

DETERMINACIÓN DE LOS PARÁMETROS DE TRANSFERENCIA DE CALOR DURANTE EL CALENTAMIENTO DEL LOCHE (*Cucurbita moschata Duchesne*) UTILIZANDO SOLUCIONES NUMÉRICAS Y ANALÍTICAS

DETERMINATION OF HEAT TRANSFER PARAMETERS DURING HEATING OF LOCHE (*Cucurbita moschata Duchesne*) USING NUMERICAL AND ANALYTICAL SOLUTIONS

Julio Mauricio Vidaurre-Ruiz¹
Jackson Steward Castañeda-Muñoz²

Resumen

El loche (*Cucurbita moschata Duchesne*) es una variedad de zapallo oriundo del departamento de Lambayeque – Perú, cuya forma de comercialización más común es en estado fresco, pero existe una demanda creciente de mercado de poder extender el tiempo de vida útil del producto, por lo tanto resulta importante determinar los parámetros de transferencia de calor para el correcto diseño de los métodos de conservación. El objetivo de la investigación fue determinar el coeficiente de transferencia de calor (h) y difusividad térmica (α) durante el calentamiento del loche, utilizando el método numérico de elementos finitos así como proponer un método para determinar el valor de difusividad térmica efectiva utilizando la solución analítica en 3D. Se cortaron cubos de loches de 2x2x2 cm los cuales fueron sumergidos en baño maría a 90°C por un tiempo de 600 s. Los registros de temperatura fueron promediados y comparados con las simulaciones realizadas por elementos finitos, con la finalidad de obtener la suma de cuadrados del error (RMSE), estos valores se optimizaron mediante la técnica de superficie respuesta, encontrando que el mínimo valor optimizado de RMSE fue de 0.636, el cual se logra con la combinación de α : 1.47×10^{-7} m²/s y h : 4000 W/m²°C, ajustando los datos experimentales apropiadamente ($R^2 = 0.915$). Utilizando la solución analítica, se encontró que el coeficiente de transferencia de calor fue de 3856 ± 73 W/m² °C y con el método propuesto se encontró un valor promedio de difusividad térmica efectiva de 1.439×10^{-7} m²/s. Los valores encontrados tanto por las soluciones numéricas como analíticas fueron muy similares, siendo éste último método fácil de aplicar, ya que solamente se necesita conocer la curva de calentamiento del alimento.

Palabras claves: Loche, difusividad térmica, coeficiente de transferencia de calor.

Abstract

The loche (*Cucurbita moschata Duchesne*) is a variety of pumpkin native of department of Lambayeque - Peru, the most common form of commercialization is fresh, but there is an increasing market demand to extend the shelf life of the product, it is therefore important to determine the heat transfer parameters for the correct design of conservation methods. The aim of the research was to determine the heat transfer coefficient (h) and thermal diffusivity (α) during heating of loche using the finite element method and propose a method for determining the value of effective thermal diffusivity using the 3D analytical solution. Cubes of 2x2x2 cm were

¹ Adscrito a la Escuela de Ingeniería Industrial, Facultad de Ingeniería, Arquitectura y Urbanismo, Ingeniero en Industrias Alimentarias, Universidad Señor de Sipán, Pimentel, Perú. jvidaurre@crece.uss.edu.pe

² Adscrito a la Escuela de Ingeniería Industrial, Facultad de Ingeniería, Arquitectura y Urbanismo, Estudiante del VIII ciclo, Universidad Señor de Sipán, Pimentel, Perú. cmunozj@crece.uss.edu.pe

immersed in water bath at 90 ° C for a period of 600 s. Temperature records were averaged and compared with simulations by finite elements, in order to obtain the sum of squares error (RMSE), these values were optimized using the technique of surface response, finding the minimum optimized value of RMSE was 0.636, which is achieved with the combination of α : $1.47 \times 10^{-7} \text{ m}^2$ and h : $4000 \text{ W/m}^2\text{C}$, the experimental data appropriately adjusting ($R^2 = 0.915$). Using the analytic solution, it was found that the heat transfer coefficient was $3856 \pm 73 \text{ W / m}^2 \text{ }^\circ \text{C}$ and by the proposed method an average value of effective thermal diffusivity of $1.439 \times 10^{-7} \text{ m}^2 / \text{s}$ was found. The values found by the numerical and analytical solutions were very similar, the latter being easy to apply, since only needs know the heating curve of the food.

Keywords: *Loche, thermal diffusivity, heat transfer coefficient.*

1. Introducción

El loche es una variedad de zapallo oriundo del departamento de Lambayeque – Perú. Pertenece a la familia de las cucurbitáceas, donde también se incluyen las calabazas, melones, pepinos y sandías, y se caracteriza por poseer verrugas en su corteza y pulpa de color amarillo sin la presencia de pepas (INDECOPI, 2010). Es utilizado en la preparación de comidas típicas en la zona norte del Perú.

Actualmente la forma de comercialización del loche es en estado fresco, pero existe una demanda creciente de poder obtener el producto durante todo el año, por lo tanto los métodos de conservación como: esterilización, secado y congelación, previo escaldado, son alternativas para extender el tiempo de vida útil de éste alimento.

Para diseñar los procesos que involucran transferencia de calor es necesario determinar algunos parámetros, como son la difusividad térmica (α) y el coeficiente de transferencia de calor (h) (Erdoğdu, 2008). La difusividad térmica indica la rapidez con la que el calor se propaga a través de un alimento durante el calentamiento o enfriamiento (Rahman y Al-Saidi, 2009), ésta propiedad depende básicamente de la composición del alimento y de la temperatura del proceso (Erdoğdu, 2008). Por otro lado, el coeficiente de transferencia de calor se utiliza para cuantificar la tasa de transferencia de calor convectivo, desde el medio hacia la superficie de un objeto (Sablani, 2009), éste parámetro depende de las propiedades térmicas y físicas del medio, las características del producto (tamaño, forma, temperatura de la superficie y rugosidad de la superficie), las características de flujo del fluido (velocidad y turbulencia) y la capacidad del equipo para transferir el calor (Zheng *et al.*, 2009).

Diversas investigaciones determinan los parámetros de transferencia de calor efectivos por optimización, simulando el proceso de calentamiento a diferentes condiciones, utilizando diversos métodos numéricos, siendo los más conocidos el método de diferencias finitas, elementos finitos y volumen finito (Wang y Sun, 2003). El método de elementos finitos, ha tomado popularidad en la simulación de transferencia de calor, debido a la flexibilidad en el manejo de la variación espacial de las propiedades del material (por ejemplo, composición del alimento), formas y regiones irregulares, además existen en el mercado, programas comerciales que pueden realizar la simulación (Martins *et al.*, 2008; Puri y Anantheswaran, 1993).

Recientes investigaciones, proponen el uso de las soluciones analíticas de transferencia de calor para formas regulares como placa infinita, cilindro infinito y esfera, para la determinación experimental de los parámetros de transferencia de calor, utilizando los datos de penetración de calor del alimento, pero muchas veces para poder aplicarlas se hacen uso de ciertas asunciones que pueden hacer variar los resultados (Yıldız *et al.*, 2007; Erdoğdu, 2005).

Una forma experimental de determinar el coeficiente de transferencia de calor por convección es utilizando forma geométricas definidas de materiales altamente conductivos como el aluminio o el cobre para provocar un estado cuasi estacionario y lograr que la resistencia interna a la transferencia de calor sea despreciable (Sablani, 2009). Aunque esta técnica es la más utilizada, tiene sus limitaciones cuando se quiere determinar el coeficiente de transferencia de calor para formas irregulares y de grandes tamaños, debido a que resulta muy difícil la construcción de estos modelos físicos con los mencionados metales (Erdoğdu, 2008; 2005).

Debido al potencial agroexportador que tiene esta materia prima, resulta importante determinar los diversos parámetros ingenieriles para el correcto diseño de los procesos, es por ello que el presente trabajo tiene por objetivos determinar el coeficiente de transferencia de calor y difusividad térmica, durante el calentamiento del loche, utilizando la solución numérica de elementos finitos y proponer un nuevo método para determinar el valor de difusividad térmica, utilizando la solución analítica.

2. Materiales y métodos

2.1 Acondicionamiento de la materia prima

Se adquirieron loches del mercado local de la ciudad de Chiclayo, los cuales fueron almacenados a temperatura ambiente antes de ser procesados y se determinó el contenido de humedad, por triplicado, según el método (AOAC – 950.46). Los loches fueron pelados manualmente con ayuda de un cuchillo de acero inoxidable y utilizando un vernier se cortaron cubos de pulpa de loche de 2x2x2 cm. Se utilizó una termocupla de punta tipo K (TPK – 03S / TECPEL®) la cual fue incrustada hasta el punto céntrico geométrico de cada cubo de loche y otra termocupla de bola tipo K (TPK – 01S / TECPEL®) la cual se mantuvo sumergida en el medio de calentamiento, ambas termocuplas estuvieron conectadas a un datalogger (DTM – 5074/ TECPEL®) y éste a la vez conectado a un ordenador personal.

2.2 Proceso de calentamiento

Los cubos de loche fueron sumergidos por un tiempo diez minutos en baño maría sin agitación (CDK – S24 / Tom' S-USA Science – Tech Group) de diez litros de capacidad a 90 ± 0.5 °C, y se tomaron los registros de temperatura por cada segundo, tanto en el centro geométrico de los cubos de loche, así como en el medio de calentamiento.

2.3 Solución numérica por elementos finitos

El proceso de calentamiento del loche, puede ser descrito por la transferencia de calor en estado no estacionario por conducción y convección. Donde el calor se transfiere desde los alrededores del medio de calefacción a la superficie del producto por convección y dentro del producto por conducción (Chamorro y Vidaurreta, 2012).

Según Chamorro y Vidaurreta, (2012), Lespinard *et al.*, (2009), Fasina y Fleming, (2001), la ecuación diferencial de transferencia de calor en tres dimensiones para calcular el tiempo de calentamiento en estado no estacionario es:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \alpha \cdot \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) \quad (1)$$

Donde las condiciones iniciales y de fronteras son:

$$t = 0 \quad T = T_0 \text{ en todo el producto} \quad (2)$$

$$t > 0 \quad x = L/2 \quad h \cdot (T_f - T) = k \cdot \frac{\partial T}{\partial x} \quad (3)$$

$$y = M/2 \quad h \cdot (T_f - T) = k \cdot \frac{\partial T}{\partial y} \quad (4)$$

$$z = N/2 \quad h \cdot (T_f - T) = k \cdot \frac{\partial T}{\partial z} \quad (5)$$

$$t > 0 \quad x = 0 \quad \frac{\partial T}{\partial x} = 0 \quad (6)$$

$$y = 0 \quad \frac{\partial T}{\partial y} = 0 \quad (7)$$

$$z = 0 \quad \frac{\partial T}{\partial z} = 0 \quad (8)$$

Donde:

- α : Difusividad térmica del producto (m^2/s)
- k : Conductividad térmica ($\text{W}/\text{m} \text{ } ^\circ\text{C}$)
- T : Temperatura del producto ($^\circ\text{C}$)
- T_0 : Temperatura inicial del producto ($^\circ\text{C}$)
- T_f : Temperatura en el medio
- x, y, z : Coordenadas ortogonales
- t : Tiempo (s)
- L : Longitud del producto en la dirección x (m)
- M : Longitud del producto en la dirección y (m)
- N : Longitud del producto en la dirección z (m)
- h : Coeficiente de transferencia de calor por convección ($\text{W}/\text{m}^2 \text{ } ^\circ\text{C}$)

La solución de la ecuación (1), puede desarrollarse por métodos analíticos o numéricos, las cuales dan paso a la simulación del proceso (Palazoğlu y Erdoğan, 2008). En esta investigación se utilizó el método numérico de elementos finitos, cuya simulación se realizó en el programa Autodesk® Simulation Multiphysics, utilizando diversas condiciones de los parámetros de transferencia de calor.

2.4 Determinación de los parámetros de transferencia de calor por optimización

Se utilizó la técnica estadística de superficie respuesta, con ayuda del programa estadístico Statgraphics® centurión XVI.I, donde se incorporaron los parámetros mínimos y máximos posibles del coeficiente de transferencia de calor ($1000 - 4000 \text{ W}/\text{m}^2\text{ } ^\circ\text{C}$) y difusividad térmica ($1.45 \times 10^{-7} - 1.7 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$), generando una serie de combinaciones aleatorias (Tabla 1), las cuales fueron probadas en la simulación por elementos finitos.

Tabla 1

Combinaciones de los parámetros de transferencia de calor para la simulación.

Simulación	Difusividad térmica (m^2/s)	Coeficiente de transferencia de calor ($\text{W}/\text{m}^2\text{ } ^\circ\text{C}$)
1	1.57×10^{-7}	2500
2	1.45×10^{-7}	1000
3	1.57×10^{-7}	1000
4	1.70×10^{-7}	1000

5	1.45 x 10 ⁻⁷	2500
6	1.57 x 10 ⁻⁷	2500
7	1.70 x 10 ⁻⁷	2500
8	1.45 x 10 ⁻⁷	4000
9	1.57 x 10 ⁻⁷	4000
10	1.70 x 10 ⁻⁷	4000
11	1.57 x 10 ⁻⁷	2500

Fuente: Statgraphics® centurión XVI.I

Los parámetros de transferencia de calor fueron determinados por optimización del mínimo valor de la raíz media de la suma de cuadrados del error (RMSE).

2.5 Determinación de la difusividad térmica efectiva utilizando la solución analítica

Para determinar el valor de difusividad térmica efectiva, se propone en esta investigación un nuevo método, el cual utiliza el perfil real de calentamiento del alimento. Éste método se basa en el procedimiento descrito por Erdoğan (2008; 2005), el cual consiste en linealizar la ecuación analítica de transferencia de calor en 3D, utilizando el primer término de la ecuación (Ec. 09). Para tal efecto, se seleccionó la porción de la recta que tenía el más elevado valor del coeficiente de determinación (R^2) y se calculó el valor de (α) remplazando los valores conocidos en la pendiente de la recta (Ec. 10). La nueva propuesta se describe a continuación:

Según Yanniotis (2008) la solución analítica de la ecuación de Fourier en 3D resulta de la intersección de tres placas infinitas y cuando se considera la resistencia superficial a la transferencia de calor como despreciable, ésta se puede representar como:

$$\frac{T_{x,y,z} - T_e}{T_0 - T_e} = \left(\frac{4}{\pi} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{(-1)^n}{2n+1} \cos\left(\frac{(2n+1)\pi x}{2L}\right) \exp\left(-\frac{(2n+1)^2 \pi^2}{4} Fo\right) \right)^3 \quad (9)$$

Donde:

- T_e : Temperatura del medio exterior (°C)
- $T_{x,y,z}$: Temperatura del producto en el nodo x,y,z (°C)
- T_0 : Temperatura inicial del producto (°C)
- n : Términos de la ecuación
- L : Mitad de la longitud característica en una placa infinita (m)
- x : Distancia adimensional (para el centro es cero)
- Fo : Número de Fourier ($Fo = \frac{\alpha t}{L^2}$)
- α : Difusividad térmica del producto (m²/s)

Considerando sólo el primer término de la ecuación, la Ec. (9) se puede escribir como:

$$\frac{T_{x,y,z} - T_e}{T_0 - T_e} = \left(\frac{4}{\pi} \cos\left(\frac{\pi x}{2L}\right) \exp\left(-\frac{\pi^2 \alpha t}{4 L^2}\right) \right)^3 \quad (10)$$

$$\frac{T_{x,y,z} - T_e}{T_0 - T_e} = A \left(\exp\left(-\frac{\pi^2 \alpha t}{4 L^2}\right) \right)^3 \quad (11)$$

Donde A es definido por la siguiente ecuación:

$$A = \left(\frac{4}{\pi} \cos \left(\frac{\pi x}{2L} \right) \right)^3 \quad (12)$$

Linealizando la Ec. (11) tenemos:

$$\ln \left(\frac{T_{x,y,z} - T_e}{T_0 - T_e} \right) = \ln A - \frac{3\pi^2 \alpha t}{4 L^2} \quad (13)$$

2.6 Determinación experimental del coeficiente de transferencia de calor (h)

Se fabricaron piezas cúbicas de 2x2x2 cm de aluminio y se sumergieron por diez minutos en baño maría sin agitación a 90 °C y se tomaron los registros de temperatura en el centro geométrico de la pieza de aluminio. Se obtuvo el valor de la pendiente de la recta del $\ln [(T - T_\infty) / (T_i - T_\infty)]$ en función del tiempo (t) y se calculó el valor del coeficiente de transferencia de calor, considerando las propiedades físicas y térmicas de la pieza del aluminio, mediante la siguiente ecuación.

$$\frac{T - T_\infty}{T_i - T_\infty} = \exp \left[- \frac{hAt}{\rho V cp} \right] \quad (14)$$

2.7 Análisis estadístico

La bondad del ajuste de los datos experimentales con los datos simulados por elementos finitos según las combinaciones propuestas en la Tabla 1, se midieron utilizando el estadístico RMSE, el cual se denota como:

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (X_p - X_e)^2} \quad (15)$$

Donde

- X_p : Valor de temperatura predicho por la simulación
- X_e : Valor de temperatura experimental
- n : Número de datos de temperatura

Para el análisis estadístico de superficie respuesta, se utilizó un diseño factorial de 32 con dos puntos centrales y se realizó un análisis de varianza (ANVA) para determinar la

significancia de los parámetros de transferencia de calor y se obtuvo el valor óptimo, mediante un modelo de segundo orden, con un nivel de significancia del 0.05.

3. Resultados

3.1 Determinación de los parámetros de penetración de calor utilizando elementos finitos.

El contenido de humedad promedio de la pulpa de loche fue de $75.72\% \pm 0.972$. Este valor es similar al reportado por Reyes *et al.* (2010) y Collazos *et al.* (1996).

Se obtuvieron un total de 12 cubos de pulpa loche de $2 \times 2 \times 2$ cm adquiriendo los perfiles de temperatura por 600 s. La temperatura del medio se mantuvo estable durante el proceso de calentamiento a $90^\circ\text{C} \pm 0.5$. Todos los registros centrales de temperaturas fueron promediados y se compararon con las simulaciones por elementos finitos, con las condiciones de difusividad térmica y coeficiente de transferencia de calor, anteriormente mencionadas (Figura 1).

Utilizando la Ec. (15), se obtuvieron los valores de RMSE para cada perfil de temperatura simulada con el valor promedio experimental, como se muestra en la Tabla 2.

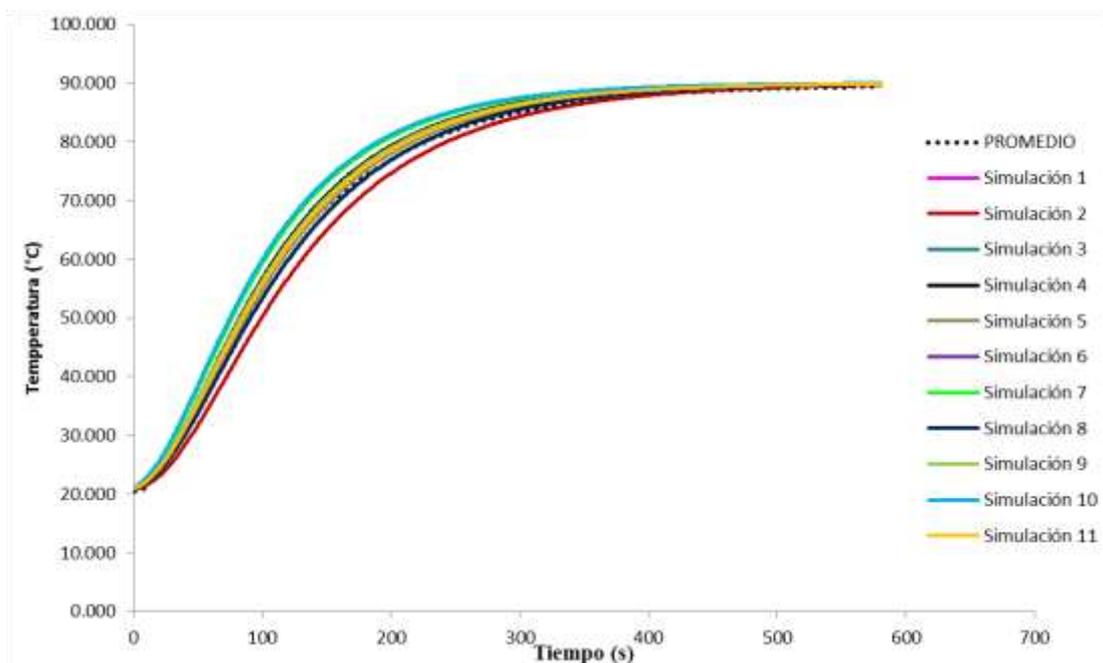


Figura 1. Simulaciones de transferencia de calor, utilizando diferentes condiciones de difusividad térmica y coeficiente de transferencia de calor

Tabla 2.

Valores de MRSE para cada simulación por elementos finitos

Simulación	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
MRSE	0.739	2.206	0.752	1.459	0.739	0.987	2.665	0.764	1.268	2.987	0.739

Fuente: *Elaboración propia*

El mínimo valor encontrado de MRSE fue de 0.739 que corresponde a la simulación realizada con una difusividad térmica de $1.575 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$ y un valor de coeficiente de transferencia de calor de $2500 \text{ W/m}^2\text{°C}$. La optimización de los mencionados parámetros, se obtuvo mediante la técnica de superficie respuesta, donde se encontró que el mínimo valor optimizado de MRSE fue de 0.636, el cual se logra con la combinación del valor de difusividad térmica de $1.47 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$, y un coeficiente de transferencia de calor de $4000 \text{ W/m}^2\text{°C}$ (Figura 02), logrando así un buen ajuste con los datos experimentales, como se muestra en la Figura 3. La simulación por elementos finitos con los parámetros óptimos nos permitió observar el cambio de temperatura durante el calentamiento del loche a diferentes intervalos de tiempo como se muestra en la Figura 4.

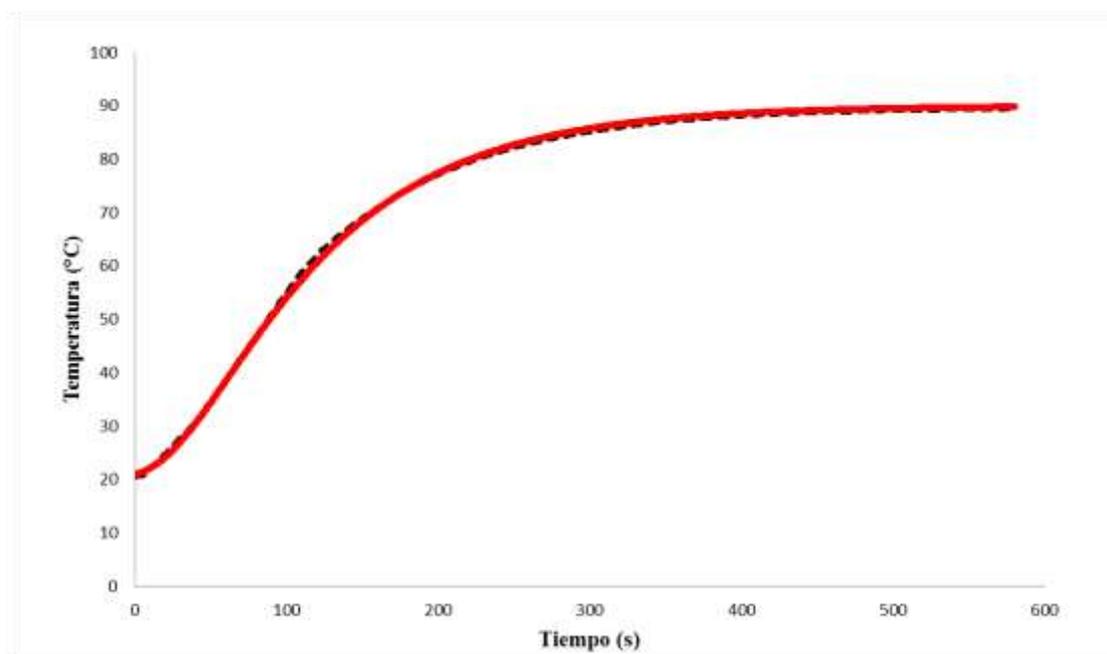


Figura 3. *Transferencia de calor de cubos de loche. (--- Valores experimentales promedios; — Simulación óptima)*

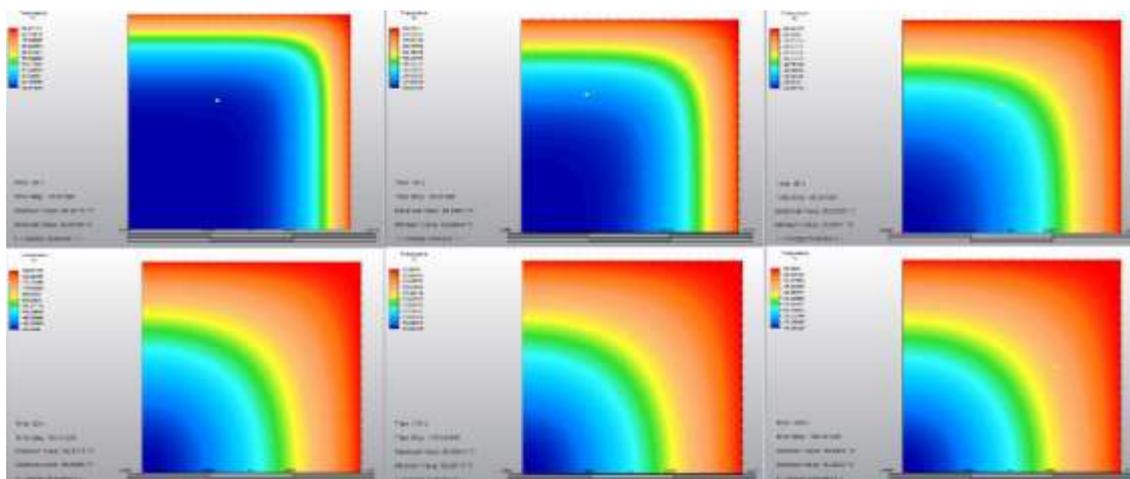


Figura 4. Simulación del perfil de temperatura de calentamiento del loche por elementos finitos

Fuente: Autodesk® Simulation Multiphysics

La ecuación de regresión encontrada para el ajuste de los valores experimentales fue de segundo orden (Ec. 10) con un elevado coeficiente de determinación ($R^2=0.915$).

$$RMSE = 133.831 - 1.633 \times 10^9 \cdot \alpha - 0.006 \cdot h + 5.013 \times 10^{15} \cdot \alpha^2 + 39599.800 \cdot \alpha \cdot h + 4.045 \times 10^{-8} \cdot h^2 \quad (16)$$

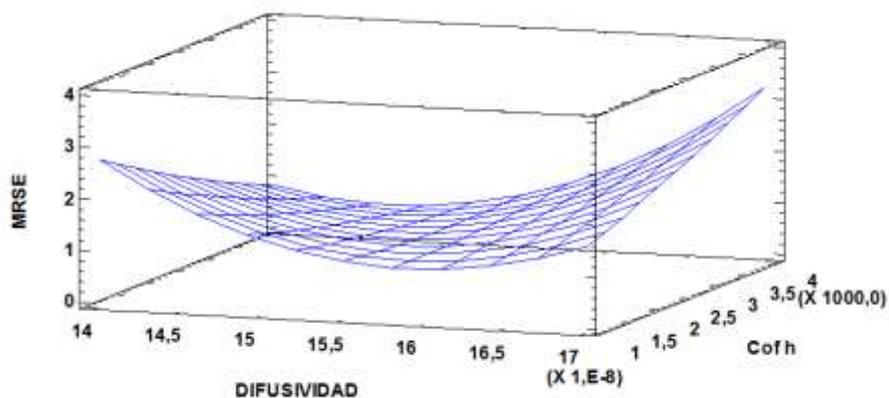


Figura 2. Gráfico de superficie respuesta de los valores de MRSE

Fuente: Statgraphics® centurión XVI.I

3.2 Determinación de los parámetros de penetración de calor utilizando soluciones analíticas

Utilizando la solución analítica, se encontró que el coeficiente de transferencia de calor para la pieza cúbica de aluminio de 2x2x2 cm fue de $3856 \pm 73 \text{ W/m}^2 \cdot \text{°C}$.

Con respecto al método propuesto para determinar el valor efectivo de difusividad térmica, éste mostro valores de buen ajuste al momento de linealizar las curvas de penetración de calor, como se muestra en la Figura 3. Dando como valor promedio de difusividad térmica efectiva el de $1.439 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$.

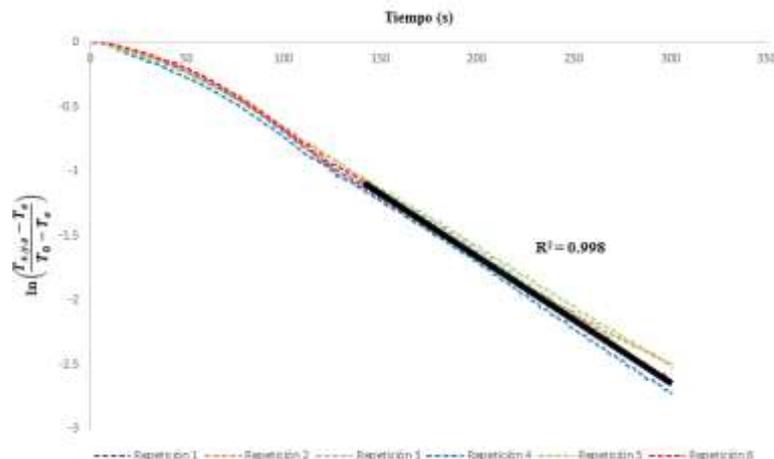


Figura 3. Relación de valores de temperatura adimensional v/s tiempo durante el calentamiento del loche

4. Discusiones

El valor elevado del coeficiente de transferencia de calor encontrado, tanto en la solución numérica como analítica, se puede corroborar con lo mencionado por Singh y Heldman (2014), quienes señalan que dicho parámetro se puede encontrar entre $3000 - 10000 \text{ W/m}^2\text{C}$, cuando el medio de calentamiento es agua en ebullición. Aunque antes se pensaba que el valor del coeficiente de transferencia de calor se incrementaba con el aumento de la temperatura del medio, la investigación realizada por Yildiz *et al.* (2007) demuestra que para el caso de fritura de papas entre $150 - 190^\circ\text{C}$, el coeficiente de transferencia de calor, disminuye entre $286.7 - 181.3 \text{ W/m}^2\text{C}$.

Realizando una extensa revisión de literatura especializada, se puede señalar que el valor de difusividad térmica de los alimentos se encuentra entre 1.0×10^{-7} y $2.36 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$ en los rangos de temperatura ambiente y calentamiento, si bien no existen datos publicados sobre valores de difusividad térmica de zapallos, y mucho menos de esta variedad, denominada Loche, podemos compararlos con diversos alimentos que se asemejen a la humedad del loche, como por ejemplo, Poulsen (1982), reporta un valor de difusividad térmica de $1.49 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$ para el puré de manzana con una humedad de 75.7% y Singh (1982), reporta un valor de difusividad térmica de $1.42 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$ para la banana con una humedad de 76%. Por lo tanto el valor encontrado de difusividad térmica para el loche, tanto con las soluciones numéricas como analíticas, se asemeja con los valores de estos alimentos.

Según ANVA del RMSE, la difusividad térmica fue significativa ($p < 0.05$), pero el coeficiente de transferencia de calor no resultó significativo ($p > 0.05$), esto se puede atribuir a que los valores elevados del coeficiente de transferencia de calor, ocasionan que el número de Biot, el cual se define como la relación entre la resistencia a la transferencia de calor dentro del alimento entre la resistencia a la transferencia de calor en la superficie del alimento (Singh y Heldman (2014), sea demasiado grande, por lo tanto el coeficiente de transferencia de calor por convección puede ser considerado como infinito (Yanniotis, 2008). Esto conlleva a poder aplicar el nuevo método, propuesto en esta investigación, para determinar el valor de difusividad térmica efectiva utilizando la solución analítica, ya que la resistencia superficial a la transferencia de calor es despreciable.

Este nuevo método se basa en la propuesta realizada por Erdoğan (2008; 2005), quien propone linealizar la ecuación de transferencia de calor y conociendo la ubicación del punto donde se registra la temperatura, determinan los valores de difusividad térmica y coeficiente de transferencia de calor por convección. Aunque esta solución planteada sólo es aplicable cuando el número de Biot se encuentra en el rango de 0.1 a 40; es decir cuando se considera la resistencia a la transferencia de calor tanto interna como externa. Lo cual no es nuestro caso, ya que contamos con valores elevados de (h) lo que conlleva a decir que la resistencia externa a la transferencia de calor es despreciable.

Una ventaja de este nuevo método planteado es que no realiza suposiciones de las propiedades térmicas y físicas, sino solamente utiliza el perfil real de temperatura obtenido durante el calentamiento. Caso contrario como lo aplica en su investigación Yıldız *et al.* (2007), quienes para determinar el coeficiente de transferencia de calor en el proceso de fritura de papas utilizan los valores de densidad, conductividad térmica y calor específico obtenidos de la literatura.

5. Conclusiones

Los valores encontrados de difusividad térmica y coeficiente de transferencia de calor utilizando tanto las soluciones numéricas como analíticas son similares a los reportados por la literatura con respecto a otros alimentos, pero con similares contenidos de humedad. Estos parámetros resultan importantes tanto para el diseño como para los cálculos en los procesos de calentamiento, los cuales servirán para la conservación del loche. El método numérico de elementos finitos, simula correctamente la transferencia de calor y es fácil de utilizar debido a la diversidad de programas comerciales que existen en el mercado, así como el método propuesto en esta investigación ya que solamente necesita del historial de temperaturas durante el calentamiento y con una simple linealización puede determinar el valor de difusividad térmica, siempre y cuando la resistencia externa a la transferencia de calor es despreciable ($Bi > 40$).

6. Referencias

- AOAC, (2002). Official Methods of Analysis of the Association of Official Analytical Chemists.
- Chamorro, V; Vidaurreta, A. (2012). Blanching of Fruits and Vegetable Products. En: *Operations In Food Refrigeration*. Editado por Mascheroni, H. CRC Press, Taylor & Francis Group. Boca Raton, FL.
- Collazos, C; Alvistur, E; Vasquez, J; Quiroz, A; Herrera, N; Robles, N. et al. (1996). *Tablas peruanas de composición de alimentos*. 7 ed. Lima: Instituto nacional de salud, Centro nacional de alimentación y nutrición.
- Erdoğan. (2005). Mathematical approaches for use of analytical solutions in experimental determination of heat and mass transfer parameters. *Journal of Food Engineering*, 68: 233–238.
- Erdoğan. (2008). A review on simultaneous determination of thermal diffusivity and heat transfer coefficient. *Journal of Food Engineering*, 86: 453–459.
- Fasina, O & Fleming, H. (2001). Heat transfer characteristics of cucumbers during blanching. *Journal of Food Engineering*, 47: 203-210.
- INDECOPI. (2010). *Denominación de origen del Loche de Lambayeque*. Resolución N° 018799 - 2010 /DSD-INDECOPI. Lima – Perú.

- Lespinard, A; Goñi, S; Salgado, P & Mascheroni, R. (2009). Experimental determination and modelling of size variation, heat transfer and quality indexes during mushroom blanching. *Journal of Food Engineering*, 92: 8–17.
- Martins, R; Lopes, V; Vicente, A; Teixeira, A. (2008). Numerical Solutions: Finite Element and Finite Volume Methods. En: *Optimization in Food Engineering*. Editado por Erdoğdu, F. CRC Press, Taylor & Francis Group. Boca Raton, FL.
- Palazoğlu, K & Erdoğdu, F. (2008). Numerical Solutions: Finite Difference Methods. En: *Optimization in Food Engineering*. Editado por Erdoğdu, F. CRC Press, Taylor & Francis Group. Boca Raton, FL.
- Poulsen, K. (1982). Thermal diffusivity of foods measured by simple equipment, *Journal of Food Engineering*, 1: 115-122.
- Puri, V & Anantheswaran, R. (1993). The Finite-element Method in Food Processing: A Review. *Journal of Food Engineering*, 19(3): 247-274.
- Rahman, M.S & Al-Saidi, G.S. (2009). Thermal Conductivity Prediction of Foods. En: *Food properties handbook*, 2nd ed. Rahman, M.S. (ed.). CRC Press, Boca Raton, FL.
- Reyes, G; Gómez-Sánchez, P; Espinoza, B; Bravo, R; Ganoza, M. (2009). *Tablas peruanas de composición de alimentos*. 8 ed. Lima: Ministerio de Salud, Instituto nacional de salud. Lima-Perú.
- Sablani, S. (2009). Measurement of Surface Heat Transfer Coefficient. En: *Food properties handbook*, 2nd ed. Rahman, M.S. (ed.). CRC Press, Boca Raton, FL.
- Singh, R. (1982). Thermal diffusivity in food processing. *Food Technology*. 36(2): 87-93.
- Singh, R; Heldman, D. 2014. *Introduction to Food Engineering*, 5th ed. Elsevier, USA.
- Wang, L & Sun, Da-Wen. (2003). Recent developments in numerical modeling of heating and cooling processes in the food industry – a review. *Trends in Food Science & Technology*, 14: 408-423.
- Yanniotis, S. (2008). *Solving Problems in Food Engineering*. Springer, New York, USA.
- Yıldız, A; Palazoğlu, T & Erdoğdu, F. (2007). Determination of heat and mass transfer parameters during frying of potato slices. *Journal of Food Engineering*, 79: 11–17.
- Zheng, L; Delgado, A; & Sun, Da-Wen. (2009). Surface Heat Transfer Coefficients with and without Phase Change. En: *Food properties handbook*, 2nd ed. Rahman, M.S. (ed.). CRC Press, Boca Raton, FL.