diferentes fases, conducción de calor, cambio de fase y un término fuente que tiene en cuenta el aporte de las microondas (Rakesh y col. 2012).

$$\rho_{eff} C_{p,eff} \frac{\partial T}{\partial t} + \sum_{i=w,v,a} \nabla (C_i u_{i,me} C_{p_i} T) - C_{p_w} T \nabla (D_{w,eff} \nabla C_w) = \nabla (k_{eff} \nabla T) - \lambda I + Q_{mic} \quad (8)$$

donde  $\rho_{eff}$  es la densidad efectiva,  $C_{p,eff}$  es la capacidad calorífica efectiva multifase,  $k_{eff}$  es la conductividad efectiva,  $T$  es la temperatura,  $t$  es el tiempo,  $C_i$  es la concentración másica del fluido  $i$  ( $\text{kg/m}^3$ ),  $u_{i,me}$  es la velocidad del agua, vapor o aire dentro del medio poroso,  $C_{p_i}$  es la capacidad calorífica del componente  $i$ ,  $C_{p_w}$  es la calor específico del agua,  $C_w$  es la

concentración másica de agua,  $\lambda$  es el calor latente de vaporización,  $Q_{mic}$  es la potencia de las microondas absorbida por el alimento. Para el cálculo de  $Q_{mic}$  se utiliza una forma simplificada que está basada en la ley de Lambert que considera un decaimiento exponencial de la potencia en el interior del alimento y la dependencia de las propiedades dieléctricas con la humedad del material (Ni y col. 1999, Zhang y Datta, 2003, Rakesh y Datta, 2011).

Las propiedades físicas y térmicas efectivas para completar la formulación de la transferencia de energía están definidas como:

$$\rho_{eff} = (1 - \varepsilon)\rho_s + \varepsilon S_g \rho_g + \varepsilon S_w \rho_w \quad (9)$$

$$Cp_{eff} = (1 - \varepsilon)Cp_s + \varepsilon S_g \omega_v Cp_v + \varepsilon S_g \omega_a Cp_a + \varepsilon S_w Cp_w \quad (10)$$

$$k_{eff} = (1 - \varepsilon)k_s + \varepsilon S_g \omega_v k_v + \varepsilon S_g \omega_a k_a + \varepsilon S_w k_w \quad (11)$$

donde los subíndices  $w, v, a$  y  $g$  significan agua, vapor, aire y gas, respectivamente.

### 2.1.3 Evaporación-condensación

El término de cambio de fase se puede definir en términos de presión de vapor en el equilibrio ( $p_{v,eq}$ ) y la presión parcial del vapor ( $p_v$ ) en cualquier ubicación dentro del material poroso (Rakesh y Datta, 2011):

$$I = K_{mv} \frac{M_w}{RT} (p_{v,eq} - p_v) \quad (12)$$

donde  $R$  es la constante universal de los gases y  $K_{mv}$  es la constante de evaporación de no-equilibrio. La formulación de no-equilibrio describe los fenómenos físicos mejor y es también fácil de implementar en un software comercial, y también parece ser la alternativa obvia a los planteos convencionales en el equilibrio. Además algunos estudios experimentales han sido realizados para estimar la constante de la tasa de evaporación de no-equilibrio de alimentos (Zhang y col. 2005), no obstante no existen aún estimaciones precisas de la constante de evaporación de no-equilibrio para materiales higroscópicos. Halder y col. (2007) muestran que la formulación de evaporación de no-equilibrio se presenta como un enfoque mejorado y utilizando el análisis de sensibilidad puede estimarse un rango para la constante de tasa de evaporación de no equilibrio.

### 2.1.4 Condiciones de contorno

Durante la deshidratación con microondas en ciertos casos se puede observar un salida de agua líquida, dicho fenómeno se denomina “efecto de bombeo” (Ni y col. 1999). En el presente trabajo se considera válido el planteo en donde tiene lugar el flujo hacia el exterior de agua en forma líquida.

**Flujo de agua líquida saliente:**

$$n_w|_n = h_{mv} \varepsilon S_w (\rho_v - \rho_{v,ext}) + C_w u_w \quad (13)$$

**Flujo libre de vapor hacia el exterior:**

$$n_v|_n = h_{mv} \varepsilon S_g (\rho_v - \rho_{v,ext}) \quad (14)$$

donde  $h_{mv}$  es el coeficiente de transferencia de materia (vapor de agua).

**Flujo de calor convectivo y evaporativo en la superficie:**

$$q_n^| = h_{conv}(T - T_{ext}) - h_{mv} \varepsilon S_w \rho_v \lambda - h_{mv} \varepsilon (S_w + S_g) \rho_v C_{p_v} T - C_w u_w C_{p_w} T \quad (15)$$

donde  $h_{conv}$  es el coeficiente de transferencia de energía.

**Presión constante prescrita en la superficie:**

$$P_s = P_{ext} \quad (16)$$

**3 RESULTADOS Y DISCUSIÓN****3.1 Solución numérica**

Los balances obtenidos constituyen un sistema no lineal de ecuaciones diferenciales parciales altamente acopladas que fueron resueltas por medio de métodos numéricos usando el software comercial COMSOL Multiphysics que implementa el método de los elementos finitos (MEF).

Varios módulos fueron seleccionados con el propósito de construir de modelo completo en el software comercial. El módulo de “Convección y difusión” fue utilizado para resolver los balances de agua líquida ( $c_w$ ) mientras que el módulo de “Difusión y convección de Maxwell-Stefan” fue utilizado para calcular la fracción másica de vapor en la fase gaseosa ( $\omega_v$ ). El módulo de la “Ley de Darcy” y “Convección y conducción” fue usado para resolver la presión y la temperatura, respectivamente ( $p$  y  $T$ ).

El alimento cilíndrico fue considerado teniendo en cuenta una geometría 2D y el dominio fue discretizado en 1622 elementos triangulares (Figura 1).

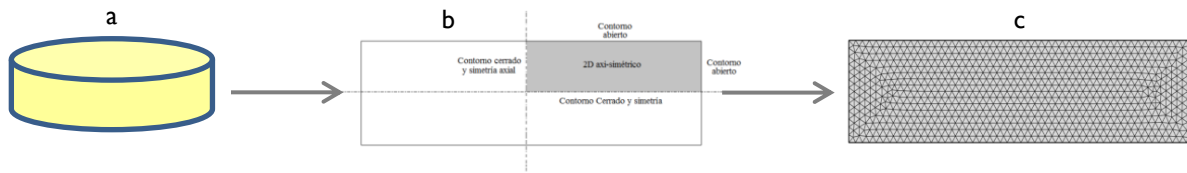


Figure 1: (a) Muestra cilíndrica, (b) parte de la muestra a ser simulada mostrando simetría lateral e inferior y (c) dominio discretizado utilizando el software COMSOL Multiphysics®.

Los cálculos computacionales usando el software COMSOL Multiphysics (versión 4.3) tomaron 131 segundos para alcanzar el tiempo de proceso final (300 segundos). De esta manera el programa computacional simula los perfiles de temperatura ( $T$ ), los perfiles de concentración de agua líquida ( $C_w$ ) y fracción másica de vapor de agua ( $\omega_v$ ) y la elevación de presión ( $P$ ) que se produce en el interior del alimento para cada paso de tiempo (0.1s).

Variable	Nombre	Valor [unidad]
$c_{w0}$	Concentración inicial de agua líquida (pera)	38900 [mol m <sup>-3</sup> ]
$\omega_{v0}$	Fracción másica inicial de vapor	0.01 [adimensional]
$T_0$	Temperatura inicial	22 [°C]
$P_0$	Presión inicial	101325 [Pa]
$H_{bs0}$	Humedad en base seca inicial	3.816 [adimensional]

Tabla 1: Valores iniciales utilizados en las simulaciones.

Variable	Nombre	Valor [unidad]
$\varepsilon$	Porosidad (pera)	0.88
$k_{wi}$	Permeabilidad intrínseca para el agua	$5 \times 10^{-14} \text{ [m}^2\text{]}$
$k_{gi}$	Permeabilidad intrínseca para el gas	$10 \times 10^{-14} \text{ [m}^2\text{]}$
$\eta_w$	Viscosidad dinámica del agua	$0.998 \times 10^{-3} \text{ [Pa s]}$
$\eta_g$	Viscosidad dinámica del gas	$1.8 \times 10^{-5} \text{ [Pa s]}$
$S_{ir}$	Saturación residual intrínseca	0.09 [adimensional]
$\rho_w$	Densidad del agua líquida	998 $\text{[kg m}^{-3}\text{]}$
$\rho_s$	Densidad del sólido	1530 $\text{[kg m}^{-3}\text{]}$
$\rho_v$	Densidad del vapor	Ecuación gases ideales $\text{[kg m}^{-3}\text{]}$
$\rho_a$	Densidad del aire	Ecuación gases ideales $\text{[kg m}^{-3}\text{]}$
$D_{g,eff}$	Coefficiente de difusión binaria del gas	$2.6 \times 10^{-6} \text{ [m}^2 \text{ s}^{-1}\text{]}$
$D_{w,eff}$	Coefficiente de difusión capilar del agua	$4.5 \times 10^{-7} \exp(-2.8+2.Hbs)**$
$h_{mv}$	Coefficiente de transferencia de vapor	0.011 $\text{[m s}^{-1}\text{]}$
$K_{mv}$	Const. de evaporación de no-equilibrio	1 $\text{[s}^{-1}\text{]}$
$h_{conv}$	Coefficiente de transferencia de calor	20 $\text{[W m}^{-2} \text{ K}^{-1}\text{]}$
$h_{evap}$	Calor latente de vaporización	$2.435 \times 10^6 \text{ [J kg}^{-1}\text{]}$
$C_{pw}$	Capacidad calorífica del agua líquida	4180 $\text{[J kg}^{-1} \text{ K}^{-1}\text{]}$
$C_{ps}$	Capacidad calorífica del sólido	1030 $\text{[J kg}^{-1} \text{ K}^{-1}\text{]}$
$C_{pv}$	Capacidad calorífica del vapor	2062 $\text{[J kg}^{-1} \text{ K}^{-1}\text{]}$
$C_{pa}$	Capacidad calorífica del aire	1006 $\text{[J kg}^{-1} \text{ K}^{-1}\text{]}$
$k_w$	Conductividad del agua líquida	0.57 $\text{[W m}^{-1} \text{ K}^{-1}\text{]}$
$k_s$	Conductividad del sólido	0.21 $\text{[W m}^{-1} \text{ K}^{-1}\text{]}$
$k_v$	Conductividad térmica del vapor	0.026 $\text{[W m}^{-1} \text{ K}^{-1}\text{]}$
$k_a$	Conductividad térmica del aire	0.026 $\text{[W m}^{-1} \text{ K}^{-1}\text{]}$
$T_{ext}$	Temperatura ambiente	22 $^{\circ}\text{C}$
$P_{ext}$	Presión ambiente	101325 $\text{[Pa]}$
$\rho_{v,ext}$	Densidad del vapor ambiente	0 $\text{[kg m}^{-3}\text{]}$
$P_{v,sat}$	Presión de saturación de vapor	Correlación de Antoine $\text{[Pa]}$
$P_{v,ep}$	Presión de saturación de vapor en el equilibrio	$P_{v,sat} \cdot \exp(-0.0267.Hbs^{(-1.656)} + 0.0107 \cdot \exp(-1.287.Hbs) \cdot Hbs^{(1.513)} \cdot \ln(P_{v,sat}) \text{ [Pa]**}$
$Q_{mic}$	Potencia de microondas absorbida	$Q_{mic0} \cdot (Hbs_0/Hbs)^{(-1.17)} \text{ [W m}^{-3}\text{]**}$
$Q_{mic0}$	Coefficiente para el cálculo de la potencia	$1.5 \times 10^7$

Tabla 2: Parámetros utilizados en las simulaciones computacionales.\*

\*Datos extraídos de: Ni y col. (1999); Halder y col. (2007); Datta (2007); Rakesh y Datta (2011); Rakesh y col. (2012).

\*\*Hbs0 y Hbs es la humedad en base seca al inicio y al tiempo t.

### 3.2 Simulación del proceso de deshidratación con microondas

En la Tabla 1 se muestran los valores iniciales de las variables simuladas, adicionalmente las propiedades físicas del alimento y parámetros específicos utilizados en las simulaciones se presentan en la Tabla 2.

Las Figura 2 y 3 presentan las distribuciones de temperatura y humedad predichas por el modelo matemático.

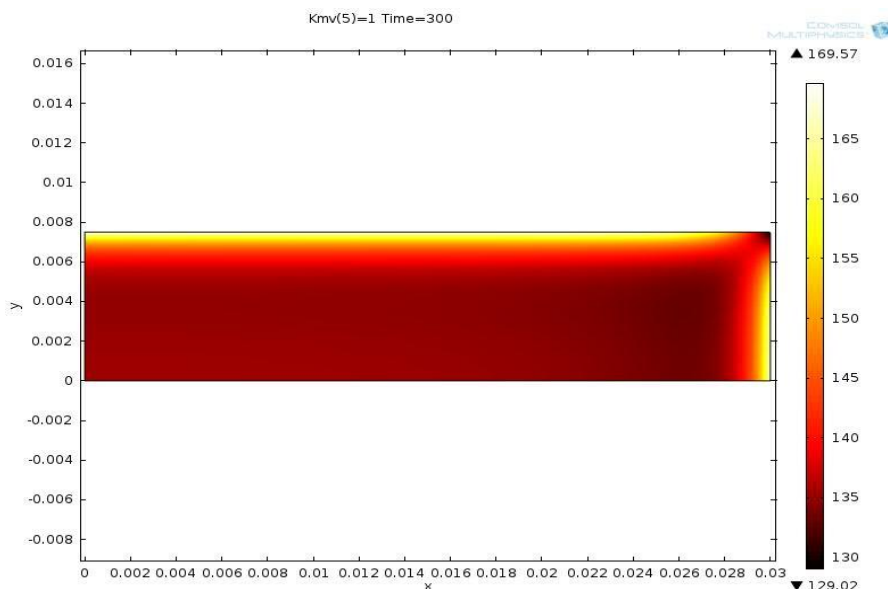


Figure 2: Perfiles de temperatura en el dominio 2D (alimento) luego de 300s de calentamiento con microondas.

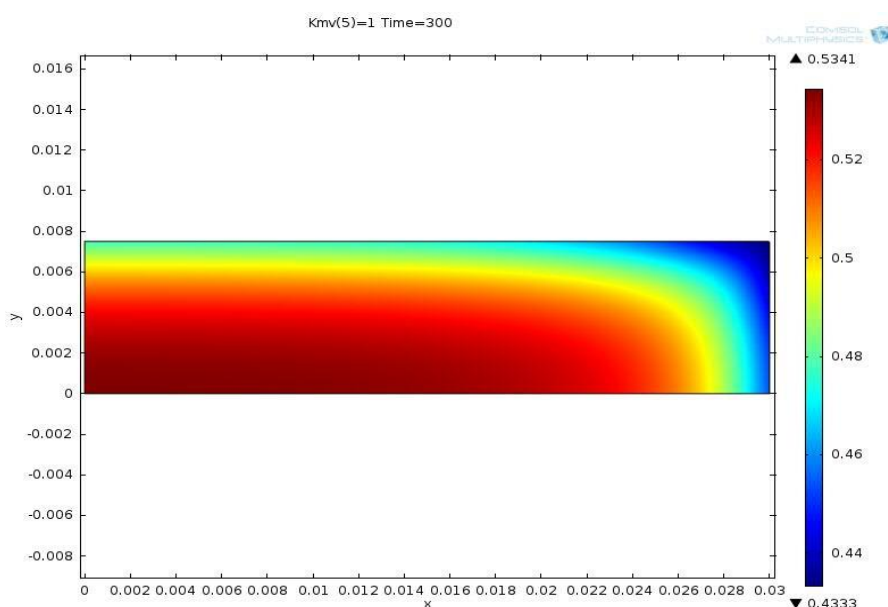


Figure 3: Distribución de concentración de agua líquida dentro del alimento después de 300s de deshidratación con microondas.

De acuerdo a la simulación realizada la muestra cilíndrica presenta una mayor temperatura en las caras expuestas a la radiación. La distribución de humedad indica una mayor



concentración de agua líquida en el centro de la muestra. En la Figura 4 se presenta la distribución de presiones, las cuales son consecuentes con la distribución de humedad. Esta variable está acoplada numéricamente tanto a la temperatura como a la humedad a través de las ecuaciones de transferencia de materia y energía.

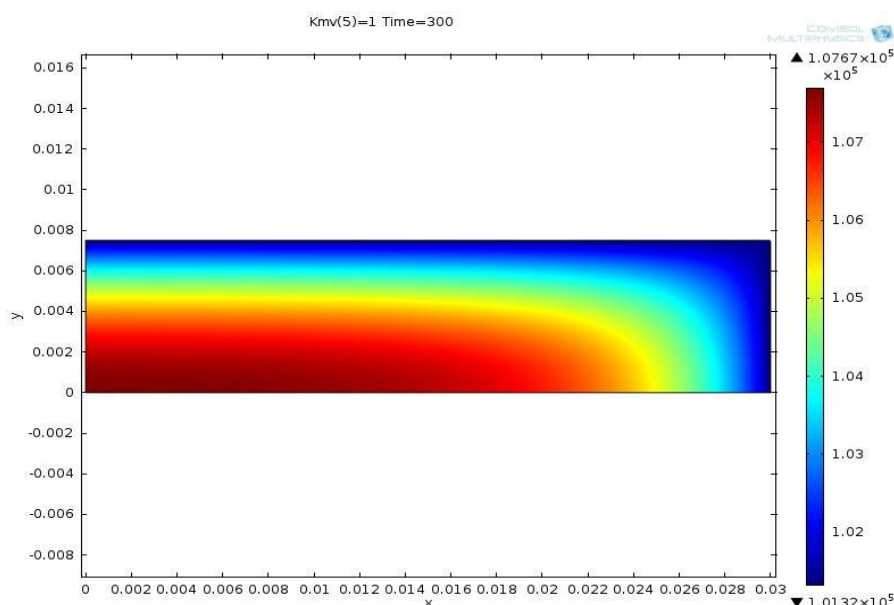


Figure 4: Perfiles de presión en el dominio 2D (alimento) luego de 300s de calentamiento con microondas.

Una de las variables importantes durante la deshidratación con microondas es la concentración de vapor. La Figura 5 muestra la distribución de vapor dentro de la muestra predicha y el movimiento del agua con flechas.

La condición de frontera abierta (Ec. 13) permite la salida del agua siguiendo el bombeo que provoca el desarrollo de presión interna.

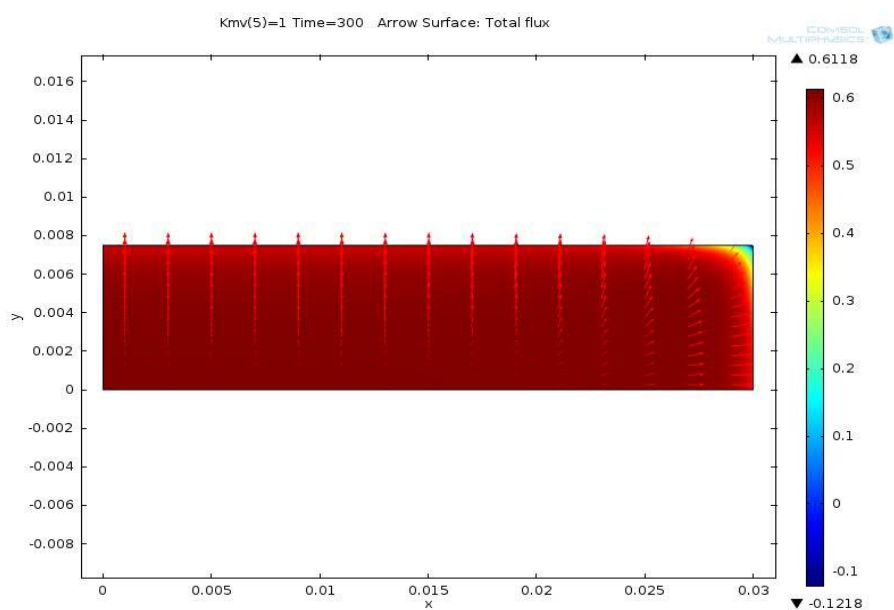


Figure 5: Perfiles de concentración de vapor de agua dentro del alimento después de 300s de calentamiento con microondas.

Por último el modelado matemático permite observar el comportamiento de la humedad y de la temperatura en el tiempo, a través de la integración en todo el dominio (Figuras 6 y 7). El modelo predice el descenso global de la humedad durante el proceso y con respecto a los perfiles de temperatura se presentan dos zonas bien definidas, un aumento brusco de temperaturas hasta alcanzar un plateau que describe la etapa de vaporización intensiva. Este comportamiento se ajusta a lo que ocurre experimentalmente durante este proceso como lo muestran trabajos previos (Boldor y col. 2005; Cui y col. 2005; Arballo y col. 2010).

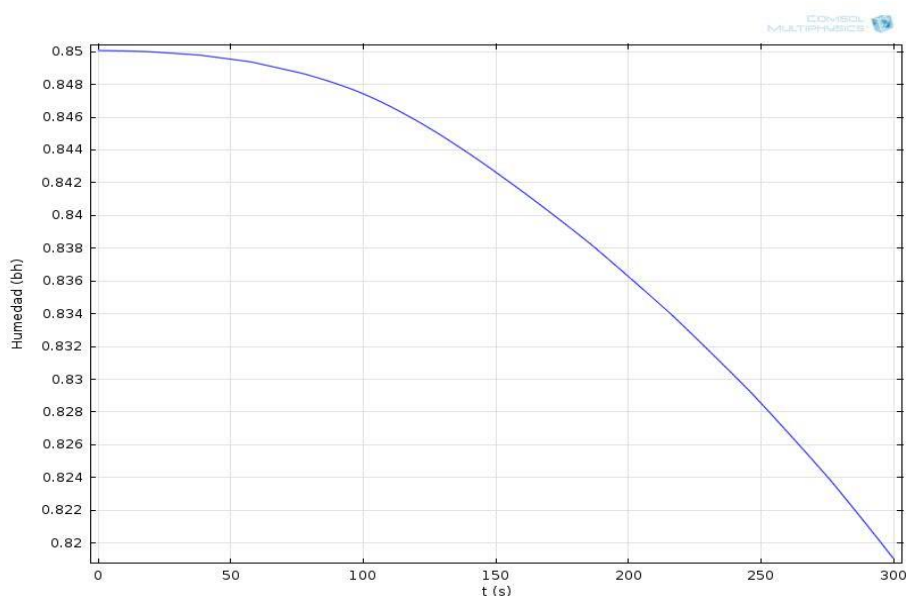


Figure 6: Evolución de la humedad en el centro de la muestra durante la deshidratación con microondas.

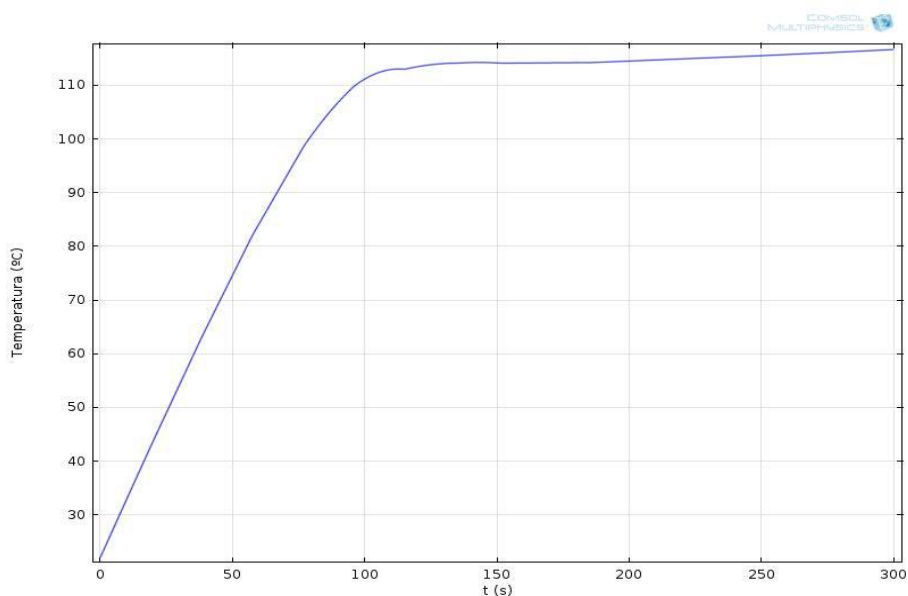


Figure 7: Evolución de la temperatura en el centro de la muestra durante la deshidratación con microondas.

Los resultados obtenidos muestran la potencialidad del modelo matemático desarrollado. Este modelo se puede emplear para estudiar el comportamiento de las variables relevantes de acuerdo a parámetros del sistema. Este modelo constituye una herramienta para la realización de estudios de sensibilidad.

En este sentido, se realizaron simulaciones con la variación de dos parámetros. Uno de ellos es la constante de evaporación de no equilibrio  $K_{mv}$ . El valor de la misma es muy variable y varios autores reportan datos en un rango muy amplio (Halder y col. 2007; Rakesh y Datta, 2011; Warning y col. 2012). De acuerdo a estos trabajos previos se seleccionaron los siguientes valores:  $1 \times 10^{-4}$ ,  $1 \times 10^{-3}$ ,  $1 \times 10^{-2}$ ,  $1 \times 10^{-1}$ , 1, 10 y 100  $[s^{-1}]$ .

En las Figuras 8 y 9 se muestran los valores integrados de humedad y de temperatura predichos. Con respecto a la humedad, se observa que a medida que aumenta este parámetro  $K_{mv}$  la humedad desciende significativamente. Sin embargo de acuerdo a los perfiles de temperatura obtenidos, este parámetro no puede adoptar cualquier valor dentro del rango, valores inferiores a  $1 \times 10^{-1}$  sobreestiman el valor de la temperatura.

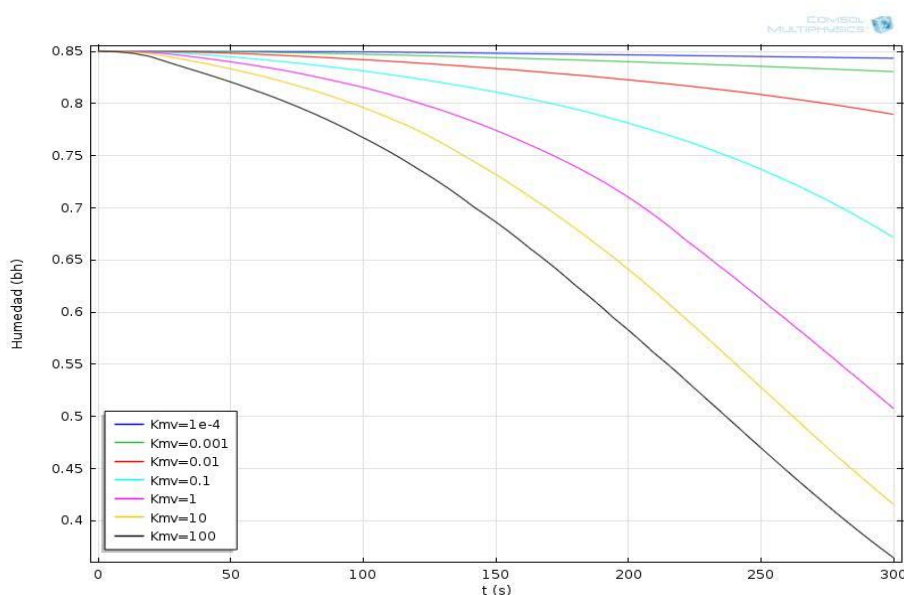


Figure 8: Humedad en función del tiempo de procesamiento con microondas. Funcionalidad del modelo con la constante de evaporación de no-equilibrio.

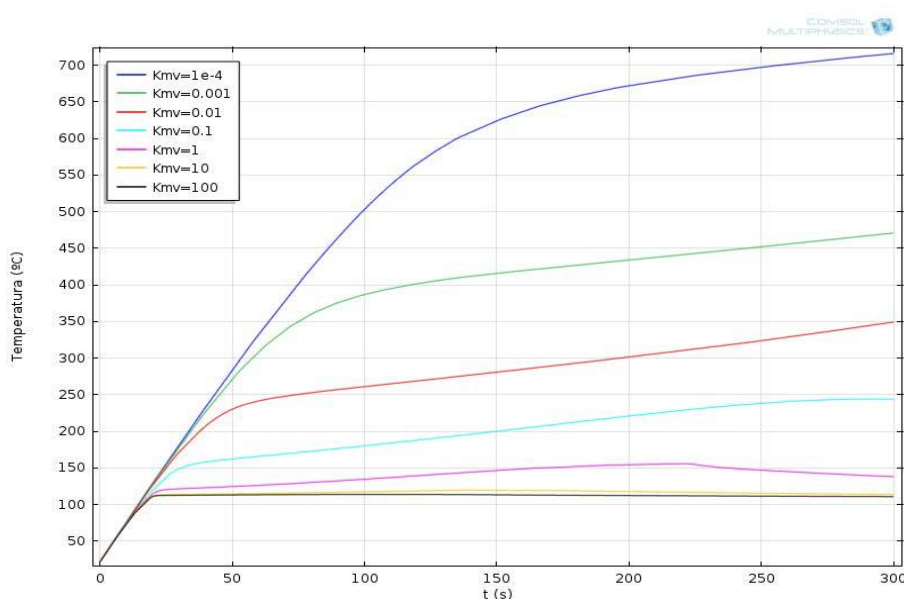


Figura 9: Temperatura en función del tiempo de procesamiento con microondas. Funcionalidad del modelo con la constante de evaporación de no-equilibrio.

De acuerdo a este análisis se pueden seleccionar los valores óptimos para parámetros que se presentan en literatura con cierta incerteza y variabilidad.

Por último se analizó la variación de la potencia absorbida por la interacción con la microondas (Figuras 10 y 11) a través de la variación de  $Q_{mic0}$ , en el siguiente rango de valores:  $1.5 \times 10^4$ ,  $1.5 \times 10^5$ ,  $1.5 \times 10^6$ ,  $3.0 \times 10^6$ ,  $4.5 \times 10^6$ ,  $7.5 \times 10^6$  y  $1.5 \times 10^7$  W/m<sup>3</sup>.

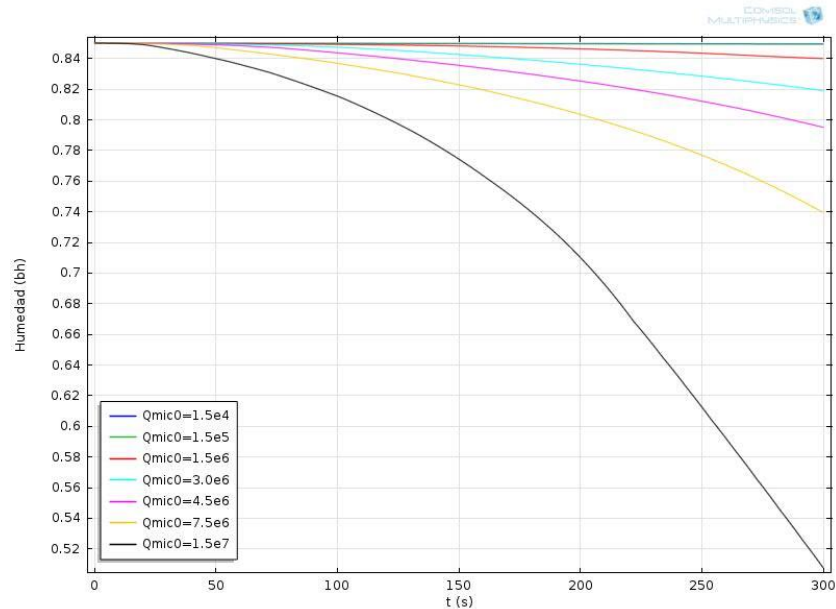


Figura 10: Humedad en función del tiempo de procesamiento con microondas. Funcionalidad del modelo con la potencia de microondas absorbida.

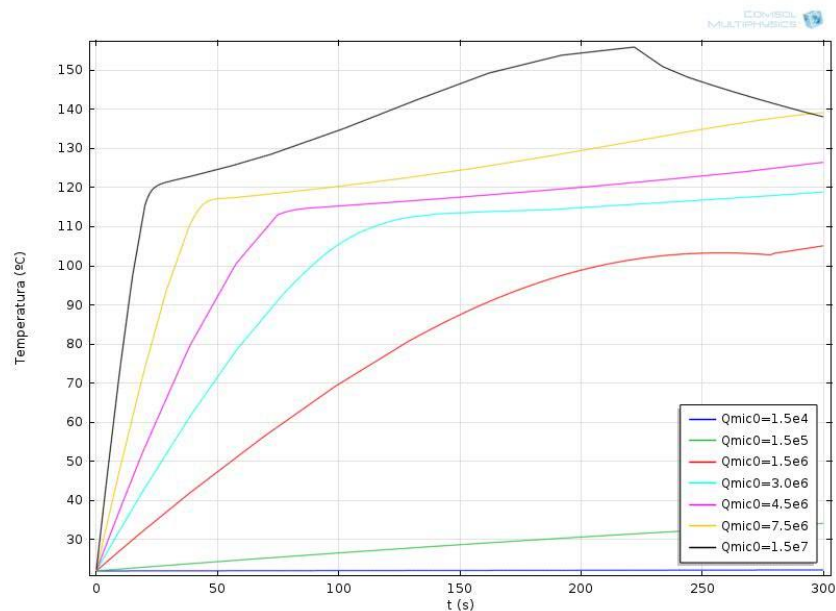


Figura 11: Temperatura en función del tiempo de procesamiento con microondas. Funcionalidad del modelo con la potencia de microondas absorbida.

Nuevamente, a medida que aumenta el valor de este parámetro, los perfiles de humedad caen significativamente. Esto se debe a que un valor más alto implica una mayor absorción de energía y una mayor vaporización. Los perfiles de temperatura son muy sensibles a este parámetro. Valores entre  $1.5 \times 10^4$  y  $1.5 \times 10^5$  solo provocan calentamiento de la muestra, a partir de  $1 \times 10^6$  la muestra comienza a mostrar vaporización intensa.

Este análisis se puede realizar con otros parámetros de interés. En este caso nos brinda información acerca de valores posibles para simular la deshidratación de la muestra que pueda llevar a realizar una optimización de las condiciones de proceso.

#### 4 CONCLUSIÓN

Un modelo matemático completo ha sido desarrollado para la predicción simultánea de los perfiles de temperatura, humedad, producción de vapor y elevación de presión durante el proceso de deshidratación con microondas. El modelo completo obtenido utilizando el enfoque mecanístico provee un mayor entendimiento de los complejos fenómenos que están involucrados en el proceso de deshidratación con microondas. El análisis de sensibilidad tanto de la constante de evaporación de no-equilibrio como la potencia absorbida nos permitió encontrar un rango de valores adecuados para simular la deshidratación con microondas de alimentos.

#### REFERENCES

- Arballo, J.R., Campañone, L.A., y Mascheroni, R.H., Modelling of microwave drying of fruits. *Drying Technology*, 28:1178-1184, 2010.
- Benloch-Tinoco, M., Igual, M., Rodrigo, D., y Martínez-Navarrete, N., Comparison of microwaves and conventional thermal treatment on enzymes activity and antioxidant capacity of kiwifruit puree. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 19:166-172, 2013.
- Boldor, D., Sanders, T.H., Swartzel, K.R., y Farkas, B.E., A model for temperature and moisture distribution during continuous microwave drying. *Journal of Food Process Engineering*, 28:68-87, 2005.
- Campañone, L.A., y Zaritzky, N.E., Mathematical Analysis of Microwave Heating Process. *Journal of Food Engineering*, 69(3):359-368, 2005.
- Chowdhury, B. D., Halder, D., Dutta, T. K., y Ghosh, A. K., Effect of microwave heating on microbial inactivation and vitamin C retention of simulated liquid food sample. *Journal of Food Research and Technology*, 1(2):80-86, 2013.
- Cui, Z-W., Xu, S-Y., Sun, D-W., y Chen, W., Temperature changes during microwave-vacuum drying of sliced carrots. *Drying Technology*, 23:1057-1074, 2005.
- Datta, A.K., y Anantheswaran, R.C. *Handbook of Microwave Technology for Food Applications*. Marcel Dekker, USA, 2001.
- Datta, A.K., Porous media approach to studying simultaneous heat and mass transfer in food processes. I: Problem formulation. *Journal of Food Engineering*, 80:80-95, 2007.
- Dinčov, D.D., Parrott, K.A., y Pericleous, K.A., Heat and mass transfer in two-phase porous materials under intensive microwave heating. *Journal of Food Engineering*, 65:403-412, 2004.
- Halder, A., Dhall, A., y Datta, A.K., An improved, easily implementable, porous media based model for deep-fat frying – Part II: Results, Validation and Sensitivity Analysis. *Food and Bioproducts Processing*, 85:220-230, 2007.
- Liu, S., Ogiwara, Y., Fukuoka, M., y Sakai, N., Investigation and modeling of temperature

- changes in food heated in a flatbed microwave oven. *Journal of Food Engineering*, 131:142-153, 2014.
- Marra, F., De Bonis, M.V., y Ruocco, G., Combined microwaves and convection heating: A conjugate approach. *Journal of Food Engineering*, 97:31–39, 2010.
- Ni, H., Datta, A.K., y Torrence, K.E., Moisture transport in intensive microwave heating of biomaterials: a multiphase porous media model. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 42:1501-1512, 1999.
- Rakesh, V., y Datta, A.K., Microwave puffing: Determination of optimal conditions using a coupled multiphase porous media – Large deformation model. *Journal of Food Engineering*, 107:152-163, 2011.
- Rakesh, V., Datta, A.K., Walton, J.H., McCarthy, K.L., y McCarthy, M.J., Microwave combination heating: coupled electromagnetics-multiphase porous media modeling and MRI experimentation. *AIChE Journal*, 58(4):1262-1278, 2012.
- Salagnac, P., Glouannec, P., y Lecharpentier, D., Numerical modeling of heat and mass transfer in porous medium during combined hot air, infrared and microwaves drying. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 47:4479–4489, 2004.
- Sanga, E.C.M., Mujumdar, A.S., y Raghavan, G.S.V., Simulation of convection-microwave drying for a shrinking material. *Chemical Engineering and Processing*, 41:487–499, 2002.
- Warning, A., Dhall, A., Mitrea, D., y Datta, A.K., Porous media based model for deep-fat vacuum frying potato chips. *Journal of Food Engineering*, 110:428-440, 2012.
- Whitaker, S., Simultaneous heat, mass and momentum transfer in porous media: a theory of drying. *Advance in Heat Transfer*, 13:119-203, 1977.
- Xanthakis, E., Le-Bail, A., y Ramaswamy, H., Development of an innovative microwave assisted food freezing process. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 2014, in press: DOI: 10.1016/j.ifset.2014.04.003.
- Zhang, H. y Datta, A.K., 2003. Microwave power absorption in single- and multiple-item foods. *Food and Bioproducts Processing*, 81(3):257–265, 2003.
- Zhang, J., Datta, A.K. y Rakesh, V., Investigation of non-equilibrium in water evaporation, *3rd Inter-American Drying Conference*, Montreal, Canada, 2005.