

**UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA
LA MOLINA**

**ESCUELA DE POSGRADO
MAESTRÍA EN TECNOLOGÍA DE ALIMENTOS**



**“MODELAMIENTO DE LA TRANSFERENCIA DE CALOR
DURANTE EL ESCALDADO DEL LOCHE (*Cucurbita moschata*)
Y PAPA (*Solanum tuberosum*)”**

Presentada por:

JULIO MAURICIO VIDAURRE RUIZ

**TESIS PARA OPTAR EL GRADO DE MAGISTER SCIENTIAE EN
TECNOLOGÍA DE ALIMENTOS**

Lima - Perú

2015

Dedico este trabajo a todas las personas interesadas en la ingeniería de alimentos, a mi familia y a mis mentores de la UNALM.

"Si he logrado ver más lejos, ha sido porque he subido a hombros de gigantes"

Issac Newton (1643-1727)

AGRADECIMIENTOS

- Quiero agradecer a todas las personas involucradas en este trabajo, por sus opiniones, sugerencias, apoyo y sobre todo por la confianza brindada y por creer en mí.
- A mis padres y hermana por darme la oportunidad de continuar estudiando e investigando.
- A mi asesor el M.Sc. Walter Francisco Salas Valerio, por encaminarme a la investigación en ingeniería de alimentos.
- A los miembros del comité consejero por la paciencia en leer mi trabajo y por las correcciones realizadas.
- Al M.Sc Miguel Ángel Solano Cornejo e Ing. William Sánchez Chávez, por convertirse en críticos de este trabajo.
- A la familia Laca Reyes, por acogerme en su hogar durante mi estancia en la Universidad Nacional Agraria La Molina y por contribuir en mi educación.
- A la Ing. Lady Judith Cabrera De la Cruz, por motivarme a la investigación en ingeniería y ser mi motivo para continuar mejorando.
- A todos los profesores que me enseñaron durante mi estancia en la Universidad Nacional Agraria La Molina.

ÍNDICE GENERAL

	Pág.
RESUMEN	
ABSTRACT	
I. INTRODUCCIÓN	1
II. REVISIÓN DE LITERATURA	3
2.1 EL LOCHE (<i>Cucurbita moschata</i> Duch.)	3
2.1.1 Generalidades	3
2.1.2 Composición química y usos	4
2.2 LA PAPA (<i>Solanum tuberosum</i> L.)	5
2.2.1 Generalidades	5
2.2.2 Composición química y usos	6
2.3 EL ESCALDADO	7
2.3.1 Generalidades	7
2.4 TRANSFERENCIA DE CALOR DURANTE EL ESCALDADO	10
2.4.1 Solución analítica de la ecuación de difusión de calor	10
2.4.2 Solución numérica de la ecuación de difusión de calor	17
2.4.3 Método de diferencias finitas	18
2.5 CONDICIONES INICIALES Y DE FRONTERA EN LA ECUACIÓN DE DIFUSIÓN DE CALOR	23
2.5.1 Generalidades	21
2.5.2 Métodos para determinar (h)	25
2.6 DIFUSIVIDAD TÉRMICA (α)	27
2.6.1 Generalidades	27
2.6.2 Métodos para determinar (α)	28
III. MATERIALES Y MÉTODOS	31
3.1 LUGAR DE EJECUCIÓN	31
3.2 MATERIA PRIMA	31
3.3 EQUIPOS, MATERIALES Y REACTIVOS	31
3.3.1 Equipos	31

3.3.2 Materiales	32
3.3.3 Reactivos	33
3.4 MÉTODOS DE CONTROL	32
3.4.1 Análisis físicos y químicos de las materias primas	33
3.4.2 Análisis proximal de las materias primas	34
3.5 ESCALDADO DEL LOCHE Y PAPA	34
3.6 MEDICIÓN DE LA TEMPERATURA	35
3.7 DETERMINACIÓN DEL COEFICIENTE DE TRANSFERENCIA DE CALOR (h)	36
3.8 DETERMINACIÓN EXPERIMENTAL DE LA DIFUSIVIDAD TÉRMICA (α)	37
3.9 DETERMINACIÓN DE LA CONDUCTIVIDAD TÉRMICA (k)	38
3.10 SIMULACIÓN DE LA TRANSFERENCIA DE CALOR MEDIANTE LA SOLUCIÓN ANALÍTICA EN 3D	39
3.11 SIMULACIÓN DE LA TRANSFERENCIA DE CALOR MEDIANTE DIFERENCIAS FINITAS EN 3D	40
3.12 SIMULACIÓN DE LA TRANSFERENCIA DE CALOR MEDIANTE DIFERENCIAS FINITAS EN 3D CON PROPIEDADES TÉRMICAS VARIABLES	48
3.13 ANÁLISIS ESTADÍSTICO DE LOS DATOS	49
IV. RESULTADOS Y DISCUSIONES	50
4.1 CARACTERIZACIÓN DE LAS MATERIAS PRIMAS	50
4.1.1 Características físico químicas y composición proximal del loche y la papa	50
4.2 DETERMINACIÓN DEL COEFICIENTE DE TRANSFERENCIA DE CALOR POR CONVECCIÓN (h)	51
4.3 DETERMINACIÓN DE LA DIFUSIVIDAD TÉRMICA (α) DEL LOCHE Y PAPA A DIFERENTES TEMPERATURAS	53
4.4 DETERMINACIÓN LA CONDUCTIVIDAD TÉRMICA (k) DEL LOCHE Y PAPA A DIFERENTES TEMPERATURAS	56
4.5 SIMULACIÓN DEL ESCALDADO DEL LOCHE Y LA PAPA	57
4.5.1 Método de separación de variable (solución analítica)	57
4.5.2 Método de diferencias finitas explícitas en 3D	58

4.5.3 Validación del método diferencias finitas explícitas en 3D	60
4.5.4 Inclusión de la difusividad térmica y conductividad térmica variables con la temperatura en la simulación por diferencias finitas	63
4.6 VALIDACIÓN DE LA SIMULACIÓN POR DIFERENCIAS FINITAS EN 3D CON PROPIEDADES TÉRMICAS VARIABLES CON LOS DATOS EXPERIMENTALES DEL ESCALDADO DEL LOCHE Y LA PAPA	64
4.6.1 Escaldado del loche	64
4.6.2 Escaldado de la papa	68
4.6.3 Verificación de método durante el escaldado del loche y la papa en la coordenada (10,1,1)	73
V. CONCLUSIONES	76
VI. RECOMENDACIONES	77
VIII. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	78
IX. ANEXOS	92

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1:	Composición proximal del zapallo loche por cada 100g de materia húmeda	4
Tabla 2:	Composición proximal de la papa por cada 100g de materia húmeda	7
Tabla 3:	Resumen de la ecuación de difusión de calor en diferentes coordenadas geométricas	11
Tabla 4:	Resumen de las soluciones para la conducción transitoria unidimensional en una placa infinita de espesor $2L$, un cilindro infinito de radio r_0 y una esfera de radio r_0 , sujetos a convección desde todas las superficies*	13
Tabla 5:	Condiciones de frontera para la ecuación de difusión de calor en la superficie ($x=0$)	24
Tabla 6:	Valores típicos del coeficiente de transferencia de calor (h) en operaciones de procesamiento de alimentos	26
Tabla 7:	Valores típicos de difusividad térmica de algunas hortalizas	29
Tabla 8:	Propiedades térmicas y físicas de la papa según la literatura	48
Tabla 9:	Características físico químicas del loche y la papa	50
Tabla 10:	Composición proximal del loche y la papa por cada 100 g	51
Tabla 11:	Coefficientes de transferencia de calor (h) de diferentes tamaños de cubos de aluminio, sometidos a diferentes temperaturas de calentamiento	52
Tabla 12:	Difusividad térmica (α) del loche y papa a diferentes temperaturas de calentamiento	53
Tabla 13:	Variaciones de tiempo en segundo máximas que se deben utilizar en diferentes redes nodales para que la simulación por diferencias finitas sea estable	60
Tabla 14:	Parámetros estadísticos de ajuste de los datos experimentales con los datos simulados para cubos de loche de $1 \times 1 \times 1$ cm	65
Tabla 15:	Parámetros estadísticos de ajuste de los datos experimentales con los datos simulados para cubos de loche de $2 \times 2 \times 2$ cm	66
Tabla 16:	Parámetros estadísticos de ajuste de los datos experimentales con los datos simulados para cubos de loche de $3 \times 3 \times 3$ cm	67

Tabla 17:	Parámetros estadísticos de ajuste de los datos experimentales con los datos simulados para cubos de papa de 1x1x1 cm	69
Tabla 18:	Parámetros estadísticos de ajuste de los datos experimentales con los datos simulados para cubos de papa de 2x2x2 cm	70
Tabla 19:	Parámetros estadísticos de ajuste de los datos experimentales con los datos simulados para cubos de papa de 3x3x3 cm	71
Tabla 20:	Parámetros estadísticos de ajuste de los datos experimentales con los datos simulados para cubos de loche y papa de 3x3x3 en la coordenada (10, 1, 1)	75

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1:	Efecto del escaldado en los tejidos celulares: S, almidón gelatinizado; CM, membrana citoplasmática alterada; CW, pared celular poco alterada; P, pectinas modificadas; N, núcleo y las proteínas citoplasmáticas desnaturalizadas; C, cloroplastos y cromoplastos distorsionados	8
Figura 2:	Intersección de dos placas infinitas	15
Figura 3:	Intersección de un cilindro infinito y una placa infinita	15
Figura 4.1:	Posición central (1, 1, 1) de inserción de la termocupla	35
Figura 4.2:	Posición (10, 1, 1) de inserción de la termocupla	35
Figura 5:	Sistema de adquisición de datos de temperatura durante el escaldado de los vegetales	35
Figura 6:	Sistema de adquisición de datos de transferencia de calor en un cilindro infinito hueco de aluminio, para determinar difusividad térmica.	37
Figura 7:	Intersección de tres placas infinitas con el mismo espesor, para formar un cubo finito en 3D	39
Figura 8:	Generación de la red nodal en la octava parte de un cubo en 3D	41
Figura 9:	Nodo interno conectado con 6 nodos, en coordenadas cartesianas	42
Figura 10:	Nodo externo conectado con 5 nodos, en coordenadas cartesianas	44
Figura 11:	Nodo externo conectado con 4 nodos, en coordenadas cartesianas	45
Figura 12:	Nodo externo conectado con 3 nodos, en coordenadas cartesianas	46
Figura 13:	Difusividad térmica (m^2/s) del loche y la papa a diferentes temperaturas	54
Figura 14:	Interfaz de la aplicación computacional para simular la transferencia de calor mediante la solución analítica	58
Figura 15:	Interfaz de la aplicación computacional para simular la transferencia de calor mediante diferencias finitas explícitas	59
Figura 16:	Ventana de reporte de criterios de estabilidad y convergencia de la simulación por diferencias finitas explícitas en 3D	59
Figura 17:	Comparación entre la simulación analítica v/s la simulación numérica con una red 5x5x5 nodos para cada eje	61

Figura 18:	Comparación entre la simulación analítica v/s la simulación numérica con una red 10x10x10 nodos para cada eje	61
Figura 19:	Comparación entre la simulación analítica v/s la simulación numérica con una red 15x15x15 nodos para cada eje	62
Figura 20:	Comparación entre la simulación analítica v/s la simulación numérica con una red 20x20x20 nodos para cada eje	62
Figura 21:	Comparación entre las simulaciones del escaldado de cubos de loche de 1x1x1 cm con los datos experimentales	65
Figura 22:	Comparación entre las simulaciones del escaldado de cubos de loche de 2x2x2 cm con los datos experimentales	66
Figura 23:	Comparación entre las simulaciones del escaldado de cubos de loche de 3x3x3 cm con los datos experimentales	67
Figura 24:	Comparación entre las simulaciones del escaldado de cubos de papa de 1x1x1 cm con los datos experimentales	69
Figura 25:	Comparación entre las simulaciones del escaldado de cubos de papa de 2x2x2 cm con los datos experimentales	70
Figura 26:	Comparación entre las simulaciones del escaldado de cubos de papa de 3x3x3 cm con los datos experimentales	71
Figura 27:	Comparación entre las simulaciones del escaldado de cubos de loche y papa de 3x3x3 cm en la coordenada (10, 1, 1) con los datos experimentales	74

ÍNDICE DE ANEXOS

ANEXO I:	Correlaciones de Choi y Okos (1986) para determinar la conductividad térmica (k), densidad (ρ), calor específico (c_p) con respecto a la composición y temperatura (0 a 150°C) de los alimentos	92
ANEXO II:	Diagrama de flujo de la aplicación computacional para simular la transferencia de calor mediante la solución analítica en 3D	93
ANEXO III:	Códigos de programación en Visual Basic® – 2013 del método de separación de variable (analítico) para simular la transferencia de calor de un cubo en tres dimensiones (3D)	94
ANEXO IV:	Diagrama de flujo de la aplicación computacional para simular la transferencia de calor mediante diferencias finitas explícitas en 3D	97
ANEXO V:	Códigos de programación en Visual Basic® – 2013 del método de diferencias finitas explícitas para simular la transferencia de calor de un cubo en tres dimensiones (3D)	99
ANEXO VI:	Diagrama de flujo de la aplicación computacional para simular la transferencia de calor mediante diferencias finitas explícitas en 3D con difusividad térmica variable	106
ANEXO VII	Códigos de programación en Visual Basic® – 2013 del método de diferencias finitas explícitas para simular la transferencia de calor de un cubo en tres dimensiones (3D) con propiedades térmicas variables	110
ANEXO VIII:	Historial de temperaturas experimentales y simuladas durante el escaldado de cubos de loche de 1x1x1 cm	122
ANEXO IX:	Historial de temperaturas experimentales y simuladas durante el escaldado de cubos de loche de 2x2x2 cm	129
ANEXO X:	Historial de temperaturas experimentales y simuladas durante el escaldado de cubos de loche de 3x3x3 cm	136
ANEXO XI:	Historial de temperaturas experimentales y simuladas durante el escaldado de cubos de papa de 1x1x1 cm	143
ANEXO XII:	Historial de temperaturas experimentales y simuladas durante el escaldado de cubos de papa de 2x2x2 cm.	150

ANEXO XIII:	Historial de temperaturas experimentales y simuladas durante el escaldado de cubos de papa de 3x3x3 cm	157
ANEXO XIV:	Historial de temperaturas experimentales y simuladas durante el escaldado de cubos de loche y papa de 3x3x3 cm en el nodo (10, 1, 1)	164

SÍMBOLOS

A	Área (m^2)
c_p	Calor específico ($kJ/kg \text{ } ^\circ C$)
E_{si}	Fracción en volumen de cada componente del alimento
h	Coefficiente de transferencia de calor por convección ($W/m^2 \text{ } ^\circ C$)
i, j, k	Connotación nodal en coordenadas tridimensionales
J_0, J_1	Son las funciones de Bessel de orden 0 y 1
k	Conductividad térmica ($W/m \text{ } ^\circ C$)
k_{si}	Conductividad térmica de cada componente del alimento ($W/m \text{ } ^\circ C$)
L	Longitud característica del cilindro (radio), esfera (radio), placa infinita (la mitad del espesor)
m	Número de datos de temperatura
N_{Bi}	Número de Biot
N_{Fo}	Número de Fourier
n	Número de términos
r	Distancia radial (m)
T_s	Temperatura superficial ($^\circ C$)
T_∞	Temperatura del medio ($^\circ C$)
T_i	Temperatura inicial ($^\circ C$)
$T_{i,j,z}^t$	Temperatura en el nodo (i, j, k) en el paso de tiempo t ($^\circ C$)
$T_{i,j,k}^{t+1}$	Temperatura en el nodo (i, j, k) en el paso de tiempo t+1 ($^\circ C$)
t	Tiempo (s)
V	Volumen (m^3)
X_e	Valor de temperatura experimental ($^\circ C$)
X_p	Valor de temperatura predicha ($^\circ C$)
x	Coordenada cartesiana en el eje x (m)
y	Coordenada cartesiana en el eje y (m)
z	Coordenada cartesiana en el eje z (m)
Δx	Distancia entre los nodos en la dirección x (m)
Δy	Distancia entre los nodos en la dirección y (m)
Δz	Distancia entre los nodos en la dirección z (m)

Δt	Incremento de tiempo (s)
∇^2	Operador laplaciano
α	Difusividad térmica (m ² /s)
ε	Distancia desde el punto central de la placa (m)
θ	Ángulo azimutal en coordenadas esféricas
μ	Raíz de la ecuación característica de una placa infinita, cilindro infinito o esfera
ρ	Densidad (kg/m ³)
φ	Coordenadas esféricas (rad)

RESUMEN

El presente trabajo tuvo por objetivo, modelar y simular la transferencia de calor durante el escaldado de cubos de loche (*Cucurbita moschata* Duch.) y papa (*Solanum tuberosum* L.) incluyendo la variación de las propiedades térmicas según la temperatura, para tal efecto se cortaron cubos de 1x1x1 cm, 2x2x2 cm y 3x3x3 cm y se sometieron a las temperaturas de escaldado de 70, 80 y 90°C, durante 5 minutos. Se registraron temperaturas en diversos puntos de los alimentos. Se determinaron experimentalmente los coeficientes de transferencia de calor (h) generados durante el calentamiento de las diferentes formas, aplicando el análisis de concentrados, encontrando que los (h) varían entre 650, 750 y 1000 W/m² °C, según el incremento de la temperatura del escaldado. También se determinó la variación de la difusividad térmica (α) del loche y la papa según el incremento de la temperatura, encontrando que el valor mínimo y máximo de (α) para el loche fueron de: 1.55 – 1.61 x 10⁻⁷ m²/s y para la papa fueron de: 1.40 – 1.46 x 10⁻⁷ m²/s. Asimismo se determinó la conductividad térmica (k) utilizando ecuaciones de correlación con la composición y la temperatura, encontrando que este parámetro no varía significativamente durante el escaldado; los valores de (k) para el loche fueron de: 0.59 W/m°C y para la papa: 0.60 W/m°C. Se modeló la ecuación de difusión de calor en coordenadas cartesianas en tres dimensiones (3D), mediante el método analítico y el método numérico de diferencias finitas explícitas. El método numérico fue validado comparando el grado de ajuste con la simulación analítica, determinando que la simulación numérica es estable y convergente cuando se simulan 10 nodos para cada eje para los cubos de 1x1x1 cm, con una variación de 0.125 segundos y 20 nodos en cada eje para los cubos de 2x2x2 cm y 3x3x3 cm, con una variación de tiempo de 0.25 segundos. Una vez validada la simulación numérica, se desarrolló una aplicación computacional en el lenguaje Visual Basic® - 2013. La aplicación incorpora la variación de la difusividad térmica con respecto al incremento de la temperatura en un polinomio de segundo grado. Utilizando todos los parámetros de transferencia de calor reales, se compararon los perfiles de temperatura experimentales con los simulados, determinando que la simulación por diferencias finitas explícitas en 3D con propiedades térmicas variables, converge de manera eficiente con los datos experimentales, para las formas de 2x2x2 cm y 3x3x3 cm (RMSE: 0.320 – 1.00 °C).

Palabras claves: *Loche, Papa, Escaldado, Transferencia de calor, Diferencias finitas explícitas.*

ABSTRACT

The aim of this study was to model and simulate the heat transfer during the blanching of loche (*Cucurbita moschata* Duch.) and potato (*Solanum tuberosum* L.) cubes, including the variation of thermal properties based on temperature. Raw materials were cut of 1x1x1 cm, 2x2x2 cm and 3x3x3 cm and were subjected to blanching temperatures of 70, 80 and 90 ° C, for 5 minutes; temperatures were recorded at different points of these foods.

The lumped heat capacity analysis method was used to determine (h), finding that (h) ranging from 650, 750 and 1000 W / m² ° C by increasing blanching temperature.

In addition, the variation of thermal diffusivity (α) for loche and potato was determined, by the increased temperature, where the minimum and maximum value (α) for loche was: 1.55 - 1.61 x 10⁻⁷ m² / s, and for potato was: 1.40 - 1.46 x 10⁻⁷ m² / s.

Thermal conductivity (k) was determined using correlation equations with the composition and temperature, finding that this parameter does not significantly vary during blanching; (k) for loche was 0.59 W / m ° C and for potato was 0.60 W / m ° C.

The equation of heat diffusion was modeled using Cartesian coordinates in three dimensions (3D), the analytical method and numerical method of explicit finite differences. The numerical method was validated by comparing the degree of fit with the analytical simulation, determining that the simulation Numerical is stable and convergent for 10 nodes in each axis for 1x1x1 cm cubes, with a variation of 0.125 seconds and 20 nodes in each axis for 2x2x2 and 3x3x3 cm cubes, all of this were simulated with a variation of 0.25 seconds.

Once validated numerical simulation finished, a program was developed using Visual Basic ® - 2013. The application includes the variation of thermal diffusivity with respect to temperature increase on a second grade polynomial. Using all real parameters of heat transfer, experimental temperature profiles were compared with simulated, determining the explicit finite difference were in good agreement with the experimental data (RMSE: 0.320 – 1.00 °C).

Keywords: *Loche, Potato, blanching, heat transfer finite difference.*

I. INTRODUCCIÓN

El creciente desarrollo agroexportador de nuestro país está impulsando al correcto diseño y optimización de los procesos alimentarios. Materias primas conocidas como la papa (*Solanum tuberosum* L.) y nuevas como el zapallo loche (*Cucurbita moschata* Duch.) son vegetales potenciales para ser procesados y expendidos en diferentes formas y bajo diferentes procesos.

Uno de los pretratamientos a los que pueden ser sometidos estos vegetales, es el escaldado. Éste es un tratamiento térmico de baja intensidad, utilizado principalmente para inactivar la actividad enzimática. Como tal, no se pretende como un método de preservación, sino como un tratamiento previo que se lleva a cabo normalmente entre la preparación de la materia prima y las operaciones posteriores, como la esterilización por calor, la deshidratación y la congelación (Chamorro y Vidaurreta, 2012).

El escaldado es una de las operaciones que demanda elevadas cantidades de consumo de agua y energía, produciendo grandes volúmenes de efluentes, así como un mayor costo e impacto ambiental. La aplicación de éste tratamiento térmico sin un adecuado control puede ocasionar problemas relacionados en aspectos nutricionales y sensoriales (Saravacos y Kostaropoulos, 2002).

Es por esto, que las empresas procesadoras de alimentos, emplean gran parte de tiempo y dinero, realizando pruebas experimentales con la finalidad de encontrar los parámetros óptimos de procesamiento, generando considerables pérdidas. Sin embargo, esto se puede solucionar modelando adecuadamente el proceso de transferencia de calor.

El correcto modelamiento y simulación de los procesos alimentarios, es una herramienta muy útil para estudiar el efecto de las variables del proceso sobre la seguridad y los atributos relacionados con la calidad de los alimentos, permitiendo identificar los parámetros críticos de procesamiento y sin tener que llevar a cabo numerosos experimentos, logrando una

reducción considerable de tiempo, dinero y esfuerzo durante las etapas de diseño y optimización de los procesos (Palazoğlu y Erdoğan, 2009).

Para simular la difusión del calor en un cuerpo, se pueden utilizar las soluciones exactas o también llamadas analíticas; siempre y cuando se mantengan constantes las propiedades del alimento y la forma geométrica sea simple (Çengel, 2007).

Recientes investigaciones han demostrado que la utilización de los métodos numéricos como el de diferencias finitas, simulan correctamente la transferencia de calor, hasta incluso si se incorpora información como el cambio de las propiedades térmicas de los alimentos, estructura y condiciones superficiales del proceso (Bisceglia *et al.* 2013; Perusello *et al.*, 2011, Sakin-Yilmazer *et al.*, 2012; Feyissa, 2011; Goñi y Salvadori, 2011; Loss *et al.*, 2011; Andreasen, 2009; Betta *et al.*, 2009; Lespinard *et al.*, 2009; Delgado y Sun, 2003; Mohamed, 2003; Ansari, 1999; Wang y Brennan, 1995).

Por tanto, la presente investigación tuvo como objetivos:

- Modelar la transferencia de calor durante el escaldado del loche (*Cucurbita moschata* Duch.) y papa (*Solanum tuberosum* L.), utilizando la solución por diferencias finitas explícitas y la solución analítica en tres dimensiones (3D).
- Determinar el coeficiente de transferencia de calor por convección generado durante el escaldado para diferentes dimensiones de cubos.
- Determinar la variación de difusividad térmica (α) y conductividad térmica (k) del loche y la papa según el incremento de la temperatura del escaldado.
- Desarrollar aplicaciones computacionales para simular la transferencia de calor por diferencias finitas explícitas en 3D, validándola con la simulación analítica.
- Incorporar la variación de las propiedades térmicas en la simulación por diferencias finitas explícitas en 3D y validar el modelo propuesto con valores experimentales.

II. REVISIÓN DE LITERATURA

2.1 EL LOCHE (*Cucurbita moschata* Duch.)

2.1.1 Generalidades

El loche o también llamado zapallo loche es una variedad de zapallo, cultivada en la zona norte del Perú (Andres y Ugás, 2006); perteneciente a la familia de las cucurbitáceas, donde también se incluyen a las calabazas, los melones, los pepinos y las sandías (Vidaurre y Castañeda, 2014).

La evidencia más antigua de la existencia del fruto se encuentra en las manifestaciones arqueológicas de la cultura Moche (100 – 750 dC), quienes representaron al fruto en forma de cerámicos y se han encontrado restos botánicos (semillas) en las tumbas y excavaciones (INDECOPI, 2010; Andres *et al.*, 2006)

Morfológicamente es un fruto, que posee de pocas a moderadas verrugas, de forma piriforme hacia alargada, de longitud variable. De longitud variable entre 14.71 cm a 34.42 cm (pudiendo algunas veces superar esos límites) y diámetros, entre 8.86 cm a 13.05 cm. El peso es también muy variable con un promedio de 0.53 a 1.79 kg; predominando el color verde oscuro gris de la cascara y presencia de verrugas a lo largo. La pulpa es de color amarillo anaranjada, de consistencia suave a firme, de olor insípido a dulce; tornándose muy intenso en los frutos maduros. De acidez baja. Algunos frutos presentan semillas, aunque la mayoría carece de ellas, sobre todo los de formas alargadas (INDECOPI, 2010).

En el año 2010, el Instituto Nacional de Defensa de la Competencia y de la Propiedad Intelectual (INDECOPI), le concede la denominación de origen como “Loche de Lambayeque”, atribuyendo que además de presentar ciertas características morfológicas particulares, también presenta atributos de aroma y sabor particulares cuando es agregado como ingrediente en la elaboración de platos típicos de la comida lambayecana.

El fruto tiene un dulzor particular, debido al elevado contenido de carbohidratos, según Andres y Ugás (2006), la pulpa del loche puede llegar a contener 18°Brix, lo cual no es usual en comparación con otras cucurbitáceas.

Asimismo, INDECOPI, (2010), señala que el loche muestra mayor contenido de azúcares reductores frente a otros frutos; y si bien algunos azúcares reductores tienen bajo poder edulcorante, esto hace del loche un producto con un dulzor apropiado para combinarlo en la elaboración de los diversos platos de nuestra gastronomía.

Según Jeffrey (1990), la clasificación taxonómica de las *Cucurbita moschata* es:

REINO : *Vegetal*
DIVISIÓN : *Magnoliophyta*
CLASE : *Magnoliopsida*
SUBCLASE : *Dilleniidae*
ORDEN : *Cucurbitales*
FAMILIA : *Cucurbitaceae*
GÉNERO : *Cucurbita*
ESPECIE : *C. moschata*

2.1.2 Composición química y usos

En la literatura existen algunas diferencias con respecto al contenido de humedad del loche, como se muestra en la Tabla 1, donde se describe la composición proximal detallada, según lo reportado por diferentes autores.

Tabla 1: Composición proximal del zapallo loche por cada 100g de materia húmeda

Componente	Collazos <i>et al.</i> (1996) y Reyes-García <i>et al.</i> (2009)	INDECOPI (2010)
Agua (g)	75.70	82.00
Proteína (g)	1.60	2.97
Grasa (g)	0.10	0.13
Carbohidratos (g)	21.10	16.41
Fibra (g)	1.20	1.62
Ceniza (g)	1.50	1.22

El zapallo loche, posee muy bajo contenido de lípidos, y mayor contenido de carbohidratos, azúcares reductores y fibra (INDECOPI, 2010).

Según Vidaurre y Castañeda (2014), la forma de comercialización del loche es en estado fresco, al igual que Andres y Ugás (2006), quienes mencionan que el loche se expende en los mercados en forma de trozos y se utiliza como ingrediente en la preparación de comidas saladas y dulces típicos de Lambayeque.

2.2 LA PAPA (*Solanum tuberosum* L.)

2.2.1 Generalidades

La papa se cultiva en los Andes desde hace más de 7000 años (Horton, 1992). El origen de la papa *Solanum tuberosum* se centra en la parte norte del lago Titicaca al sur del Perú. Horton, (1992), menciona que el cultivo de la papa una vez domesticado, se extendió por toda la región andina, y al momento de la conquista española -principios del siglo XVI se cultivaban cientos de variedades en las regiones altas de lo que actualmente son Bolivia, Chile, Colombia, Ecuador y Perú.

Si bien la papa es originaria de los altos Andes de América del Sur, en los dos últimos siglos la mayor parte ha sido cultivada en Europa, por esta razón, mucha gente piensa en la papa como un cultivo europeo y asume que las tendencias mundiales de producción y uso de la papa acompañan a las tendencias europeas, lo cual no es así (Horton, 1992).

Actualmente, la sub especie *S. tuberosum* es el cuarto cultivo de mayor importancia en el mundo después del arroz, el trigo y el maíz (Centro Internacional de la Papa, 2006).

La papa blanca es una de las variedades más importantes en el mundo ya que es un importante cultivo alimentario. Desde su introducción a Europa desde América del Sur en el siglo XVI, su capacidad de adaptación y la capacidad para producir buenas cosechas han convertido, a la papa, en un alimento básico en casi todos los países civilizados (más de 130 países) (Gould, 1999).

Según la FAO, el mayor productor de papa en el mundo es Asia y Europa, seguido por América Latina (FAOSTAT, 2015).

Se estima que existan más de tres mil variedades de papas nativas en el Perú, siendo las principales variedades de papas cultivadas: la Blanca, Amarilla, Colorada, Canchán, Yungay, Perricholi, Peruanita, Amarilis, entre otras (Maldonado *et al.*, 2008).

Huamán y Ross (1985), describen la ubicación taxonómica de la papa de la siguiente manera:

REINO	: <i>Plantae</i>
DIVISIÓN	: <i>Fanerógamas</i>
SUBDIVISIÓN	: <i>Angiospermas</i>
CLASE	: <i>Dicotiledóneas</i>
SUBCLASE	: <i>Simpétalas</i>
SECCIÓN	: <i>Anisocárpeas</i>
ORDEN	: <i>Tubifloríneas</i>
FAMILIA	: <i>Solanaceae</i>
GÉNERO	: <i>Solanum</i>
SECCIÓN	: <i>Petota</i>
SUBSECCIÓN	: <i>Potatoe</i>
ESPECIE	: <i>Solanum spp</i>

2.2.2 Composición química y usos

Según Gould (1999), la composición y la cantidad de nutrientes almacenados dependen de la temporada de crecimiento, temperatura y la humedad, el suelo y los nutrientes en el suelo, y la composición genética del cultivar o variedad. La composición es de especial importancia y trascendencia para el procesamiento de la papa.

Gould (1999), menciona que un análisis proximal de papa Blanca, se puede encontrar que el 80% en peso de los hidratos de carbono son almidones y se componen de amilopectina (75-95%) y amilosa (21-25%). La proteína de la papa se compone de todos los aminoácidos esenciales. Las papas son, también, una excelente fuente de vitamina C y otros nutrientes. La amplia gama de nutrientes indican que muchas variables pueden afectar la composición, como las condiciones climáticas, suelos, época del año de cosecha, etc. Todos estos factores pueden explicar por qué los tubérculos son muy diferentes.

La variedad de papa Yungay, es muy semejante a la variedad Blanca, en su textura y color, así como en composición proximal, como se muestran en la Tabla 2.

Tabla 2: Composición proximal de la papa por cada 100g de materia húmeda

Componente	Papa Blanca	Papa Yungay
	Collazos <i>et al.</i> (1996) y Reyes-García <i>et al.</i> (2009)	Obregón La Rosa <i>et al.</i> (1998)
Agua (g)	74.50	77.00
Proteína (g)	2.10	1.63
Grasa (g)	0.10	0.08
Carbohidratos (g)	22.3	19.83
Fibra (g)	0.60	0.57
Ceniza (g)	1.00	0.90

La papa es un alimento básico en la dieta de los peruanos, consumiéndose bajo diferentes formas de procesamiento, ya sea cocida, sancochadas o fritas. Hasta incluso, algunas papas de tamaño pequeño son consumidas con su cáscara, la cual es un fuente excelente de fibra.

2.3 EL ESCALDADO

2.3.1 Generalidades

Según Fellows (2009), el escaldado es un proceso de precalentamiento del producto por inmersión en agua o vapor. El propósito principal del escaldado es inactivar las enzimas de origen natural presentes en los alimentos, debido a que éstas son responsables del desarrollo de malos sabores, decoloración o pardeamiento, deterioro de la calidad nutricional, y cambios de textura en los alimentos.

Otras ventajas del escaldado es que eliminan las burbujas de aire de la superficie y de los espacios intercelulares de los tejidos vegetales (Figura 1), reduce la carga microbiana inicial, limpia las materias primas, lo que facilita las operaciones preliminares como el pelado y

cortado, logrando de esta manera el ahorro en el consumo de energía. También mejora las características como el color, textura y sabor, siempre y cuando se realice en condiciones óptimas.

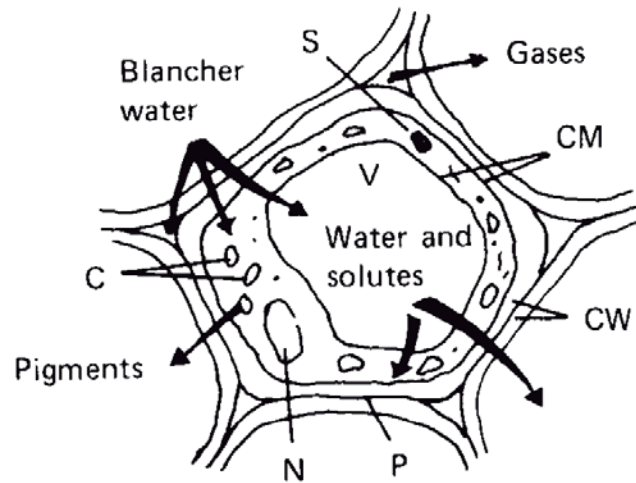


Figura 1: Efecto del escaldado en los tejidos celulares: S, almidón gelatinizado; CM, membrana citoplasmática alterada; CW, pared celular poco alterada; P, pectinas modificadas; N, núcleo y las proteínas citoplasmáticas desnaturalizadas; C, cloroplastos y cromoplastos distorsionados.

FUENTE: Fellows (2009).

El escaldado puede tener desventajas, por ejemplo: puede cambiar la textura, el color, y el sabor debido al proceso de calentamiento; también puede aumentar la pérdida de sólidos solubles como las vitaminas, especialmente en el caso de escaldado por agua; puede cambiar la configuración química y los estados físicos de los nutrientes y vitaminas; y también tiene efectos negativos en la parte ambiental, debido a los grandes volúmenes de agua y energía que utiliza (Rahman y Perera, 2007; Ramesh *et al.*, 2002).

Jackson *et al.* (1996) señalan que el tiempo y la temperatura del escaldado son los factores importantes para conseguir una óptima calidad en el proceso de secado de los alimentos y que la temperatura normal de escaldado varía entre 80 °C a 100 °C.

Se ha investigado que el uso de temperaturas bajas de escaldado, entre 50 °C y 70 °C, mejora la textura y retención de algunos componentes nutricionales en los alimentos (Mohamed y Hussein, 1994).

El proceso de tiempo-temperatura del escaldado se estima utilizando los principios básicos de procesamiento térmico, es decir, utiliza los principios de cinética de inactivación y de transferencia de calor (D y z) (Saravacos y Kostaropoulos, 2002).

Las enzimas causantes del deterioro de los vegetales son la lipoxigenasa, polifenoloxidasas, poligalacturonasa, clorofilasa, catalasa, y peroxidasa, siendo esta última la más resistente en frutas y vegetales, y por lo tanto es la más utilizada como un indicador de la eficiencia del escaldado (Gökmen, 2010; Fellows, 2009; Ganthavorn *et al.*, 1991; Luh y Woodroof, 1988).

Como en la esterilización, el escaldado es optimizado teniendo en cuenta el tiempo mínimo para inactivar las enzimas indeseables con el mínimo daño a la calidad del producto, manteniendo el costo de la operación en un mínimo. El costo de operación incluye la energía utilizada, la contaminación del agua y la descarga de efluentes al medio ambiente (Saravacos y Kostaropoulos, 2002).

Chamorro y Vidaurreta (2012) mencionan que para determinar el tratamiento térmico adecuado, es necesario estudiar el proceso de transferencia de calor, la cinética de la inactivación de la enzima, y los procesos que tienen lugar durante el escaldado que afecten la calidad del producto. Los factores que influyen en el tiempo de escaldado son los siguientes:

- El tipo de fruta u hortaliza.
- El tamaño de los trozos de los alimentos.
- La temperatura del medio.
- El método de calefacción.

El tiempo de residencia de la materia prima en la escaldadora depende principalmente del tamaño de los trozos de las hortalizas, variando de 2 a 10 minutos (Saravacos y Kostaropoulos, 2002).

2.4 TRANSFERENCIA DE CALOR DURANTE EL ESCALDADO

La transferencia de calor durante el escaldado de los alimentos, es un fenómeno de transporte estudiado con la finalidad de evaluar la reducción de la actividad enzimática y degradación de ciertos componentes de interés (Fellows, 2009; Agüero *et al.*, 2008; Garrote *et al.*, 2004; Luna *et al.*, 1987; Luna, 1986).

Para estudiar la transferencia de calor de un alimento, se hace uso de la ecuación de difusión de calor, la cual se obtiene mediante un balance de calor ya sea en coordenadas cartesianas, cilíndricas o esféricas (Hahn y Özişik, 2012; Çengel, 2007; Incropera, 1999).

La Tabla 3, muestra un resumen de las ecuaciones diferenciales parciales de difusión del calor, donde las propiedades térmicas y físicas de los alimentos son independientes de la temperatura y se ven simplificadas en la propiedad térmica denominada difusividad térmica (α) expresada en m^2/s .

La solución de la ecuación diferencial de difusión del calor, se puede desarrollar mediante técnicas analíticas o numéricas.

2.4.1 Solución analítica de la ecuación de difusión de calor

Para simplificar las soluciones analíticas, generalmente se utiliza la solución unidimensional, representando formas geométricas simples como: Una placa infinita para coordenadas cartesianas, un cilindro infinito para coordenadas cilíndricas, y una esfera para coordenadas esféricas, asumiendo que todas las superficies enfrentadas tienen las mismas condiciones de contorno (Erdoğdu y Turhan, 2009).

Las soluciones para las ecuaciones analíticas de la ecuación de difusión del calor, están disponibles en la literatura, todas ellas sirven para obtener la distribución de la temperatura transitoria en cualquier punto y para cada forma geométrica simple. Estas soluciones se obtienen utilizando algunas técnicas de análisis, como la transformada de Laplace y el método de separación de variables (Kookos y Stoforos, 2015; Erdoğdu y Turhan, 2009).

El método de separación de variables ha sido ampliamente utilizado en la solución de los problemas de conducción de calor (Ozisik, 1993) y fue desarrollado por J. Fourier, en 1820 (Çengel, 2007). Este método se basa en la expansión de una función en términos de series

de Fourier. En este método, la variable dependiente (temperatura, T) se supone que es el producto de las variables independientes (ubicación, x y del tiempo t) (Erdođu y Turhan, 2009).

Tabla 3: Resumen de la ecuación de difusión de calor en diferentes coordenadas geométricas

Ecuación de difusión de calor	
	$\frac{1}{\alpha} \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla^2 T = \nabla \cdot \nabla T$
Coordenada	3D
Rectangular	$\frac{1}{\alpha} \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{\partial T}{\partial z} \right)$
Cilíndrica	$\frac{1}{\alpha} \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} r \left(\frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 T}{\partial \theta^2} + \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{\partial T}{\partial z} \right)$
Esférica	$\frac{1}{\alpha} \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left(r^2 \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2 \sin \theta} \left(\sin \theta \frac{\partial T}{\partial \theta} \right) + \frac{1}{r^2 \sin^2 \theta} \frac{\partial}{\partial \varphi} \left(\frac{\partial T}{\partial \varphi} \right)$

FUENTE: Kookos y Stoforos (2015).

Este método se aplica cuando las ecuaciones diferenciales que gobiernan y ecuaciones que representan las condiciones de contorno e iniciales son homogéneas y lineales. Para los casos de condiciones no homogéneas donde hay más de una condición no homogénea, las técnicas de superposición se aplican a dividir el problema en problemas más simples (Çengel, 2007).

Çengel (2007), menciona que el método de separación de variable es aplicable si:

1) La configuración geométrica es sencilla y finita (como un bloque rectangular, un cilindro o una esfera), de modo que las superficies de frontera se puedan describir por medio de funciones matemáticas sencillas.

2) La ecuación diferencial y las condiciones de frontera e inicial, en su forma más simplificada, son lineales (sin términos que contengan productos de la variable dependiente o de sus derivadas) y sólo contienen un término no homogéneo (un término sin la variable dependiente ni sus derivadas).

Las ecuaciones para solucionar la ecuación de transferencia de calor por el método de separación de variable se muestran en la Tabla 4.

Un parámetro adimensional trascendental en la solución de la ecuación de transferencia de calor por el método de separación de variable, es el Número de Biot (N_{Bi}), el cual se define como la razón de la resistencia interna de un cuerpo a la conducción de calor con respecto a su resistencia externa a la convección de calor (Ec. 2.1) (Singh y Heldman, 2014).

Conociendo este valor se pueden determinar el valor de las ecuaciones características para cada término de la ecuación utilizada, así como también nos puede ayudar a determinar si la resistencia superficial a la transferencia de calor es despreciable ($N_{Bi} > 40$) o si la resistencia superficial e interna es significativa ($0.1 < N_{Bi} < 40$).

$$N_{Bi} = \frac{hL}{k} \quad (2.1)$$

Donde:

h : Coeficiente de transferencia de calor por convección ($W/m^2 \text{ } ^\circ C$)

L : Longitud característica (volumen/área)

k : Conductividad térmica ($W/m \text{ } ^\circ C$)

Según Erdođdu y Turhan (2009), el número de términos utilizados para la solución de problemas de transferencia de calor en ingeniería de alimentos es variable, por ejemplo si se desea conocer sólo un dato de temperatura en una posición determinada y tras un tiempo de tratamiento prudencial se puede obtener una respuesta utilizando sólo el primer término de la ecuación ($C_1(x)$), siempre y cuando el número de Fourier ($N_{Fo} = \frac{\alpha t}{L^2}$) sea mayor de 0.2.

Pero si lo que se pretende es lograr precisión en la simulación de todas las temperaturas del proceso de transferencia de calor, se suelen utilizar entre 6 y 100 términos de la ecuación, como se muestran en las investigaciones realizadas por Palazoglu (2006) y Christensen y Adler-Nissen (2015) respectivamente.

Tabla 4: Resumen de las soluciones para la conducción transitoria unidimensional en una placa infinita de espesor 2L, un cilindro infinito de radio r_o y una esfera de radio r_o, sujetos a convección desde todas las superficies.*

Ecuación analítica general		
$\frac{T_{(x,t)} - T_{\infty}}{T_0 - T_{\infty}} = \sum_{n=1}^{\infty} \left[C_n(x) \exp\left(-\mu_n^2 \frac{\alpha \cdot t}{L^2}\right) \right]$		
Forma	Expresión C_n	Raíces μ_n
Placa infinita	$C_n(x) = \frac{2 \cdot \sin(\mu_n)}{\mu_n + \sin(\mu_n) \cdot \cos(\mu_n)} \cdot \cos\left(\mu_n \cdot \frac{\varepsilon}{L}\right)$	$N_{Bi} = \mu \cdot \tan(\mu)$
Cilindro infinito	$C_n(x) = \frac{2 \cdot J_1(\mu_n)}{\mu_n \cdot [J_0^2(\mu_n) + J_1^2(\mu_n)]} \cdot J_0\left(\mu_n \cdot \frac{\varepsilon}{L}\right)$	$N_{Bi} = \mu \cdot \frac{J_1(\mu)}{J_0(\mu)}$
Esfera	$C_n(x) = \frac{2 \cdot [\sin(\mu_n) - \mu_n \cdot \cos(\mu_n)]}{\mu_n - \sin(\mu_n) \cdot \cos(\mu_n)} \cdot \frac{\sin\left(\mu_n \cdot \frac{\varepsilon}{L}\right)}{\mu_n \cdot \frac{\varepsilon}{L}}$	$N_{Bi} = 1 - \frac{\mu}{\tan(\mu)}$

FUENTE: Erdoğan y Turhan (2009).

Donde:

$T_{(x,t)}$: Temperatura en la coordenada x, y tiempo t

T_{∞} : Temperatura del medio (°C)

T_0 : Temperatura inicial (°C)

- n : Términos de la ecuación
- L : Longitud característica (placa infinita = L ; cilindro infinito = r_0 ; esfera = r_0)
- ε : Distancia desde el punto central de la forma geométrica definida (m)
- μ_n : Ecuación característica para cada término n de la ecuación
- J_0, J_1 : Son las funciones de Bessel de orden 0 y 1
- α : Difusividad térmica del producto (m^2/s)
- N_{Bi} : Número de Biot

Debido a que todas las geometrías de forma regular no se pueden modelar bajo la forma unidimensional (placa infinita, cilindro infinito y esfera), se pueden realizar combinaciones o intersecciones de las geometrías con el fin de determinar los cambios de temperatura en formas de dos o tres dimensiones. Erdoğan y Turhan (2009) denominan este tipo de problemas como solución analítica de formas semi infinitas o finitas.

Newman (1936) demostró matemáticamente que es posible obtener soluciones analíticas de formas finitas, multiplicando las soluciones de formas geométricas simples.

Yildiz *et al.* (2007), mencionan que la intersección de dos placas infinitas pueden formar la forma geométrica rectangular, la cual se puede asemejar a la forma de una papa frita (Fig. 2); así como Singh y Heldman, (2014), mencionan que un cilindro finito puede estar constituido de la intersección de un cilindro infinito y una placa infinita (Fig. 3).

Diversas investigaciones hacen uso de las soluciones analíticas para modelar y simular la transferencia de calor durante el escaldado de los alimentos. Lund (1972), modeló la transferencia de calor de cubos de zanahoria de 2.5 x 0.95 x 0.95 cm sometidos a temperaturas de escaldado de 100 °C, utilizando la solución analítica para determinar el valor de difusividad térmica así como la degradación de peroxidasa, acoplado el perfil de temperatura de calentamiento del alimento con la ecuación de cinética de inactivación de la enzima.

Fasina y Fleming (2001) modelaron y simularon la transferencia de calor durante el escaldado de pepinos en forma de cilindros finitos de 2.5, 3.7 4.5 cm de diámetro, sometidos a temperaturas de 50, 65, 80 y 95 °C, para tal efecto utilizaron tanto la solución analítica,

como la solución numérica de diferencias finitas explícitas, encontrando que el error máximo de las temperaturas simuladas de los pepinos a partir de datos experimentales fue de 4.5 °C y que no existía diferencia significativa en la ganancia de humedad durante el escaldado. También determinaron los valores del coeficiente de transferencia de calor (h) utilizando sólidos de aluminio, mediante el método de análisis de concentrado, encuentran que (h) varía entre 500 – 6000 W/m²°C y que no tienen significancia sobre las temperaturas superficiales y centrales en los diferentes tamaños de los pepinos.

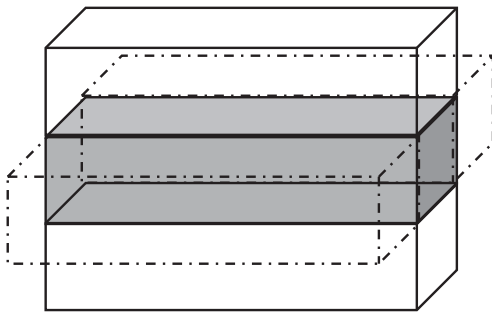


Figura 2: Intersección de dos placas infinitas

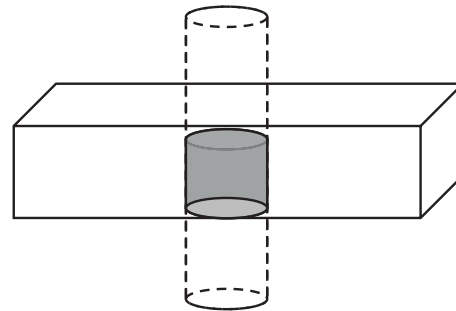


Figura 3: Intersección de un cilindro infinito y una placa infinita

FUENTE: Yildiz *et al.* (2007).

FUENTE: Singh y Heldman (2014).

Garrote *et al.* (2004), realizan un análisis matemático de la inactivación térmica de la peroxidasa y la lipoxigenasa durante el escaldado de un alimento sólido con forma de cilindro finito (diámetro = 9 cm y altura = 20 cm) con el fin de evaluar el punto final del proceso, utilizando la solución analítica y considerando infinito el coeficiente de transferencia de calor (h). Las predicciones incluyen la inactivación térmica de la peroxidasa y la lipoxigenasa durante el calentamiento convencional, y la inactivación térmica de la lipoxigenasa durante un proceso de escaldado individual y rápido. En el estudio se asumió un modelo inactivación enzimática bifásico de primer orden para describir la inactivación térmica de la peroxidasa y la lipoxigenasa. Considerando el peor escenario, la concentración de 500 UA/g de peroxidasa y lipoxigenasa, se logra reducir hasta 1 UA / g en los tiempos de

1060 y 180 segundos, siendo el escaldado individual y rápido el método que inactiva las enzimas en el menor tiempo.

Trabajos similares, en los que se utiliza el perfil de temperatura simulado durante el escaldado, mediante la solución analítica, podemos encontrar la investigación de Agüero *et al.* (2008), quienes estudiaron la cinética de inactivación térmica de la peroxidasa y pérdida de vitamina C en láminas de zapallos de 1.5 – 2.0 mm de espesor, durante el escaldado en agua a las temperaturas de 60 – 90°C, encontrando que el escaldado a altas temperaturas y cortos tiempos dieron como resultado superior retención de ácido ascórbico y más rápida inactivación enzimática.

Los trabajos realizado por Luna *et al.* (1987) y Luna (1986), también siguen este mismo concepto, utilizando tiras de papas y utilizando mazorcas de maíz respectivamente.

Las soluciones analíticas también cumplen la función de validar las soluciones numéricas, evitando de esta manera el gasto que se generaría determinar la convergencia de la simulación numérica con los valores experimentales, en recientes publicaciones como Palazoğlu y Erdoğdu (2009), Palazoğlu (2006) y Palazoğlu y Sandeep (2002) se hace uso de la simulación analítica para comparar la convergencia con el método de diferencias finitas.

Pero también se puede dar el caso de comparar las soluciones numéricas y analíticas con el fin de determinar cuando pueden ser aplicables, un ejemplo es el trabajo realizado por Uyar y Erdoğdu (2012) quienes escanean alimentos irregulares utilizando un escáner en 3D y simulan la transferencia de calor por elementos finitos, determinando que la simulación analítica en coordenadas esféricas ajustan correctamente a las formas esféricas irregulares, siempre y cuando se obtenga un valor de esfericidad mayor de 0.9.

2.4.2 Solución numérica de la ecuación de difusión de calor

Los métodos numéricos son útiles cuando no hay una solución analítica disponible para un problema particular. Ellos se han hecho populares por su flexibilidad en el manejo de geometrías irregulares, complejas condiciones de contorno, las propiedades térmicas dependientes de la temperatura, cambio de fase, etc. Sin embargo, se debe señalar que las soluciones numéricas no son exactas, sino, sólo aproximaciones para exigir soluciones (Palazoğlu y Erdoğdu, 2009).

Los métodos numéricos se basan en el reemplazo de las ecuaciones diferenciales por un conjunto de n ecuaciones algebraicas para las temperaturas desconocidas en n puntos seleccionados en el medio y la solución simultánea de estas ecuaciones conduce a valores de la temperatura en esos puntos discretos (Çengel, 2007). Estas ecuaciones algebraicas pueden ser resueltas por simples manipulaciones matemáticas, tales como suma, resta, multiplicación y división, que se pueden automatizar fácilmente usando un ordenador. Sin embargo, como consecuencia de la discretización la solución obtenida ya no es exacta, por lo tanto resulta en una aproximación de la solución exacta. Afortunadamente, el error de aproximación puede reducirse sustancialmente mediante el aumento del número de puntos de discretización y reducción del paso de tiempo (Nicolai *et al.*, 2001)

En los últimos años el crecimiento de poderosas computadoras con mayores capacidades computacionales ha facilitado la formulación de métodos numéricos sofisticados que imitan y simulan los sistemas físicos reales, mediante la resolución de complejos modelos matemáticos (Moens y Vandepitte, 2005; Wang y Sun, 2003; Mohamed, 2003; Ozisik, 1993).

En la literatura, existen diferentes métodos numéricos que incluyen métodos diferenciales (por ejemplo, el método de las diferencias finitas), métodos integrales (variación y ponderados residuales, por ejemplo, el método de elementos finitos), y métodos estocásticos (por ejemplo, el método de Monte Carlo) (Sandeep *et al.*, 2008).

En aplicaciones de ingeniería de alimentos, los métodos de diferencias finitas y elementos finitos son las técnicas numéricas más empleadas (Puri y Anantheswaran, 1993). El primero es un método barato y menos complejo computacionalmente en comparación con este último (Wang y Sun, 2003). Sin embargo, el primero tiene limitaciones en el modelado, por ejemplo, resulta muy complicada su aplicación en alimentos heterogéneas (Martins *et al.*, 2009).

El método numérico de elementos finitos, se puede realizar mediante programas computacionales que cuentan con la opción de realizar el proceso de discretización y simulación, los cuales permiten realizar el mallado de formas irregulares y variar las condiciones del medio y propiedades del alimento como por ejemplo, en el trabajo realizado por Lespinard *et al.* (2009), quienes simularon la transferencia de calor durante el escaldado de hongos en 3D, considerando el encogimiento de los mismos, así como la inactivación de la polifenoloxidasasa (PPO), encontrando que el encogimiento es un factor limitante para

estimar el tiempo de procesamiento para temperaturas de escaldado superiores a 60 °C; mientras que la reducción de la actividad polifenoloxidasas fue el factor limitante a temperaturas de escaldado inferiores.

Utilizando el método numérico de elementos finitos también se puede introducir la variación de las propiedades térmicas y físicas de los alimentos y el coeficiente de transferencia de calor (h) según el incremento de la temperatura, como lo demuestran en su investigación Lemus-Mondaca *et al.* (2013), quienes desarrollan una aplicación en el lenguaje FORTRAN para simular la transferencia de calor y masa en 3D durante el secado de paralelepípedos de papaya de 3 x 2 x 1 cm, encontrando que para una gama de temperaturas entre 40 y 80°C, los valores simulados ajustan correctamente a los valores reales con un 6% de error medio.

2.4.3 Método de diferencias finitas

El método de diferencias finitas es el método más antiguo de discretización para la solución numérica de ecuaciones diferenciales y fue descrito en 1768 por Euler. El método se basa en la aproximación de los derivados en las ecuaciones que rigen por la relación de dos diferencias (Nicolai *et al.*, 2001).

Según Ozisik (1993), la idea de la representación de la diferencia finita de una derivada puede ser introducida recordando la definición de la derivada de la función $F(x, y)$ en $x = x_0, y = y_0$ con respecto a x :

$$\frac{\partial F}{\partial x} = \lim_{\Delta x \rightarrow 0} \frac{F(x_0 + \Delta x, y_0) - F(x_0, y_0)}{\Delta x} \quad (2.2)$$

Claramente, si la función $F(x, y)$ es continua, el lado derecho de ecuación (2.2) puede ser una aproximación razonable a $\frac{\partial F}{\partial x}$ durante un periodo suficientemente pequeño pero con Δx finita.

Consideramos que el desarrollo en serie de Taylor de las funciones $f(x + h)$ y $f(x - h)$ alrededor del punto x , está dada por:

$$f(x + h) = f(x) + hf'(x) + \frac{h^2}{2!}f''(x) + \frac{h^3}{3!}f'''(x) \quad (2.2a)$$

$$f(x - h) = f(x) + hf'(x) + \frac{h^2}{2!}f''(x) + \frac{h^3}{3!}f'''(x) \quad (2.2b)$$

Donde los números primos denotan derivadas con respecto a x . La primera y segunda derivada, $f'(x)$ y $f''(x)$, pueden ser representados en forma de diferencias finitas de muchas maneras diferentes mediante la utilización de desarrollos en serie de Taylor.

La aproximación de las derivadas parciales de la ecuación de difusión de calor, se pueden realizar mediante el uso de diferencias finitas (Çengel, 2007). El método explícito o también llamado hacia adelante, es el método más simple de operar, en las diferencias finitas, debido a que utiliza las temperaturas actuales para simular la temperatura anterior, pero tiene la desventaja de imponer un límite sobre el intervalo de tiempo admisible para evitar inestabilidades en la solución (Ozisik, 1993).

Los problemas de conducción de calor en estado no estacionario, pueden resolverse numéricamente mediante la transformación de la ecuación diferencial parcial de la conducción de calor a las ecuaciones en diferencias finitas, en ambos dominios, tanto del espacio y tiempo (Ozisik, 1994).

Nicolăi *et al.* (2001), señalan que la primera derivada en el tiempo de alguna función $\frac{\partial T}{\partial t}$ en el tiempo t_i se puede aproximar a la siguiente expresión:

$$\frac{\partial T}{\partial t} \cong \frac{T(t_{i+1}) - T(t_i)}{\Delta t} \quad (2.3)$$

La Ecuación (2.23) es llamada diferencia hacia adelante o explícita, ya que utiliza el valor futuro de la función.

Del mismo modo, las fórmulas de diferencias finitas se pueden establecer para los derivados de segundo orden, como se muestra en la Ecuación (2.4), donde la segunda derivada $\frac{\partial^2 T}{\partial L^2}$ en el espacio denominado “L” se puede aproximar a la siguiente expresión:

$$\frac{\partial^2 T}{\partial L^2} = \frac{T(L_{i+1}) - 2T(L_i) + T(L_{i-1}))}{\Delta L^2} \quad (2.4)$$

Si el sistema de coordenadas cartesianas, comprende las tres dimensiones para la transferencia de calor, el término, denominado “L” en la Ecuación (2.4), puede ser representado por x, y, z ; obteniendo tres expresiones con coordenadas i, j, k .

En la literatura existen numerosos trabajos sobre la aplicación del método de diferencias finitas para simular la transferencia de calor, partiendo de la investigación por Teixeira *et al.* (1969) quienes desarrollan el método de diferencias finitas explícitas para simular la transferencia de calor de alimentos enlatados y posteriormente investigaciones incluyendo el efecto de la variación de la temperatura de la retorta (Durance *et al.*, 1997; Kim y Teixeira, 1997; Almonacid-Merino *et al.*, 1993; Fastag *et al.*, 1996; Teixeira *et al.*, 1975). En una reciente investigación, Mohamed (2003), desarrolló el método de diferencias finitas implícitas en cilindros finitos con el mismo objetivo de simular la transferencia de calor en alimentos enlatados, validando el método utilizando datos de procesamiento térmico publicados, encontrando que la aplicación computacional desarrollada en FORTRAN, es capaz de determinar la temperatura en cualquier parte de la lata y es capaz de soportar cambios en la conductividad térmica del producto así como las variaciones de las temperaturas de retorta.

Fasina y Fleming (2001), desarrollaron el método de diferencias finitas para la forma de cilindros finitos de pepinos, con la finalidad de simular la transferencia de calor durante el escaldado de los mismos, determinando experimentalmente los valores de conductividad térmica, calor específico y densidad de los pepinos para incorporarlos en la ecuación diferencial de difusión del calor. Encontrando un aceptable ajuste de los valores reales con los simulados por diferencias finitas, con un error inferior de 4.5 ° C.

Loss *et al.* (2011), simularon el secado convectivo de cubos de papaya de 1x1x1 cm, 2x2x2 cm y 3x3x3 cm a las temperaturas de 50, 60 y 70°C, mediante los método de diferencias

finitas explícitas y el método implícito de Crank-Nicolson, encontrando que el método explícito ajusta mejor los resultados para los cubos de 2x2x2 cm y 3x3x3 cm, alegando que es muy difícil mantener la posición central de la termocupla, durante el tratamiento.

Palazoğlu (2006), desarrolló el método de diferencias finitas en partículas cúbicas en 3D empleando el concepto de resistencia térmica programado en el lenguaje Visual Basic® 6, validando la solución numérica obtenida con la solución analítica en tres dimensiones, utilizando cubos de papas de 0.127 cm por lado, adquiriendo las propiedades térmicas de la literatura, encontrando que se requiere un total de 10 nodos por cada eje y un diferencial de tiempo de 0.025 segundos para converger la solución numérica con la solución analítica. Similar estudio es la investigación realizada por Palazoğlu y Sandeep (2002), quienes validan la solución numérica con la solución analítica de transferencia de calor de un alimento de forma esférica, encontrando que el uso de 10 nodos en dirección radial, con un incremento de 0.025 segundos fue suficiente para obtener respuestas similares entre la simulación analítica y la simulación numérica.

Delgado y Sun (2003), utilizan la solución en una dimensión (1D) de la ecuación de Fourier, para simular la transferencia de calor y de masa durante el descongelamiento del jamón, implementó un programa de ordenador con el esquema de diferencias finitas explícitas programado en el lenguaje Visual Basic® 5. El procedimiento desarrollado por los autores, se utilizó para examinar la influencia de varias condiciones de almacenamiento y propiedades térmicas y físicas sobre el tiempo de descongelación, encontrando que el efecto de la incertidumbre de las propiedades termofísicas en la predicción del tiempo descongelación es importante. Los resultados de la simulación se compararon con las mediciones experimentales, y se encontraron los valores predictivos ajustan correctamente a los valores experimentales.

Scheerlinck *et al.* (2004), mencionan que el buen ajuste entre los valores simulados y experimentales, en la simulación de transferencia de calor, se debe especialmente si se tiene en cuenta un cierto nivel de incertidumbre en: (i) la forma del alimento, (ii) la posición exacta de registro de temperatura, (iii) la asertividad de los valor de las propiedades térmicas y físicas, y (iv) el valor real del coeficiente de transferencia de calor de superficie.

El método de diferencias finitas también se viene utilizando para determinar algunas propiedades de los alimentos, durante los procesos de transferencia de calor, como por ejemplo el trabajo realizado por Betta *et al.*, (2009) quienes desarrollan el método de

diferencias finitas centrales y explícitas para simular la transferencia de calor en cilindros de dos dimensiones (2D), con el fin de obtener un método rápido para determinar el valor de difusividad térmica (α) de alimentos enlatados, mediante la optimización del mínimo valor de la suma de cuadrados del error encontrado entre la curva de calentamiento real y la curva de calentamiento simulada. El método planteado fue comparado con otras técnicas para determinar difusividad térmica (α), encontrando valores muy cercanos a los obtenidos mediante las diferentes técnicas.

Mariani *et al.* (2008), presentaron un nuevo enfoque para la estimación de la difusividad térmica aparente de alimentos a diferentes temperaturas de secado. La ecuación 1D de Fourier fue desarrollada por el método de diferencias finitas acoplado a una técnica de optimización utilizado en el método inverso. El modelo matemático, propuesto por los autores, considera los efectos de la contracción y la transferencia de calor por convección en la superficie de la fruta. Incluyendo estos dos parámetros en la simulación, proporcionan un mejor ajuste de mínimos cuadrados entre las temperaturas experimentales y predichas. Este estudio demuestra que un pequeño cambio en la temperatura y el contenido de humedad de plátano puede causar un cambio brusco en la difusividad térmica aparente, que disminuyen con la disminución de la humedad. El análisis estadístico muestra el excelente acuerdo entre las curvas notificadas y estimación

Otro trabajo que utiliza el método de diferencias finitas para determinar propiedades térmicas de los alimentos es el de Schmolka *et al.* (1997), quienes determinan simultáneamente el calor específico (c_p) y conductividad térmica (k) de yerba mate (*Ilex paraguariensis* Saint Hilaire), utilizando el método de diferencias finitas, encontrando que ambas propiedades se pueden determinar con un error promedio de 9.87%.

2.5 CONDICIONES INICIALES Y DE FRONTERA EN LA ECUACIÓN DE DIFUSIÓN DE CALOR

2.5.1 Generalidades

Incropera (1999), menciona que para determinar la distribución de temperaturas en un medio es necesario resolver la forma apropiada de la ecuación de calor. Sin embargo, esta solución depende de las condiciones físicas que existan en las fronteras del medio y, si la situación

depende del tiempo, también dependerá de las condiciones que existan en el medio en algún tiempo inicial.

Kookos y Stoforos (2015); Hahn y Özişik (2012), señalan que la ecuación de difusión de calor implica la primera derivada con respecto al tiempo y la segunda derivada con respecto a las coordenadas espaciales. Como resultado de su solución, es necesario tener una condición inicial y dos condiciones de contorno para cada coordenada, para describir los problemas de transferencia de calor en estado no estacionario.

Kookos y Stoforos (2015), mencionan que la condición de frontera comúnmente utilizada, y posiblemente la más simple posible, es tener una distribución de temperatura fija a través del límite. Esto se conoce como condición de contorno de primer orden. La segunda posibilidad es una especificación sobre el flujo de calor a través del límite, como es para el caso más común el cual es mantener un de flujo de calor constante, o para un caso especial, como es que exista una superficie aislada.

La condición de frontera de tercera clase u orden corresponde a la existencia de calentamiento (o enfriamiento) por convección en la superficie. La ecuación básica para la convección es la ecuación de Newton que simplemente establece que el flujo de calor por convección es proporcional a la diferencia entre la temperatura superficial (T_s) y la temperatura del fluido (normalmente denotado por T_∞) multiplicado por el coeficiente de transferencia de calor por convección ($h=W/m^2\text{°C}$).

Los tres tipos de orden de condiciones de fronteras que se pueden presentar en el análisis de la ecuación de difusión de calor, se resumen en la Tabla 5.

Sablani (2009), indica que el coeficiente de transferencia de calor no es una propiedad intrínseca del alimento, la cual refleja las condiciones entre el alimento y el medio de transmisión de calor. Los valores típicos de los coeficientes de transferencia de calor se muestran en la Tabla 6.

Çengel (2007), señala que la transferencia de calor de los alimentos en el medio, depende de la velocidad del medio en movimiento, la rugosidad de la forma, la superficie del alimento y otros factores. Michailidis *et al.* (2009), mencionan que esta propiedad está relacionada con las propiedades de transporte de calor de los alimentos (conductividad térmica), y depende en gran medida de las características de flujo de fluido (la velocidad y la intensidad de la turbulencia) y las características del alimento (forma, dimensiones, rugosidad de la

superficie, temperatura de la superficie), así como el equipo de transferencia de calor y de las propiedades térmicas y físicas del sistema (densidad, calor específico y conductividad térmica).

Tabla 5: Condiciones de frontera para la ecuación de difusión de calor en la superficie (x=0)

Orden	Condición	Ecuación	
Primero	Temperatura superficial constante	$T_{(0,t)} = T_s$	(2.5)
	Fuljo de calor superficial constante		
Segundo	a) Flujo finito de calor	$-k \frac{\partial T}{\partial x} _{x=0} = q''$	(2.6)
	b) Superficie adiabática o aislada	$\frac{\partial T}{\partial x} _{x=0} = 0$	(2.7)
Tercero	Convección superficial	$-k \frac{\partial T}{\partial x} _{x=0} = h(T_\infty - T_{(0,t)})$	(2.8)

FUENTE: Kookos y Stoforos (2015); Hahn y Özişik (2012); Incropera (1999).

Estos diversos factores, son muy difíciles de explicar matemáticamente y en lugar de evaluar su efecto global, se cuantifican por el coeficiente de transferencia de calor de superficie (h) (Çengel, 2007).

2.5.2 Métodos para determinar el coeficiente de transferencia de calor (h)

Según Michailidis *et al.* (2009), el coeficiente de transferencia de calor son específicos para cada equipo de procesamiento y sistema de fluido y están relacionados con la estructura física del alimento. En la mayoría de casos, se determinan a partir de las medidas experimentales en plantas piloto o en equipos industriales.

Rahman (1995), menciona cuatro diferentes técnicas para la estimación del coeficiente de transferencia de calor, entre éstas están:

1. Métodos de estado estacionario

a. Método de interferencia

b. Método de calentamiento constante

2. Método de estado cuasi-estacionario

3. Método de estado no estacionario

a. Solución analítica

b. Solución numérica

c. El método de Plank

d. Método de la tasa de evaporación

4. Método de superficie de flujo de calor

Cabe señalar que todos los métodos anteriores mencionados, son aplicables cuando las partículas o sólidos están en reposo y el fluido está en movimiento o reposo. Cuando ambos, sólido y el líquido se están moviendo; se aplican técnicas especiales, como los trabajos publicados por Sastry *et al.* (1989), Ramaswamy *et al.* (1992), y Mwangi *et al.* (1993).

La técnica más utilizada para formas regulares es la utilización de moldes de aluminio o cualquier metal altamente conductor del calor, con la finalidad de aplicar el análisis de concentrados el cual hace uso del perfil de temperatura para determinar (h) (Erdoğdu, 2008). Esta técnica considera que la pieza de metal se encuentra en un estado cuasi-estacionario, con lo cual, la transferencia de calor por conducción dentro de la pieza de metal sea uniforme en cualquier punto (Michailidis *et al.*, 2009); aunque esta es una técnica que no puede aplicarse a todos los procesos, ya que no refleja el verdadero comportamiento de un alimento (Erdoğdu, 2008). Yıldız *et al.* (2007), mencionan que el uso de moldes de aluminio no es una técnica apropiada para determinar el valor de (h) en procesos de fritura, ya que el alimento sometido a temperaturas de fritura no se comporta de la misma manera que un molde de aluminio.

Erdoğdu (2005), proporciona una revisión del uso potencial uso de la solución analítica para obtener el valor de (h), utilizando los datos experimentales de tiempo y temperatura, cuando se conoce exactamente la ubicación de la termocupla. Ramesh y Satyanarayana (1997), determinaron el coeficiente de transferencia de calor durante la cocción al vapor de verduras

utilizando el ratio de temperatura obtenida en el centro de la muestra, mediante la aplicación de la solución analítica. Awuah *et al.* (1995) compararon dos metodologías para determinar el coeficiente de transferencia de calor, determinando que no existe diferencia significativa cuando se comparan los resultados; ambos métodos se basan en el uso de datos experimentales de tiempo y temperatura y el cálculo de (*h*) es mediante el uso de las ecuaciones analíticas.

Tabla 6: Valores típicos del coeficiente de transferencia de calor (*h*) en operaciones de procesamiento de alimentos

Sistema de transferencia de calor	<i>h</i> (W/m ² •C)
Equipos con convección natural de aire	5 – 20
Hornos de panificación	20 - 80
Secador de aire / periodo de velocidad constante	30 – 200
Secador de tambor	1135–1700
Agua / flujo turbulento	1000–3000
Agua hirviendo	5000–10000
Nitrógeno líquido en contacto con el alimento	600–800
Refrigeración	20–200
Congelación criogénica	90–200
Autoclavado de alimentos	150–500
Esterilización aséptica	500–3000
Congelación por aire	20–500
Fritura por inmersión	250–1000

FUENTE: Hallstrom *et al.* (1988); Perry y Green (1997); Rahman (1995); Saravacos (1995); Saravacos y Maroulis (2001).

Los valores de (h) pueden variar dependiendo de las condiciones del medio a las cuales se ve sometido el alimento, Khaled *et al.* (1994) y Alhamdan *et al.* (1990) reportan que el incremento de la viscosidad ocasiona la disminución de (h) y Awuah *et al.* (1993) reportan que el aumento de (h) con el incremento de la temperatura del medio.

En una reciente investigación Palazoğlu (2006), muestra como afecta un alta y bajo valor de (h) en la propagación del calor, demostrando que la velocidad de transferencia de calor es una función de la difusividad térmica y el coeficiente de transferencia de calor.

2.6 DIFUSIVIDAD TÉRMICA (α)

2.6.1 Generalidades

Para resolver el problema de la transferencia de calor es necesario conocer las propiedades térmicas y físicas de los alimentos que definen apropiadamente el comportamiento térmico del alimento durante los procesos que involucren transferencia de calor.

La difusividad térmica es una propiedad derivada, que resulta del ratio de la conductividad térmica entre la densidad y el calor específico (Ec. 2.9) y sugiere una velocidad de calentamiento, por lo tanto siempre está asociado con el estado inestable o flujo de calor transitorio (Mohsenin, 1980).

$$\alpha = \frac{k}{\rho c_p} \quad (2.9)$$

Donde:

k : Conductividad térmica ($W/m \text{ } ^\circ C$)

ρ : Densidad (kg/m^3)

c_p : Calor específico ($kJ/kg \text{ } ^\circ C$)

Propiedades tales como la conductividad térmica, calor específico, y densidad, juegan un papel importante en el diseño y análisis de los procesos de alimentos y de los equipos de procesamiento. En situaciones de transferencia de calor en estado no estacionario, las propiedades antes mencionadas varían con la temperatura (Singh y Heldman, 2014;

Heldman, 2001). Algunos valores de difusividad térmica en hortalizas se muestran en la Tabla 7.

Ozisik (1993), menciona que el significado físico de difusividad térmica está asociado con la velocidad de propagación de calor en el producto sólido. Cuanto mayor es la difusividad térmica más rápida es la velocidad de transferencia de calor.

2.6.2 Métodos para determinar (α)

La difusividad térmica (α) puede ser calculada determinando los valores de conductividad térmica, calor específico y densidad a una determinada temperatura, pero para ello se requiere considerable tiempo y complejas técnicas instrumentales (Singh, 1982).

Otra manera de poder determinar el valor de la difusividad térmica es llevar a cabo un experimento que permita la medición directa de ésta propiedad.

Dentro de los métodos conocidos para determinar directamente la difusividad térmica, tenemos al propuesto por Dickerson (1965), quien explica una metodología experimental basada en el supuesto de una diferencia de temperatura constante entre el centro y la superficie del producto alimenticio, después de un cierto período de demora. Nesvadba (1982) realizó una revisión crítica de los enfoques matemáticos para determinar directamente el valor de difusividad térmica.

Según Singh (1982) existen cuatro métodos que se han utilizado con mayor frecuencia, los cuales son:

- 1.- Estimación de mínimos cuadrados*
- 2.- El uso de curvas de penetración de calor*
- 3.- El uso de gráficos de tiempo y temperatura*
- 4.- El uso de soluciones analíticas*

Actualmente se siguen utilizando estas metodologías y en recientes publicaciones se han incrementado el uso de la solución analítica o numérica de la ecuación de transferencia de calor para determinar el valor de difusividad térmica.

Bairi *et al.* (2007), planteo un método para determinar el valor de difusividad térmica (α) utilizando la solución analítica 1D de un cilindro infinito, para tal efecto, rellena un cilindro

de aluminio con diversos materiales biológicos, como carne, agua, aceites e inserta una termocupla en el centro del cilindro, encontrando una variación de los valores de difusividad térmica de acuerdo a la variación de la temperatura, los autores demuestran que se puede tener un error del 3% en los resultados, el cual resulta insignificante debido a la sencillez del método planteado.

Tabla 7: Valores típicos de difusividad térmica de algunas hortalizas

Alimento	Temperatura (°C)	Difusividad térmica $\times 10^{-7}$ (m²/s)	Referencia
Arveja	27 a -18	1.24	Gaffney <i>et al.</i> (1980)
Calabaza	25	1.56	Gaffney <i>et al.</i> (1980)
Camote	42	1.2	Gaffney <i>et al.</i> (1980)
Cebolla	20 a 4	1.41	Gordon and Thorne (1990)
Nabo	48	1.34	Gaffney <i>et al.</i> (1980)
Papa	20	1.48	Andrieu <i>et al.</i> (1986)
Papa	24 a 91	1.17	Gaffney <i>et al.</i> (1980)
Papa	60 a 100	1.39–1.46	Tung <i>et al.</i> (1989)
Pepino	20	1.39	Andrieu <i>et al.</i> (1986)
Tomate	23	1.51	Hayakawa and Succar (1983)
Zanahoria	20	1.4	Andrieu <i>et al.</i> (1986)

De la misma manera Erdoğan *et al.* (2014) determina el valor de difusividad térmica (α) y conductividad térmica de plátanos verdes y maduros, utilizando datos experimentales de

perfiles de temperatura de refrigeración de papas, encontrando (α) utilizando la solución analítica de un cilindro infinito.

Erdoğdu (2005), brinda una detallada explicación de como utilizar los valores experimentales de ratios de temperatura, para calcular el valor efectivo de difusividad térmica, utilizando sólo el primer término de la solución analítica, considerando como infinito al valor del coeficiente de transferencia de calor por convección.

También se han propuestos métodos más sofisticados, como la utilización de láser y detectores de infrarrojos para determinar el valor de difusividad térmica (Cernuschi *et al.*, 2004; Woodfield *et al.*, 2007).

En la literatura existen numerosos modelos matemáticos para predecir las propiedades térmicas y físicas de los alimentos considerando el contenido de agua, sólidos totales, etc., siendo la correlación más utilizada la propuesta por Choi y Okos (1986), debido a que considera toda la composición del alimento y su dependencia con la temperatura.

III. MATERIALES Y MÉTODOS

3.1 LUGAR DE EJECUCIÓN

El presente trabajo de investigación se desarrolló en los laboratorios de la Universidad Nacional Agraria La Molina - Lima y en el laboratorio de Química de la Universidad Señor de Sipán ubicado en Pimentel - Chiclayo - Lambayeque.

3.2 MATERIAS PRIMAS

Se emplearon diversos vegetales como loche (*Cucurbita moschata* Duch.) y papa variedad Yungay (*Solanum tuberosum* L.), adquiridos en el Mercado Central de Abastos de la Ciudad de Lambayeque. La selección de los vegetales se realizó en base a su estado de madurez, eliminando aquellas que presentaron deterioro físico, golpes y/o signos de deterioro microbiológico. Las muestras seleccionadas fueron almacenadas a temperatura ambiente evitando el contacto con medios húmedos.

3.3 EQUIPOS, MATERIALES Y REACTIVOS

3.3.1 Equipos

- Baño maría, provisto de un termostato (Tom's Tech[®] Group, USA).
- Termocupla tipo K, de 3.0 mm de diámetro y 200 mm de longitud (Modelo TPK-03S, TECPEL[®], Taiwan).
- Termocupla tipo K, de 1mm de diámetro y 1m de cable (Modelo TPK-01, TECPEL[®], Taiwan).
- Datalogger, provisto de un software de recolección de datos (Modelo DTM-507, TECPEL[®], Taiwan).
- Software de recolección de datos (DTM 500SW, TECPEL[®], Taiwan).

- Balanza analítica, de sensibilidad de 0.1 mg (Modelo AB204, Mettler Toledo, Switzerland).
- Balanza analítica, de 4 dígitos (Modelo SP602, Scout Pro[®], USA).
- Agitador mecánico (Modelo 11706379, Fisher Scientific, USA).
- Bomba de vacío, (Thomas Scientific, USA).
- Cocina eléctrica (Cole-Parmer, Instrument Company).
- Estufa a vacío (Modelo UM100, Memmer, Alemania).
- Mufla (Labor Muszeripari Muveck).
- Estufa (Fisher Scientific, USA).
- Equipo Kjeldhal, Digestor RACK.
- Equipo Soxhlet.
- Potenciómetro digital (Hanna).
- Refractómetro (Atago[®]).
- Equipo de titulación.
- Refrigeradora.
- Licuadora.
- Termómetro.
- Cronómetro.
- Vernier.

3.3.2 Materiales

- Tubos Falcon de 100 mL.
- Fiolas de 50 y 100 mL.
- Matraces Erlenmeyer de 50, 100 y 250 mL.
- Probetas graduadas de 10, 50, 100 y 250 mL.
- Beacker de 100, 250 y 500 mL.
- Pipetas de 1, 2, 5,10 y 20 mL.
- Balones de digestión.
- Placas de Petri.
- Buretas.
- Kitasatos.

- Morteros de porcelana y pilones.
- Embudos Bushner y de vidrio.
- Crisoles de porcelana.
- Vasos de precipitación.
- Baguetas.
- Campana desecadora.
- Balones de vidrio.
- Bolsas flexibles.
- Gradillas.
- Papel filtro.

3.3.3 Reactivos

- Ácido sulfúrico concentrado.
- Ácido clorhídrico concentrado.
- Etanol.
- Hidróxido de sodio.
- Hexano.
- Sulfato de cobre.
- Sulfato de potasio.
- Fenol.
- Agua destilada.

3.4 MÉTODOS DE CONTROL

3.4.1 Análisis físicos y químicos de las materias primas

- a) Determinación del pH.** Se determinó el pH de las muestras por el método potenciométrico (AOAC - 945.27).
- b) Determinación de sólidos solubles.** Se determinó los °Brix de las muestras mediante el método refractométrico (AOAC -920.151).

- c) **Determinación de acidez.** Se determinó la acidez de las muestras, mediante titulación, siguiendo el método (AOAC - 942.15).

3.4.2 Análisis proximal de las materias primas

- a) **Humedad.** Se determinó la humedad de la muestra mediante el método gravimétrico, el cual consiste en almacenar las muestras en estufa a presión atmosférica a 105°C por 14 a 16 horas hasta obtener un peso constante (Método AOAC – 950.46).
- b) **Proteína.** Se determinó mediante el método semi-micro Kjeldhal, utilizando el factor N x 6.25 para llevar el nitrógeno a proteína total (Método AOAC – 928.08).
- c) **Grasa.** Se determinó mediante el método Soxhlet, empleando diversos solventes orgánicos (hexano) (AOAC – 960.39).
- d) **Fibra Bruta.** Se determinó mediante digestión ácida y alcalina de las muestras (AOAC – 962.09).
- e) **Cenizas.** Se determinó por incineración de la muestra en mufla a 600°C por 6 horas (AOAC – 923.03).
- f) **Carbohidratos.** Se determinó por diferencia entre los componentes encontrados.

3.5 ESCALDADO DEL LOCHE Y LA PAPA

El loche y la papa se lavaron manualmente y pelaron con un cuchillo de acero inoxidable, luego se cortaron en forma de cubos de 1x1x1 cm; 2x2x2 cm y 3x3x3 cm, con ayuda de un vernier.

El escaldado se realizó en baño maría (Tom's Tech® Group, USA) de 15 litros de capacidad, a las temperaturas de 70, 80 y 90 °C durante un periodo de 5 minutos con intervalos de data de 1 segundo. El baño maría no contó con agitación, es por eso que se prendió con 30 minutos de anticipación para asegurar la uniformidad de la temperatura en todo el espacio. La temperatura del medio tuvo una variación de ± 0.3 °C. Se registraron las temperaturas en el

centro, para todos los tamaños de los cubos (Figura 4.1); para los cubos de loche y de papa de 3x3x3 cm, se tomó un punto con coordenadas específicas (10,1,1) para la verificación de la simulación numérica (Figura 4.2). Los perfiles de temperaturas de las muestras se tomaran por sextuplicado.

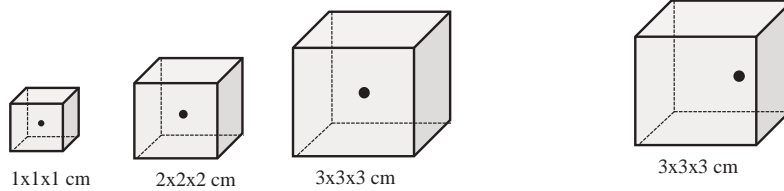


Figura 4.1: Posición central (1,1,1) de inserción de la termocupla.

Figura 4.2: Posición (10,1,1) de inserción de la termocupla.

3.6 MEDICIÓN DE LA TEMPERATURA

Los valores de temperatura fueron adquiridos, con una precisión de 0.2°C, por cada segundo. Se utilizó una termocupla de punta tipo K (TPK – 03S, TECPEL®, Taiwán) la cual fue incrustada hasta el punto céntrico geométrico de cada cubo de loche y papa y otra termocupla de bola tipo K (TPK – 01S, TECPEL®, Taiwán) la cual se mantuvo sumergida en el medio de calentamiento, ambas termocuplas estuvieron conectadas a un multímetro digital (DTM – 5074, TECPEL®, Taiwán) y éste a la vez conectado a un ordenador personal (Quad-Core, Samsung®, Corea del Sur). Con la ayuda del *software* de recolección de datos (DTM 500SW, TECPEL®, Taiwan), se adquirieron los datos de temperatura en tiempo real (Figura 5).

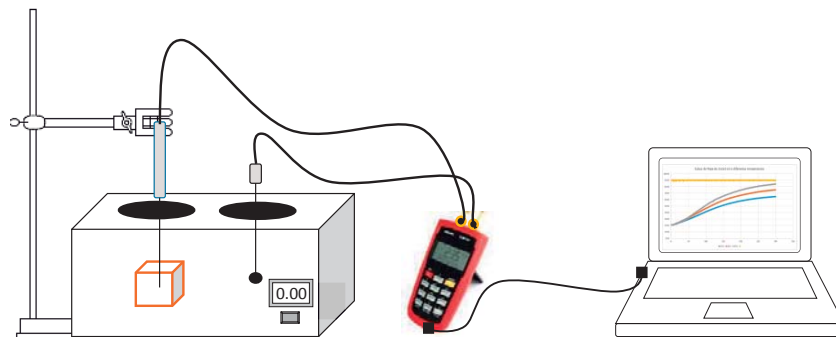


Figura 5: Sistema de adquisición de datos de temperatura durante el escaldado de los vegetales

3.7 DETERMINACIÓN DEL COEFICIENTE DE TRANSFERENCIA DE CALOR (h)

Se determinó el coeficiente de transferencia de calor por convección, aplicando el análisis de concentrados, utilizando cubos de aluminio de 1x1x1 cm; 2x2x2 cm y 3x3x3 cm. Dichos cubos se sometieron a las temperaturas de escaldado de 70, 80 y 90 °C y se tomaron los registros de temperaturas en el centro de cada cubo. Asumiendo que las propiedades térmicas del aluminio son: $\rho = 2707 \text{ kg/m}^3$; $k = 204 \text{ W/m}^\circ\text{C}$; $cp = 896 \text{ J/kg}^\circ\text{C}$ según Singh y Heldman (2014).

Se determinó el coeficiente de transferencia de calor (h) aplicando la metodología descrita por Singh y Heldman (2014); Hahn y Özişik (2012); Sablani (2009), Çengel (2007), quienes mencionan que para el análisis de sistemas concentrado, el balance de calor puede ser escrito como:

$$\frac{T - T_\infty}{T_i - T_\infty} = \exp \left[- \frac{hAt}{\rho V c_p} \right] \quad (3.1)$$

Donde:

T_i : Es la temperatura inicial del cubo de aluminio (°C)

T_∞ : Es la temperatura del medio de calentamiento (°C)

V : Es el volumen de los cubos (m^3)

t : Es el tiempo (s)

A : Es el área de los cubos de aluminio (m^2)

ρ : Es la densidad del cubo de aluminio (kg/m^3)

c_p : Es el calor específico de sólidos ($kJ/kg^\circ\text{C}$)

El valor de h se calculó a partir de la pendiente de la recta del $\ln [(T - T_\infty) / (T_i - T_\infty)]$ en función de t . Considerando la variación de la temperatura en el interior del sólido como insignificante debido a que el Numero de Biot fue menor que 0.1.

3.8 DETERMINACIÓN EXPERIMENTAL DE LA DIFUSIVIDAD TÉRMICA (α)

Se determinó la difusividad térmica del loche y la papa a las temperaturas de 40, 50, 60, 70, 80 y 90 °C, con la finalidad de obtener una función matemática que relacione la difusividad térmica con respecto a la temperatura.

Para tal efecto se acondicionó un cilindro hueco de aluminio de 17 cm de longitud (longitud efectiva: 15 cm) y 0.0595 cm de radio, en donde se introdujeron muestras de loche y papa. Se insertó una termocupla de punta tipo K (TPK – 03S / TECPEL[®]), procurando situarla en el centro de la muestra y se taparon los extremos del tubo con caucho como material aislante, como se muestra en la Figura 6.

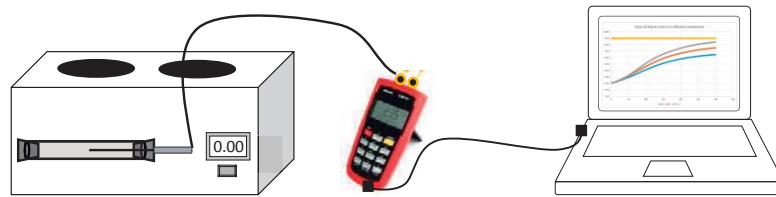


Figura 6: Sistema de adquisición de datos de transferencia de calor en un cilindro infinito hueco de aluminio, para determinar difusividad térmica.

Se tomaron lecturas de calentamiento de las muestras por triplicado y se procesaron siguiendo el procedimiento descrito por Baïri *et al.* (2007), quienes utilizaron la solución analítica 1D de la ecuación de transferencia de calor de un cilindro infinito.

Donde la solución analítica de difusión de calor en un cilindro infinito, descrita en la Tabla 4, puede expresarse en un solo término, debido a que el coeficiente de transferencia de calor (h), es demasiado grande, obteniendo valores de Número de Biot mayores a 40. Tomando entonces la precisión en el proceso experimental de sumergir la muestra cilíndrica en un fluido caracterizado por su alta conductancia de superficie, la ecuación se escribe de la siguiente manera:

$$\frac{T_{(x,t)} - T_{\infty}}{T_0 - T_{\infty}} = \left[\frac{2 \cdot J_1(\mu_n)}{\mu_n \cdot [J_0^2(\mu_n) + J_1^2(\mu_n)]} \cdot J_0\left(\mu_n \cdot \frac{\varepsilon}{L}\right) \right] \cdot \exp\left(-\mu_n^2 \frac{\alpha \cdot t}{L^2}\right) \quad (3.2)$$

Denominando G , a la parte constante de la ecuación y eliminando el exponente mediante la obtención del logaritmo neperiano a ambas partes de la ecuación, ésta se escribe de la siguiente manera:

$$\ln \frac{T_{(x,t)} - T_{\infty}}{T_0 - T_{\infty}} = G \cdot \left(-\mu_n^2 \frac{\alpha \cdot t}{L^2}\right) \quad (3.3)$$

Convirtiendo la Ecuación 3.3 en una recta, donde la pendiente $(-\mu_n^2 \frac{\alpha \cdot t}{L^2})$ se utilizó para determinar el valor efectivo de difusividad térmica (α) para cada temperatura de experimentación, utilizando la primera raíz de la ecuación característica $\mu_n = 2.045$.

3.9 DETERMINACIÓN DE LA CONDUCTIVIDAD TÉRMICA (k)

Para determinar el valor de conductividad térmica se utilizó ecuación propuesta por Choi y Okos (1986) (Ec. 3.4), la cual relaciona la composición proximal del alimento y la temperatura.

$$k = \sum (k_{si} E_{si}) \quad (3.4)$$

Donde (E_{si}) es la fracción en volumen y se estima para cada componente del alimento (Ec. 3.5), y la conductividad térmica de cada componente k_{si} y ρ_i , se determinaron utilizando las correlaciones propuestas en el ANEXO I.

$$E_i = \frac{\frac{X_i}{\rho_i}}{\sum \left(\frac{X_i}{\rho_i}\right)} \quad (3.5)$$

Sustituyendo los términos de composición proximal del loche y la papa, se determinó la conductividad térmica a las temperaturas de 70, 80 y 90 °C. Se consideró sólo ese rango de temperatura, porque esta propiedad sólo se necesita para la simulación de la transferencia de calor en la superficie del alimento.

3.10 SIMULACIÓN DE LA TRANSFERENCIA DE CALOR MEDIANTE LA SOLUCIÓN ANALÍTICA EN 3D

Se desarrolló la ecuación de difusión de calor, para la forma cúbica en 3D, mediante el método de separación de variable, intersectando tres placas infinitas (Fig. 7).

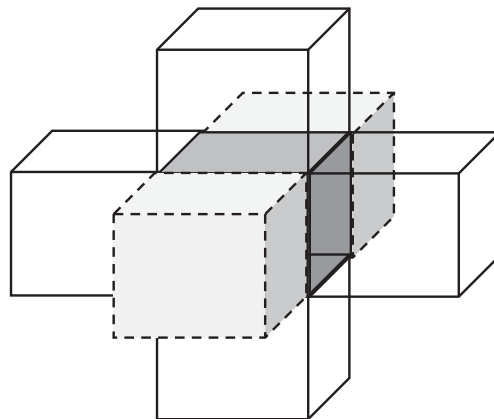


Figura 7: Intersercción de tres placas infinitas con el mismo espesor, para formar un cubo finito en 3D

Aplicando el concepto propuesto por Newman (1936), la solución analítica para un cubo en 3D, resulta de la multiplicación del ratio de temperaturas de tres placas infinitas (Ec. 3.6).

$$\left(\frac{T_{(x,y,z,t)} - T_{\infty}}{T_i - T_{\infty}}\right)_{3D} = \left(\frac{T_{(x,t)} - T_{\infty}}{T_i - T_{\infty}}\right)_x \cdot \left(\frac{T_{(y,t)} - T_{\infty}}{T_i - T_{\infty}}\right)_y \cdot \left(\frac{T_{(z,t)} - T_{\infty}}{T_i - T_{\infty}}\right)_z \quad (3.6)$$

Se utilizaron los seis primeros términos de la ecuación de serie infinita de difusión de calor, para la forma cúbica en 3D, considerando la transferencia de calor por convección en la parte externa, siguiendo el procedimiento descrito por Palazoğlu (2006), quedando la Ecuación (3.6) expresada de la siguiente manera:

$$\left(\frac{T_{(x,y,z,t)} - T_{\infty}}{T_i - T_{\infty}}\right)_{3D} = \sum_{n=1}^6 \left[\frac{2 \cdot \sin(\mu_n)}{\mu_n + \sin(\mu_n) \cdot \cos(\mu_n)} \cdot \exp\left(-\mu_n^2 \frac{\alpha t}{L^2}\right) \right]^3 \quad (3.7)$$

Dicha ecuación se programó en el lenguaje Visual Basic®-2013, incorporando el cálculo de las primeras seis raíces de la ecuación característica (μ) para una placa infinita ($N_{Bi} = \mu \cdot \tan(\mu)$), mediante el Método de Bisección.

3.11 SIMULACIÓN DE LA TRANSFERENCIA DE CALOR MEDIANTE DIFERENCIAS FINITAS EN 3D

Chamorro y Vidaurreta (2012) mencionan que la teoría utilizada para calcular el tiempo de escaldado es 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.

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

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \alpha \cdot \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) \quad (3.8)$$

Donde las condiciones iniciales y de fronteras son:

$$t = 0 \quad T = T_0 \text{ en todo el producto} \quad (3.9)$$

$$t > 0 \quad x = L_x \quad h \cdot (T_f - T) = k \cdot \frac{\partial T}{\partial x} \quad (3.10)$$

$$y = L_y \quad h \cdot (T_f - T) = k \cdot \frac{\partial T}{\partial y} \quad (3.11)$$

$$z = L_z \quad h \cdot (T_f - T) = k \cdot \frac{\partial T}{\partial z} \quad (3.12)$$

$$t > 0 \quad x = 0 \quad \frac{\partial T}{\partial x} = 0 \quad (3.13)$$

$$y = 0 \quad \frac{\partial T}{\partial y} = 0 \quad (3.14)$$

$$z = 0 \quad \frac{\partial T}{\partial z} = 0 \quad (3.15)$$

Para simular numéricamente la transferencia de calor en 3D se utilizó el método de diferencias finitas explícitas, generando la red nodal solamente en 1/8 del volumen del cubo, como se muestra en la Figura 8.

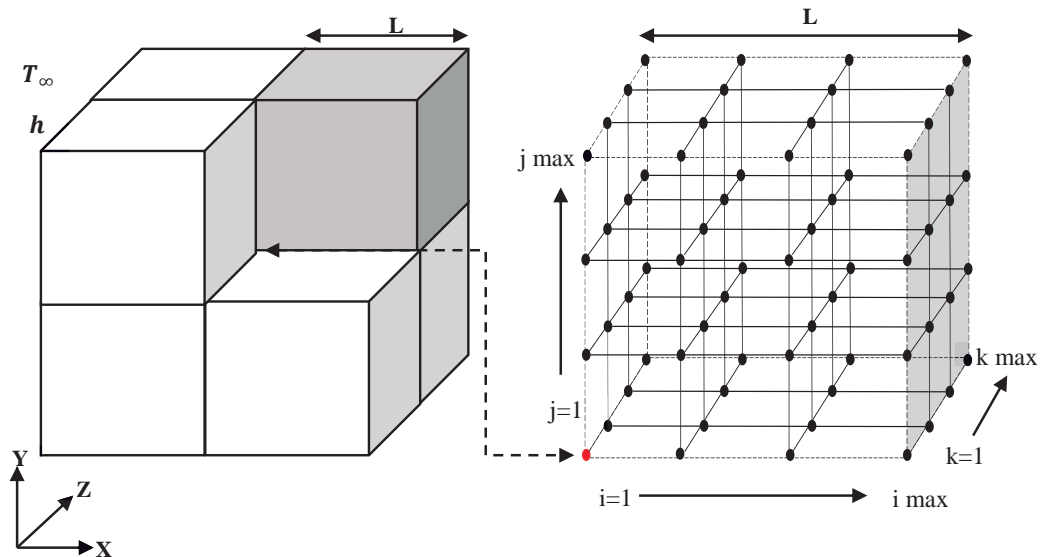


Figura 8: Generación de la red nodal en la octava parte de un cubo en 3D

Los nodos internos fueron programados para transferir el calor por conducción, considerando las seis conexiones nodales que puede tener un nodo interno, como se muestra en la Figura 9.

Aplicando el concepto de diferencias finitas explícitas en la ecuación diferencial ordinaria de difusión del calor, de coordenadas cartesianas (Ec. 3.8), se obtuvieron las siguientes diferencias finitas explícitas:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{T_{i,j,k}^{t+1} - T_{i,j,k}^t}{\Delta t} \quad (3.16)$$

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} = \frac{T_{i+1,j,k}^t - 2T_{i,j,k}^t + T_{i-1,j,k}^t}{\Delta x^2} \quad (3.17)$$

$$\frac{\partial^2 T}{\partial y^2} = \frac{T_{i,j+1,k}^t - 2T_{i,j,k}^t + T_{i,j-1,k}^t}{\Delta y^2} \quad (3.18)$$

$$\frac{\partial^2 T}{\partial z^2} = \frac{T_{i,j,k+1}^t - 2T_{i,j,k}^t + T_{i,j,k-1}^t}{\Delta z^2} \quad (3.19)$$

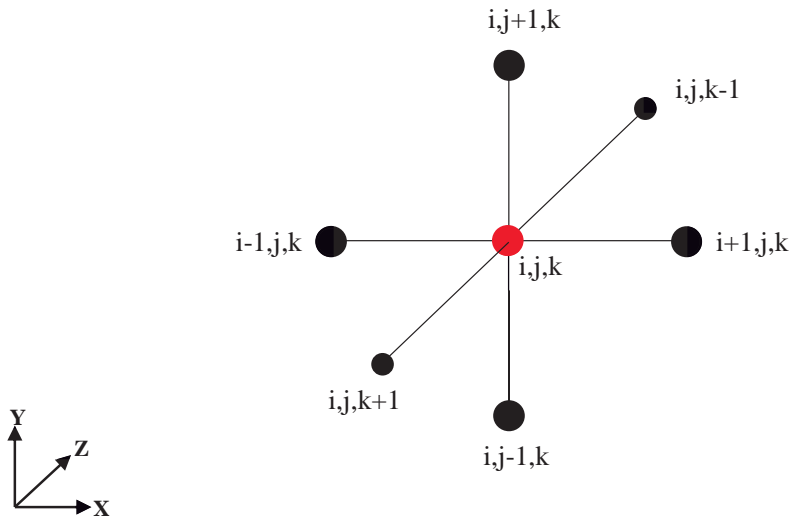


Figura 9: Nodo interno conectado con 6 nodos, en coordenadas cartesianas

Remplazando los términos definidos en las Ecuación (3.8), se obtuvo la siguiente ecuación:

$$\frac{T_{i,j,k}^{t+1} - T_{i,j,k}^t}{\Delta t} = \alpha \left(\frac{T_{i+1,j,k}^t - 2T_{i,j,k}^t + T_{i-1,j,k}^t}{\Delta x^2} + \frac{T_{i,j+1,k}^t - 2T_{i,j,k}^t + T_{i,j-1,k}^t}{\Delta y^2} + \frac{T_{i,j,k+1}^t - 2T_{i,j,k}^t + T_{i,j,k-1}^t}{\Delta z^2} \right) \quad (3.20)$$

La nueva temperatura para cada paso de tiempo, $T_{i,j,z}^{t+1}$, se calculó de la siguiente manera

$$T_{i,j,z}^{t+1} = (1 - 2F1 - 2F2 - 2F3)T_{i,j,k}^t + F1(T_{i+1,j,k}^t + T_{i-1,j,k}^t) + F2(T_{i,j+1,k}^t + T_{i,j-1,k}^t) + F3(T_{i,j,k+1}^t + T_{i,j,k-1}^t) \quad (3.21)$$

Donde: $F1 = \frac{\alpha \Delta t}{\Delta x^2}$, $F2 = \frac{\alpha \Delta t}{\Delta y^2}$ y $F3 = \frac{\alpha \Delta t}{\Delta z^2}$

La estabilidad de la Ecuación (5.21) se obtuvo según lo indicado por Ozisik (1993), haciendo que el cociente $(1 - 2F1 - 2F2 - 2F3)$ de la temperatura $T_{i,j,k}^t$ sea positivo. Considerando que $\Delta x = \Delta y = \Delta z$, el criterio de estabilidad para los nodos con transferencia de calor por conducción, se expresó de la siguiente manera:

$$1 - 6F \geq 0 \quad (3.22)$$

$$F \leq \frac{1}{6} \quad (3.23)$$

Con respecto a las temperaturas en los nodos exteriores se consideró la asunción de la temperatura inicial en el tiempo cero, pero apartir del primer segundo, los nodos externos fueron programados para transferir el calor por convección.

Para tal efecto se utilizó el concepto de volumen control. Realizando un balance de energía a los nodos externos, se obtuvieron tres diferentes caso, los cuales fueron:

I) Nodo conectado con 5 nodos (*nodo cara*)

Realizando un balance de energía al denominado “*nodo cara (i,j,k)*” como se muestra en la Figura 10, se obtuvo la siguiente expresión:

$$\rho c_p V_1 \frac{T_{i,j,k}^{t+1} - T_{i,j,k}^t}{\Delta t} = hA_1(T_\infty - T_{i,j,z}^t) + kA_1 \frac{T_{i+1,j,k}^t - T_{i,j,k}^t}{\Delta x} + kA_1 \frac{T_{i-1,j,k}^t - T_{i,j,k}^t}{\Delta x} + kA_1 \frac{T_{i,j+1,k}^t - T_{i,j,k}^t}{\Delta y} + kA_1 \frac{T_{i,j,k-1}^t - T_{i,j,k}^t}{\Delta z} \quad (3.24)$$

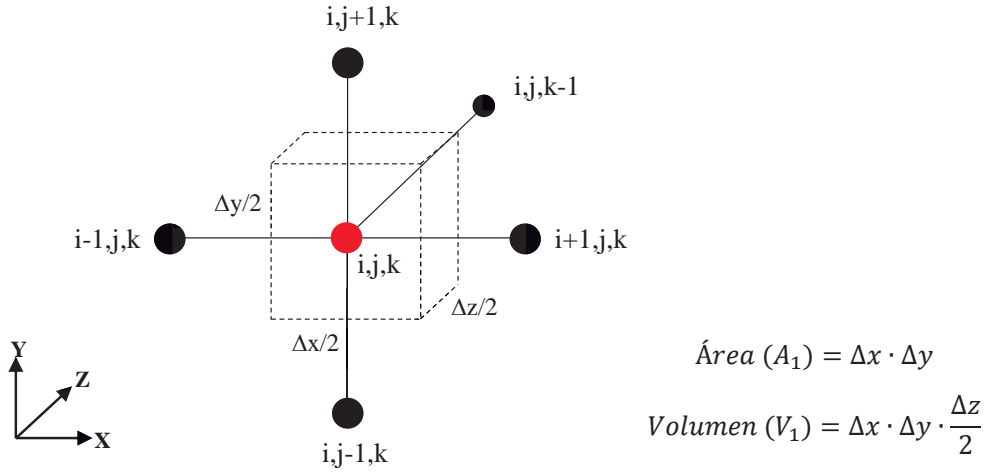


Figura 10: Nodo externo conectado con 5 nodos, en coordenadas cartesianas

Por efecto de reducción de términos, y con el fin de expresar la ecuación con respecto a propiedades térmicas conocidas, como conductividad térmica y difusividad térmica, la Ecuación (3.24) puede expresarse de la siguiente manera:

$$T_{i,j,k}^{t+1} = (1 - F4N_{Bi} - 5F4)T_{i,j,z}^t + F4N_{Bi}(T_\infty) + F4(T_{i+1,j,k}^t + T_{i-1,j,k}^t + T_{i,j+1,k}^t + T_{i,j-1,k}^t + T_{i,j,k-1}^t) \quad (3.25)$$

Donde $F4 = \frac{\alpha \Delta t}{\Delta x^2/2}$ y $N_{Bi} = \frac{\Delta x h}{k}$; considerando que $\Delta x = \Delta y = \Delta z$

El criterio de estabilidad para la Ecuación (3.25), se obtuvo haciendo que el cociente $(1 - F4N_{Bi} - 5F4)$ de la temperatura $T_{i,j,z}^t$ sea positivo. Por lo tanto, el criterio de estabilidad para los nodos con transferencia de calor por convección, denominados *nodo cara*, se expresó de la siguiente manera:

$$(1 - F4N_{Bi} - 5F4) \geq 0 \quad (3.26)$$

$$F4 \leq \frac{1}{(N_{Bi} + 5)} \quad (3.27)$$

II) Nodo conectado con 4 nodos (*nodo arista*)

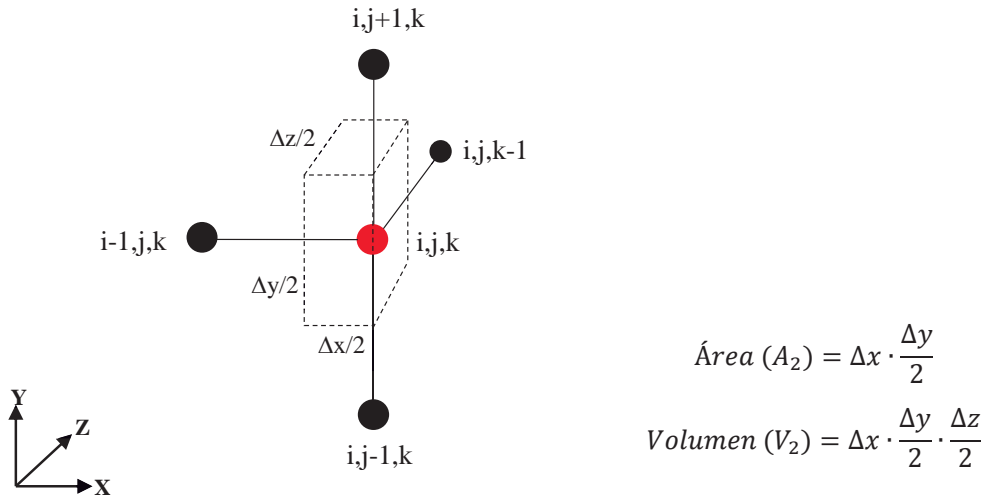


Figura 11: Nodo externo conectado con 4 nodos, en coordenadas cartesianas

Realizando un balance de energía al denominado “*nodo arista* (i,j,k)” como se muestra en la Figura 11, se obtuvo la siguiente expresión:

$$\begin{aligned} \rho c_p V_2 \frac{T_{i,j,k}^{t+1} - T_{i,j,k}^t}{\Delta t} = & 2 \left(h A_2 (T_\infty - T_{i,j,k}^t) \right) + k A_2 \frac{T_{i-1,j,k}^t - T_{i,j,k}^t}{\Delta x} + k A_2 \frac{T_{i,j+1,k}^t - T_{i,j,k}^t}{\Delta y} \\ & + k A_2 \frac{T_{i,j-1,k}^t - T_{i,j,k}^t}{\Delta y} + k A_2 \frac{T_{i,j,k-1}^t - T_{i,j,k}^t}{\Delta z} \end{aligned} \quad (3.28)$$

De la misma manera que en el caso anterior, la Ecuación (3.28) se expresó de forma resumida de la siguiente manera:

$$T_{i,j,k}^{t+1} = (1 - 2F5N_{Bi} - 4F5)T_{i,j,z}^t + 2F5N_{Bi}(T_{\infty}) + F5(T_{i-1,j,k}^t + T_{i,j+1,k}^t + T_{i,j-1,k}^t + T_{i,j,k-1}^t) \quad (3.29)$$

Donde $F5 = \frac{\alpha \Delta t}{\Delta x^2 / 2}$ y $N_{Bi} = \frac{\Delta x h}{k}$; considerando que $\Delta x = \Delta y = \Delta z$

El criterio de estabilidad para la Ecuación (3.29), se obtuvo haciendo que el cociente $(1 - 2F5N_{Bi} - 4F5)$ de la temperatura $T_{i,j,z}^t$ sea positivo. Por lo tanto, el criterio de estabilidad para los nodos con transferencia de calor por convección, denominados *nodo arista*, se expresó de la siguiente manera:

$$(1 - 2F5N_{Bi} - 4F5) \geq 0 \quad (3.30)$$

$$F5 \leq \frac{1}{(2N_{Bi} + 4)} \quad (3.31)$$

III) Nodo conectado con 3 nodos (*nodo vértice*)

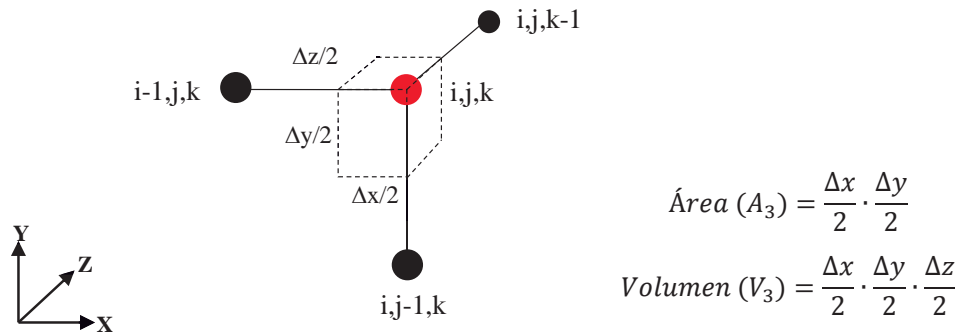


Figura 12: Nodo externo conectado con 3 nodos, en coordenadas cartesianas

Realizando un balance de energía al denominado “*nodo vértice (i,j,k)*” como se muestra en la Figura 12, se obtuvo la siguiente expresión:

$$\rho c_p V_3 \frac{T_{i,j,k}^{t+1} - T_{i,j,k}^t}{\Delta t} = 3 \left(hA_3 (T_\infty - T_{i,j,z}^t) \right) + kA_3 \frac{T_{i-1,j,k}^t - T_{i,j,k}^t}{\Delta x} + kA_3 \frac{T_{i,j-1,k}^t - T_{i,j,k}^t}{\Delta y} + kA_3 \frac{T_{i,j,k-1}^t - T_{i,j,k}^t}{\Delta z} \quad (3.32)$$

De la misma manera que en el caso anterior, la Ecuación 3.32, se expresó de forma resumida de la siguiente manera:

$$T_{i,j,k}^{t+1} = (1 - 3F6N_{Bi} - 3F6)T_{i,j,z}^t + 3F6N_{Bi}(T_\infty) + F6(T_{i-1,j,k}^t + T_{i,j-1,k}^t + T_{i,j,k-1}^t) \quad (3.33)$$

Donde $F6 = \frac{\alpha \Delta t}{\Delta x^2 / 2}$ y $N_{Bi} = \frac{\Delta x h}{k}$; considerando que $\Delta x = \Delta y = \Delta z$

El criterio de estabilidad para la Ecuación (5.33), se obtuvo haciendo que el cociente $(1 - 2F5N_{Bi} - 4F5)$ de la temperatura $T_{i,j,z}^t$ sea positivo. Por lo tanto, el criterio de estabilidad para los nodos con transferencia de calor por convección, denominados *nodo vértice*, se expresó de la siguiente manera:

$$(1 - 3F6N_{Bi} - 3F6) \geq 0 \quad (3.34)$$

$$F6 \leq \frac{1}{(3N_{Bi} + 3)} \quad (3.35)$$

Para validar la solución numérica por diferencias finitas en 3D, se utilizó la metodología propuesta por Palazoğlu (2006), tomando las propiedades térmicas y físicas de la papa, según la literatura (Tabla 8), así como el coeficiente de transferencia de calor real estimado y se simuló las curvas de calentamiento por 300 s, a la máxima temperatura de estudio, la cual fue de 90 °C. Se probaron diferentes números de nodos para los ejes x, y, z; así como diferentes espacios de tiempo (s), para todas las dimensiones en estudio y se compararon los

datos simulados numéricamente con la simulación analítica, como señalan Erdoğan y Turhan (2009); Cai *et al.* (2006). Adicionalmente, se utilizaron diferentes estadísticos para medir el grado de ajuste de las simulaciones.

Todas las ecuaciones anteriormente mencionadas se programaron en el lenguaje Visual Basic®-2013, con la flexibilidad de poder variar las condiciones del tratamiento térmico, dimensiones del alimento, propiedades térmicas y dimensiones de la red nodal.

Tabla 8: Propiedades térmicas y físicas de la papa según la literatura

Propiedad	Valor
Densidad (kg/m^3)	1090
Conductividad térmica ($W/m\ ^\circ C$)	0.554
Calor específico ($kJ/kg\ ^\circ C$)	3.515
Difusividad térmica (m^2/s)	1.45×10^{-7}

FUENTE: Singh y Heldman (2014).

3.12 SIMULACIÓN DE LA TRANSFERENCIA DE CALOR MEDIANTE DIFERENCIAS FINITAS EN 3D CON PROPIEDADES TÉRMICAS VARIABLES

Con la simulación numérica por diferencias finitas de la transferencia de calor en 3D validada, se incorporó una subrutina para variar las propiedades térmicas de cada nodo, según el incremento de la temperatura.

Para validar el nuevo modelo propuesto, se compararon los datos experimentales del escaldado del loche y la papa, de diferentes dimensiones con la simulación por diferencias finitas explícitas con propiedades térmicas variables.

La programación se desarrolló en el lenguaje Visual Basic®-2013, con la flexibilidad de poder editar las dimensiones del alimentos, condiciones del tratamiento, propiedades termo físicas, red nodal y variación de tiempo.

3.13 ANÁLISIS ESTADÍSTICO DE LOS DATOS

Para fijar la calidad de las simulaciones realizadas, sea para validar la simulación por diferencias finitas explícitas en 3D, así como para validar la simulación por diferencias explícitas con propiedades térmicas variables en 3D con datos experimentales, se utilizaron diferentes indicadores estadísticos, como: el módulo de porcentaje de desviación (%E) (Ec. 3.36), suma de cuadrados del error (SSE) (Ec. 3.37) y raíz media de la suma de cuadrados del error (RMSE) (Ec. 3.38), utilizando el programa Excel® (Microsoft, 2013).

$$\%E = \frac{100 \sum |X_e - X_p|}{m X_e} \quad (3.36)$$

$$SSE = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^n (X_p - X_e)^2 \quad (3.37)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{m} \sum_{i=1}^n (X_p - X_e)^2} \quad (3.38)$$

Donde:

X_e : Valor de temperatura experimental (°C)

X_p : Valor de temperatura predicha (°C)

m : Número de datos de temperatura

IV. RESULTADOS Y DISCUSIONES

4.1 CARACTERIZACIÓN DE LAS MATERIAS PRIMAS

4.1.1 Características físico químicas y composición proximal del loche y la papa

La Tabla 9, muestra las características físico químicas del loche y la papa, donde se puede observar que el contenido de sólidos solubles del loche es más elevado en comparación con la papa, éste resultado es similar al reportado por Andres y Ugás (2006), quienes señalan que el elevado contenido de sólidos solubles le proporciona un particular dulzor a este tipo de zapallo.

Las demás características como acidez titulable y pH, son muy similares entre las muestras, las cuales son típicas de las hortalizas.

Tabla 9: Características físico químicas del loche y la papa

Características	Loche	Papa
	(<i>Cucurbita moschata</i> Duch.)	(<i>Solanum tuberosum</i> L.)
	Contenido	Contenido
Sólidos solubles (°Brix)	16.5 ^a	7.5 ^b
Acidez titulable (% Ac cítrico)	0.451 ^c	0.328 ^c
pH	6.830 ^d	6.510 ^d

Las letras diferentes en el superíndice indican diferencias significativas entre las muestras ($p < 0.05$).

La Tabla 10, muestra los resultados de la composición proximal del loche y la papa. Para el caso del loche, los valores encontrados fueron similares a los reportados por Reyes-García *et al.* (2009) y Collazos *et al.* (1996). El análisis proximal del loche, también corrobora lo

reportado por INDECOPI (2010), quienes señalan que esta hortaliza se caracteriza por su elevado contenido de fibra.

Los valores encontrados con respecto a la composición proximal de la variedad de papa “Yungay”, fueron muy similares a los reportados por Obregón La Rosa *et al.* (1998).

Tabla 10: Composición proximal del loche y la papa por cada 100 g

Componente	Loche	Papa
	(<i>Cucurbita moschata</i> Duch.)	(<i>Solanum tuberosum</i> L.)
	Contenido (%)	Contenido (%)
Agua	75.72 ± 0.972	81.00 ± 1.02
Proteína	1.82 ± 0.011	1.34 ± 0.031
Grasa	0.14 ± 0.025	0.06 ± 0.016
Carbohidratos	19.29 ± 0.041	16.38 ± 0.032
Fibra cruda	1.72 ± 0.016	0.47 ± 0.014
Ceniza	0.32 ± 0.013	0.74 ± 0.015

4.2 DETERMINACIÓN DEL COEFICIENTE DE TRANSFERENCIA DE CALOR POR CONVECCIÓN (h)

La Tabla 11, muestra los valores de los coeficientes de transferencia de calor encontrados; como se puede observar, no existe diferencia significativa entre los diferentes tamaños de los cubos, pero si existe diferencia de los valores de (h) entre las temperaturas de calentamiento.

Esto se corrobora con lo expuesto por Singh y Heldman (2014); Hahn y Özişik (2012) y Sablani (2009), quienes señalan que esta propiedad depende básicamente de las condiciones del medio de calentamiento.

En las investigaciones realizadas por Awuah *et al.* (1993) y Alhamdan y Sastry (1990), se señala que la concentración del fluido y la temperatura de calentamiento, tienen gran impacto en el coeficiente de transferencia de calor por convección. Mencionando que el coeficiente

de transferencia de calor aumenta cuando se eleva la temperatura y disminuye con el incremento de la viscosidad en el medio de calentamiento.

Tabla 11: Coeficientes de transferencia de calor (h) de diferentes tamaños de cubos de aluminio, sometidos a diferentes temperaturas de calentamiento

Cubo de aluminio (cm)	Coeficiente de transferencia de calor ($W/m^2 \text{ } ^\circ C$)*		
	70°C	80°C	90°C
1x1x1	655.34 ± 30.35 ^a	745.55 ± 22.76 ^a	1083.65 ± 61.15 ^b
2x2x2	655.62 ± 19.47 ^a	712.92 ± 17.36 ^a	986.08 ± 41.90 ^b
3x3x3	691.49 ± 59.74 ^a	793.86 ± 22.18 ^a	972.33 ± 89.82 ^b

*Promedio aritmético de seis repeticiones, ± desviación estándar. Las letras minúsculas en superíndice indican diferencia significativa ($p < 0.05$).

Aunque esta afirmación es muy generalizada, recientemente ha traído cierta controversia, ya que en el trabajo realizado por Yıldız *et al.* (2007), encuentran que los valores de (h) disminuyen a medida que se incrementa la temperatura de fritura de papas. Estos autores realizan una amplia revisión de literatura, con respecto a este tema y mencionan que se puede incurrir en el error cuando se utiliza el análisis de concentrados y se emplean metales altamente conductivos para determinar el valor de (h). De la misma manera, Erdoğan (2005), señala que el uso de metales no refleja el proceso real al que es sometido el alimento.

Con respecto a los valores encontrados de (h), en esta investigación, se encontró que existe similitud con lo reportado por diferentes investigaciones.

Palazoglu (2006), utiliza el valor de $1000 W/m^2 \text{ } ^\circ C$ para simular la transferencia de calor de cubos de papa de $1.2 \times 1.2 \times 1.2$ cm sometidos a $100^\circ C$ por 100 segundos.

Alhamdan *et al.* (1990) encontraron valores de (h) entre $75 - 310 W / m^2 \text{ } ^\circ C$, cuando se calientan alimentos de formas irregulares en agua con CMC (Carboximetil celulosa) y cuando las muestras son calentadas en agua, encontraron valores de (h) entre $652 - 850 W/m^2 \text{ } ^\circ C$; ambos medios se calentaron por convección natural a las temperaturas de 20 a $80^\circ C$.

Chang y Toledo (1990) encontraron que el valor de (h) puede variar entre 600 – 1533 W/m²°C y 356 – 735 W/m²°C a velocidades de 0 y 1.58 cm/s, al someter cubos de zanahoria de 1x1x1 cm y 2x2x2 cm a temperaturas elevadas de 135°C en un lecho relleno.

Lamberg y Hallström (1986) simularon perfiles de temperatura y coeficientes de transferencia de calor durante el escaldado de cilindros de papas, de 6 cm de diámetro y 1.8 cm de espesor) a la temperatura de 75°C, encontrando una buena correlación entre los datos simulados y experimentales cuando el coeficiente de transferencia de calor es de 750 W/m² °C.

Scheerlinck *et al.* (2004) determinaron que el coeficiente de transferencia de calor para el calentamiento de fresas a 45°C, fue de 590 W/m² °C.

4.3 DETERMINACIÓN DE LA DIFUSIVIDAD TÉRMICA (α) DEL LOCHE Y LA PAPA A DIFERENTES TEMPERATURAS

La Tabla 12, muestra la relación de la difusividad térmica del loche y la papa con respecto a la temperatura. Como era de esperarse, la difusividad térmica aumenta con respecto al incremento de temperatura, encontrando que los valores mínimos y máximos de (α) para el loche fueron de $1.55 \times 10^{-7} - 1.61 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$ y para la papa los valores mínimos y máximos de (α) encontrados fueron de $1.35 \times 10^{-7} - 1.47 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$.

Tabla 12: Difusividad térmica (α) del loche y la papa a diferentes temperaturas de calentamiento

Temperatura (°C)	Difusividad térmica del loche x 10 ⁻⁷ (m ² /s)	Difusividad térmica de la papa x 10 ⁻⁷ (m ² /s)
40	1.55 ± 0.02	1.40 ± 0.07
50	1.57 ± 0.01	1.42 ± 0.02
60	1.58 ± 0.05	1.43 ± 0.03
70	1.60 ± 0.04	1.45 ± 0.03
80	1.60 ± 0.03	1.46 ± 0.02
90	1.61 ± 0.03	1.46 ± 0.01

Promedio aritmético de tres repeticiones ± desviación estándar.

En la Figura 13, se puede apreciar que la difusión del calor es más rápida en el loche que en la papa y ambas se ajustan a una función cuadrática con R^2 : 0.979 para el loche y R^2 : 0.983 para la papa. Las Ecuaciones 6.1 y 6.2 muestran respectivamente las funciones cuadráticas determinadas.

$$\alpha_{Loche} = 1.61 \times 10^{-12}(T^2) + 3.26 \times 10^{-10}(T) + 1.45 \times 10^{-7} \quad (6.1)$$

$$\alpha_{Papa} = 1.79 \times 10^{-12}(T^2) + 3.58 \times 10^{-10}(T) + 1.28 \times 10^{-7} \quad (6.2)$$

Los valores de difusividad térmica del loche, encontrados en esta investigación, son similares a los reportados en la literatura, en sus homólogos como zapallos y calabazas.

Ahromrit y Nema (2010), reportan un valor de difusividad térmica aparente de $1.62 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$ para zapallos, que contenían 72% de agua, sometidos a fritura a 180°C . Así mismo Gaffney *et al.* (1980) reporta un valor de difusividad térmica de $1.71 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$ para calabazas sometidas a la temperatura de calentamiento de 47°C .

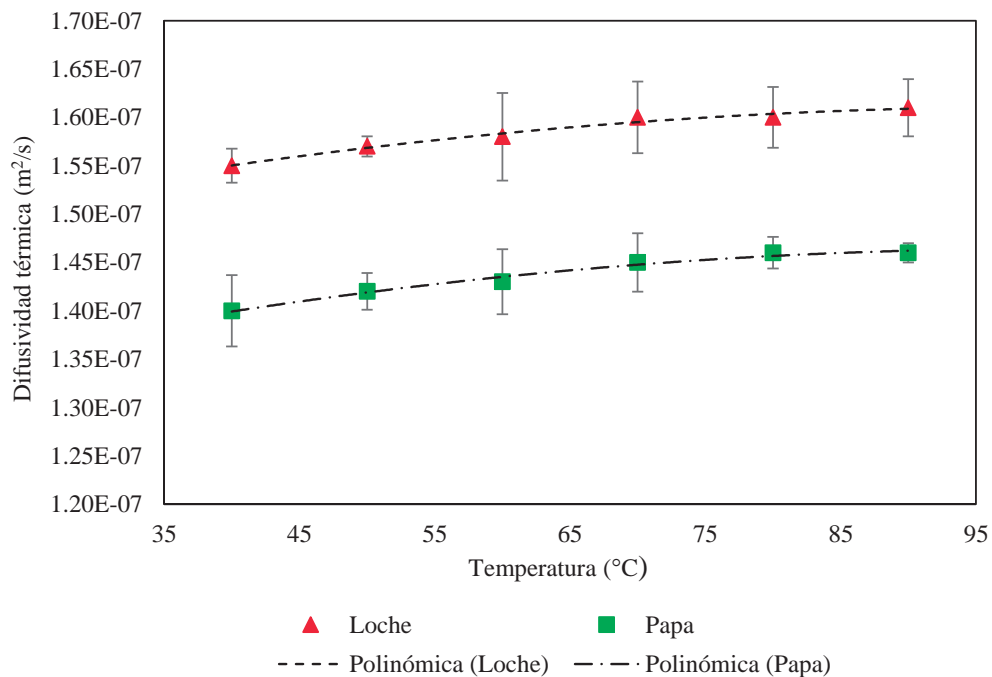


Figura 13: Difusividad térmica del loche y la papa a diferentes temperaturas.

De la misma manera para el caso de la papa, los valores de difusividad térmica encontrados en esta investigación, son similares a los reportados en otras investigaciones, como, el trabajo realizado por Rice *et al.* (1988), quienes estudiaron el efecto de la temperatura sobre las propiedades térmicas de la papa (76.3 % de humedad), sometida a calentamiento de 40 – 90°C, encontrando que la difusividad térmica aumenta con la temperatura hasta llegar a un valor máximo de $1.34 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$ a la temperatura de 70°C, y luego disminuye hasta $1.32 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$ a la temperatura de 90°C, lo cual podría ser debido a la gelatinización del almidón, el cual puede alterar la estructura de la papa como ha sido indicado por Rao *et al.* (1975). Los mismos autores indican que la difusividad térmica aumenta ligeramente con el incremento del contenido de humedad.

Así mismo Murakami (1997), estudió la variabilidad de las propiedades térmicas de las papas y las zanahorias sometidas a diferentes procesos, encontrando que (α) decrece después del proceso de esterilización, e incrementa durante la cocción. Reportando valores de (α) de $1.44 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$ para papas con 77.8% de humedad.

Otras investigaciones también reportan la baja difusividad térmica de la papa, como; Tung *et al.* (1989), quienes reportan un valor (α) de $1.39 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$ a la temperatura de 60°C y $1.46 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$ a la temperatura de 100°C. Andrieu *et al.* (1986), reportan un valor de (α) de $1.48 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$ a la temperatura de 20°C. Magee y Bransburg (1995), reportan valores de (α) de $1.30 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$ y $1.44 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$ utilizando el método logarítmico y el método de la pendiente, respectivamente, en papas con 82.4% de humedad.

Recientes publicaciones, también reportan, la baja difusividad térmica de la papa, como en el trabajo de Cariño-Sarabia y Vélez-Ruiz (2013) quienes utilizan el valor de $1.34 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$ cuando cubos de papa de 2x2x2 cm son calentados a las temperaturas de 70 y 85°C.

Yıldız *et al.* (2007) y Palazoglu (2006) utilizan el valor de (α) de $1.45 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$ para simular la transferencia de calor en cubos de papa.

4.4 DETERMINACIÓN LA CONDUCTIVIDAD TÉRMICA (k) DEL LOCHE Y LA PAPA A DIFERENTES TEMPERATURAS

Utilizando la composición proximal en la ecuación propuesta por Choi y Okos (1986), se determinó que los valores de conductividad térmica para el loche fueron: 0.59 W/m °C para las temperaturas de 70, 80 y 90°C. Para el caso de la papa, los valores de conductividad térmica calculados fueron: 0.60 W/m °C para las temperaturas de 70 y 80°C, y 0.61 W/m °C para la temperatura de 90°C.

Los valores encontrados en este trabajo, resultan ligeramente similares con los reportados en otras investigaciones.

Rao *et al.* (1975) reportaron valores de conductividad térmica de cinco variedades de papas, de 81.2 – 83.6% de humedad, los cuales oscilaron entre 0.533 a 0.571 W/m °C. Rice *et al.* (1988), reportan que la conductividad térmica permanece con un valor constante de 0.56 W/m °C, cuando se calientan papas, de 76.3% de humedad, a las temperaturas de 80 y 90°C. Murakami (1997) menciona que escaldar papas durante 10 minutos tuvo efectos insignificantes sobre la conductividad térmica, permaneciendo constante en un valor de 0.577 W/m °C. Califano y Calvelo (1991), reportaron valores de conductividad térmica en papas entre 0.545 – 0.957 entre las temperaturas de 50 y 100°C.

La investigación realizada por Wang y Brennan (1992), demuestran que la conductividad térmica no es afectada a temperaturas superiores de 70°C. Gratzek y Toledo (1993), manifiestan que ésta propiedad puede aumentar a temperaturas de 130°C. Murakami (1997) determinó que la conductividad térmica disminuye significativamente durante el horneado de las papas, debido a la gelatinización de los almidones.

Murakami (1997), señala que tanto las zanahorias como las papas son predominantemente en el contenido de agua y su materia seca se compone principalmente de carbohidratos; por lo tanto se debería esperar que la conductividad térmica de un alimento aumente a medida que gane agua, ya que la conductividad del agua es mayor que la de los carbohiratos (0.602 vs 0.25 W/m °C) (Choi, 1985). Pero en el caso del escaldado de la papa, la ganancia de agua es insignificante y la gelatinización del almidón contrarresta el incremento, así mismo Choi (1985) estimó que la gelatinización del almidón disminuye el valor de conductividad térmica de soluciones, de carbohidratos, en un 13%. Valores muy similares de conductividad térmica en la papa, fueron reportados por Gratzek y Toledo (1993).

Con la evidencia de investigaciones anteriores, que sostienen la estabilidad de la conductividad térmica durante el calentamiento, ésta propiedad se consideró como constante en las simulaciones realizadas de transferencia de calor, ya que sólo se necesita, para simular la transferencia de calor en los nodos externos, los cuales fácilmente llegan a la temperatura del medio de calentamiento.

4.5 SIMULACIÓN DEL ESCALDADO DEL LOCHE Y LA PAPA

Se desarrollaron las aplicaciones computacionales en el lenguaje Visual Basic[®]-2013. En primer lugar se creó el programa para simular la transferencia de calor utilizando la solución analítica en 3D, para luego crear el programa de diferencias explícitas en 3D y se determinó el número de nodos y espacios de tiempo apropiados para que la simulación sea estable y convergente con la simulación analítica.

Una vez, validado el método de diferencias finitas se procedió a incluir la variación de la difusividad térmica en toda la red nodal generada.

4.5.1 Método de separación de variable (solución analítica)

La interfaz del programa para simular la transferencia de calor mediante la solución analítica se muestra en la Figura 14; donde el panel de entrada de datos, permite el ingreso de diferentes valores como: dimensiones del alimento, temperatura inicial del alimento, temperatura del medio de calentamiento, difusividad térmica efectiva, conductividad térmica, coeficiente de transferencia de calor y tiempo total del tratamiento.

La utilización de seis términos de la ecuación, genera una mejor predicción de los valores de temperatura a bajos tiempos de calentamiento.

El diagrama de flujo de la simulación analítica de la ecuación de difusión del calor en 3D se presenta en ANEXO II y los detalles de los códigos de programación se muestran en el ANEXO III.

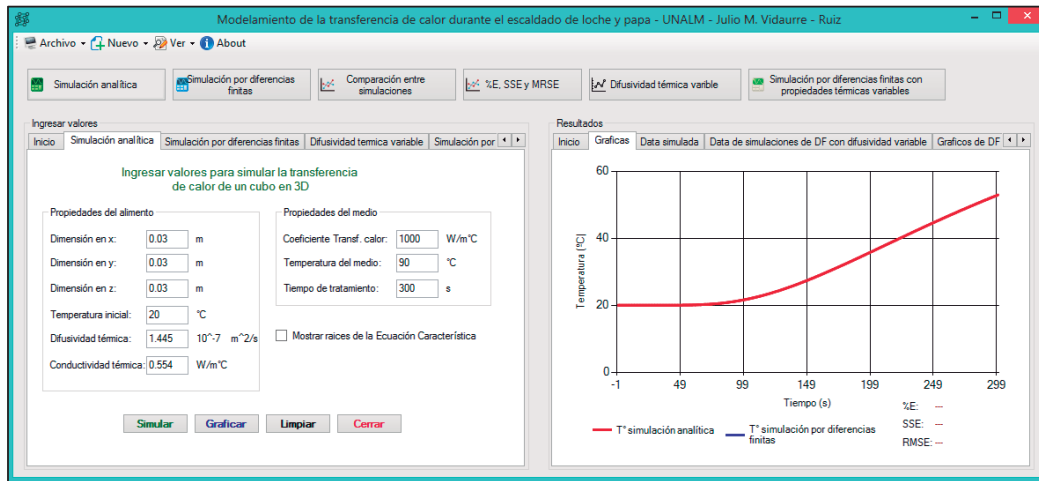


Figura 14: Interfaz de la aplicación computacional para simular la transferencia de calor mediante la solución analítica.

4.5.2 Método de diferencias finitas explícitas en 3D

La interfaz del programa para simular la transferencia de calor mediante el método de diferencias finitas explícitas se muestra en la Figura 15; donde el panel de entrada de datos, al igual que el programa anterior, permite el ingreso de diferentes valores de las propiedades del alimento; pero además cuenta con panel de ingreso de nodos en los diferentes ejes de coordenadas rectangulares (x,y,z) y la variación del tiempo (s) .

Con respecto a la variación del tiempo, la aplicación se programó para recibir valores menores o iguales a un segundo, con el fin de ser más exactos en la simulación de temperaturas. Pero al momento de realizar la impresión de las temperaturas simuladas, el programa, solamente imprime o reporta los resultados por cada segundo de tiempo.

La aplicación computacional por diferencias finitas explícitas en 3D, soporta hasta 20 nodos en cada eje y la cantidad de datos de tiempo que puede almacenar el programa es de 10000, esto es debido a la capacidad de memoria que tuvo el computador en donde se codificó la aplicación.

Adicionalmente al momento de imprimir los resultados, se muestra una ventana secundaria (Figura 16), la cual contiene los criterios de estabilidad para los nodos internos (F1, F2 y F3), nodos cara (F4), nodos vértice (F5) y nodos arista (F6), así como también muestra la

variación de tiempo máxima a la cual la simulación numérica puede ser convergente con la simulación analítica.

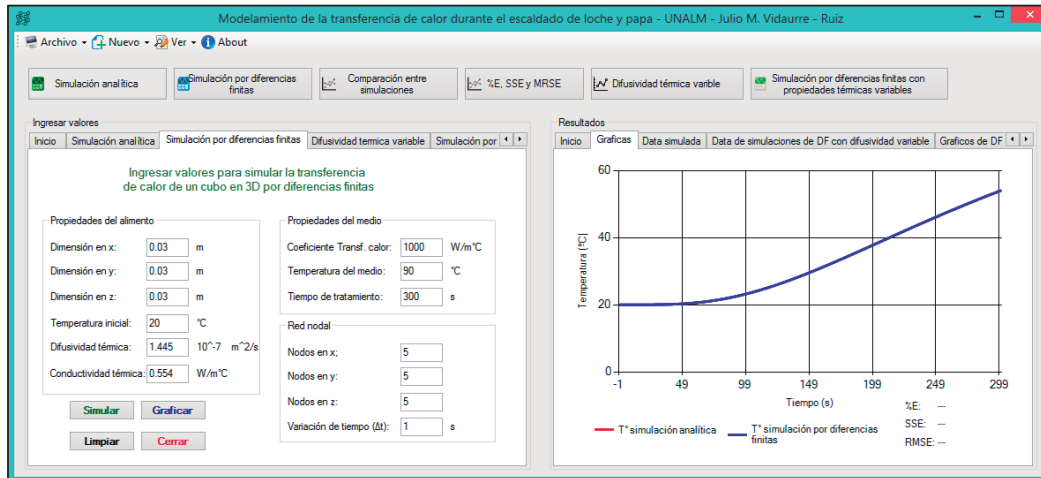


Figura 15: Interfaz de la aplicación computacional para simular la transferencia de calor mediante diferencias finitas explícitas

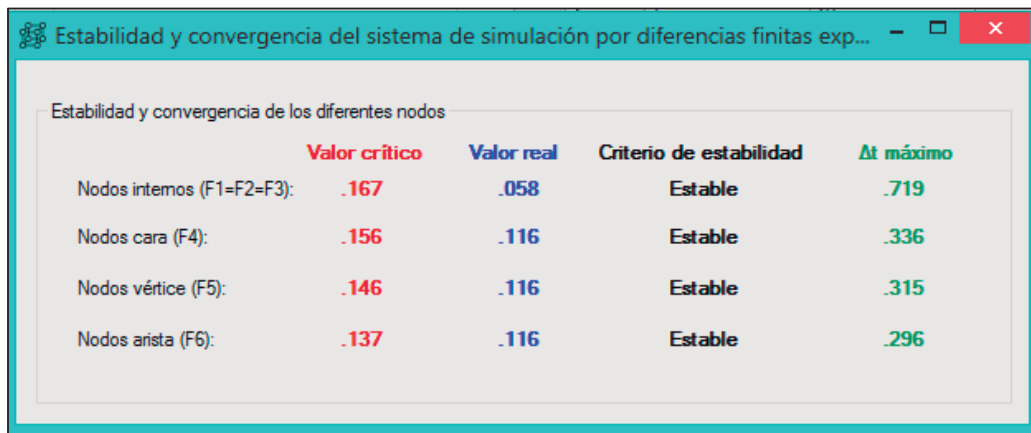


Figura 16: Ventana de reporte de criterios de estabilidad y convergencia de la simulación por diferencias finitas explícitas en 3D

El diagrama de flujo de la simulación por diferencias finitas explícitas en 3D se muestra en la ANEXO IV y los detalles de los códigos de programación se muestran en el ANEXO V.

4.5.3 Validación del método diferencias finitas explícitas en 3D

Palazoğlu y Erdoğan (2009) mencionan que los modelos numéricos tienen la capacidad de resolver problemas complejos, pero tienen que ser validados contra observaciones experimentales o soluciones analíticas. La validación experimental de procedimientos numéricos no sólo consume tiempo sino que también puede ser costosa. Por otro lado, las soluciones analíticas, proporcionan un medio más conveniente y rentable para evaluar la precisión de los modelos numéricos.

Es por esto, que para validar el método de diferencias finitas explícitas en 3D, propuesto en este trabajo, se comparó con la simulación analítica en 3D.

En primer lugar se determinó la variación de tiempo (s) máxima que se debe utilizar para que las simulaciones sean estables bajo diferentes tamaños de red nodal; los resultados se muestran en la Tabla 13.

Tabla 13: Variaciones de tiempo en segundo máximas que se deben utilizar en diferentes redes nodales para que la simulación por diferencias finitas sea estable.

Forma (cm)	Red nodal (x,y,z)			
	5x5x5 nodos	10x10x10 nodos	15x15x15 nodos	20x20x20 nodos
1x1x1	0.5	0.125	0.0625	0.0250
2x2x2	1	0.25	0.125	0.125
3x3x3	1	0.5	0.25	0.25

Con respecto a la convergencia de la simulación por diferencias finitas, con la simulación analítica, esta se logra para los cubos de 3x3x3 cm cuando se genera una red nodal de 20 nodos en el eje X, con 20 nodos en el eje Y, y con 20 nodos en el eje Z; obteniendo valores menores de %E, SSE y RMSE cuando se comparan las simulaciones. Los resultados se muestran en las Figuras 17, 18, 19 y 20.

De la misma manera se realizó para las formas de 2x2x2 cm y se determinó que la red nodal de 20x20x20 nodos, se encuentran los menores valores de estadísticos de ajuste y para la forma de 1x1x1 cm, sólo se necesita una red de 10x10x10 nodos.

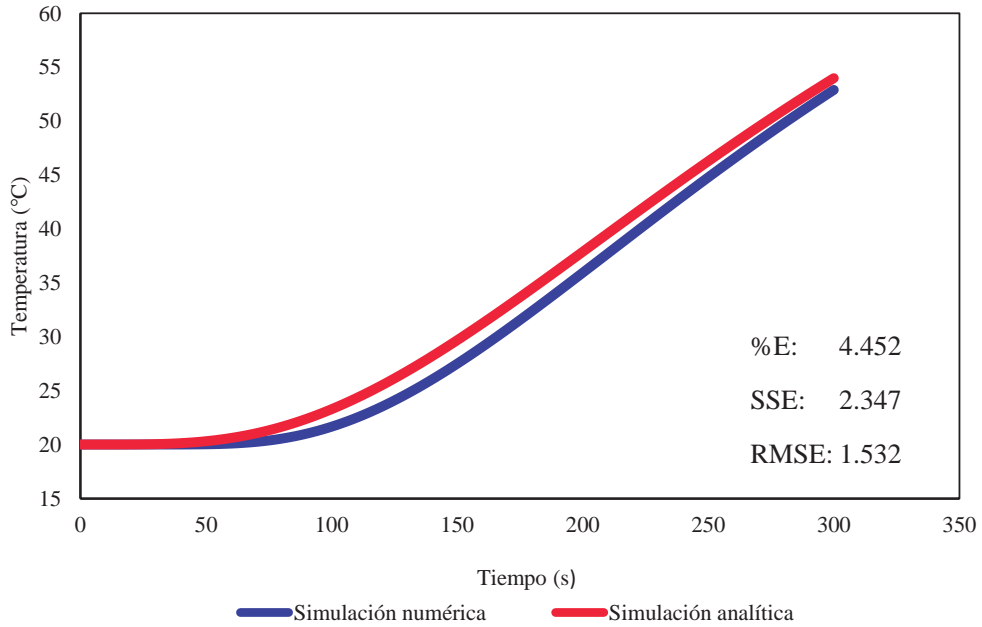


Figura 17: Comparación entre la simulación analítica v/s la simulación numérica con una red 5x5x5 nodos para cada eje

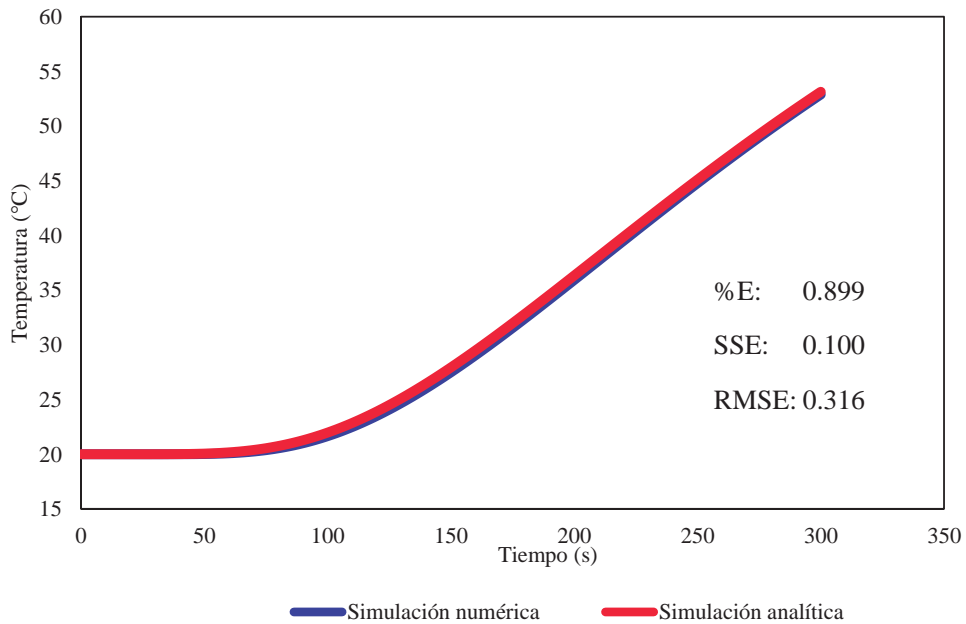


Figura 18: Comparación entre la simulación analítica v/s la simulación numérica con una red 10x10x10 nodos para cada eje

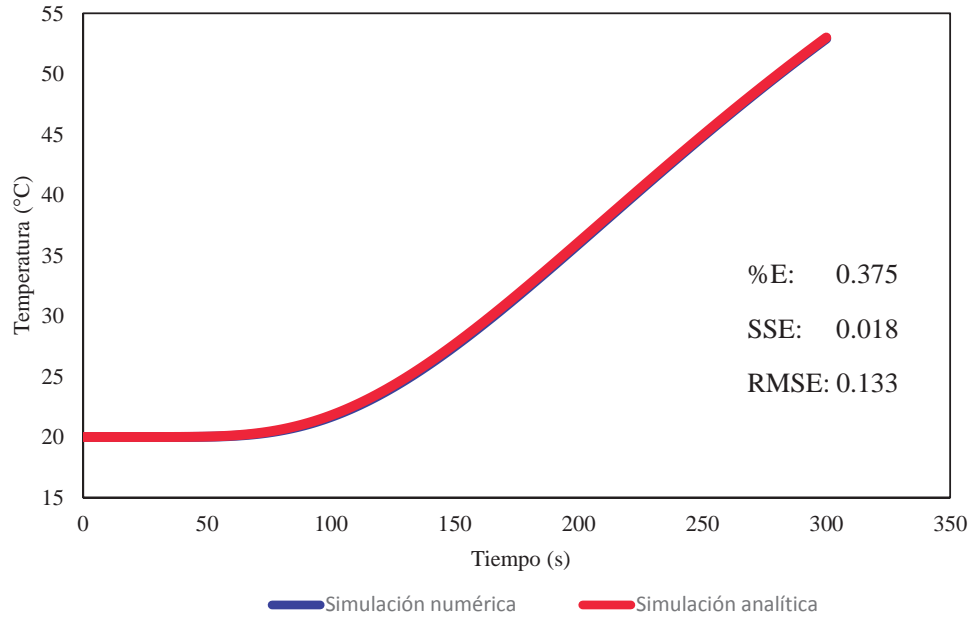


Figura 19: Comparación entre la simulación analítica v/s la simulación numérica con una red 15x15x15 nodos para cada eje

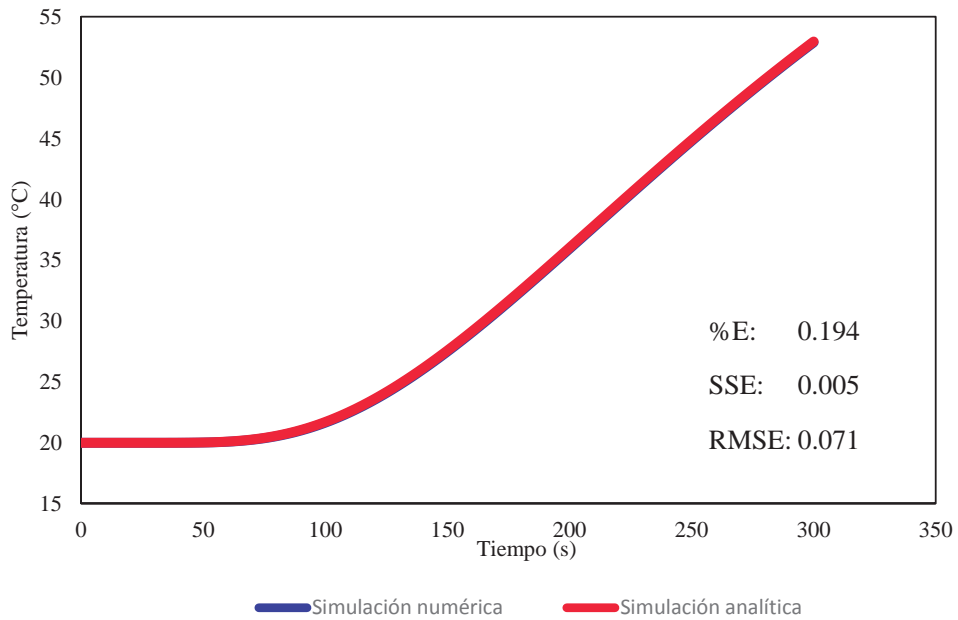


Figura 20: Comparación entre la simulación analítica v/s la simulación numérica con una red 20x20x20 nodos para cada eje

Esto se debe a que en los cubos más pequeños el diferencial generado de espacio es suficientemente pequeño, cuando se dividen entre 10 nodos cada eje, mientras que para las formas más grande se necesitan mayor cantidad de nodos con el fin de mantener lo más pequeño posible el diferencial de espacio.

Estos resultados son congruentes con lo reportado por diferente literatura, debido a que la solución por diferencias finitas parte de la definición de la derivada, mientras más pequeño sea la variación espacial (Δx , Δy , Δz) más exacta es la respuesta.

Diversas investigaciones también hacen hincapié en el uso de las soluciones analíticas como validadoras de las soluciones numéricas, como por ejemplo; Cai *et al.* (2006) mencionan que el uso típico de las soluciones analíticas es validar soluciones numéricas, cuando las propiedades térmicas y físicas (conductividad térmica, calor específico y densidad) y las condiciones de contorno, permanecen constantes con la distribución de la temperatura.

También, en los trabajos realizados por Palazoğlu (2006) y Palazoğlu y Sandeep (2002), se realiza la validación de soluciones numéricas por diferencias finitas explícitas de la transferencia de calor, en alimentos de formas cúbicas y esféricas, respectivamente. Ésta validación sólo se realiza comparando los resultados obtenidos de temperatura en un determinado tiempo; descuidando el grado de ajuste de los datos durante todo el tiempo del tratamiento, pudiendo provocar errores. Ambos trabajos utilizan una red nodal de 10x10x10 nodos en cada eje para la forma cúbica y 10 nodos para la forma esférica.

4.5.4 Inclusión de la difusividad térmica y conductividad térmica variables con la temperatura en la simulación por diferencias finitas

Una vez validada la solución por diferencias finitas explícitas en 3D, se incorporó la variación de la difusividad térmica con respecto a la temperatura. Para tal efecto se programó el método de mínimos cuadrados, para determinar las constantes de ajuste cuadrático.

El programa desarrollado tiene la opción de recibir 6 valores de difusividad a diferente temperatura para poder correlacionarlos con la temperatura y encontrar una función de segundo grado.

Una vez obtenido el polinomio se puede incorporar a la simulación por diferencias finitas explícitas en 3D, cuya interfaz es similar a la Figura 15.

El diagrama de flujo general del programa, se presenta en ANEXO VI y los códigos de programación se presentan en el ANEXO VII.

4.6 VALIDACIÓN DE LA SIMULACIÓN POR DIFERENCIAS FINITAS EN 3D CON PROPIEDADES TÉRMICAS VARIABLES CON LOS DATOS EXPERIMENTALES DEL ESCALDADO DEL LOCHE Y LA PAPA

Para validar el método propuesto en esta investigación se compararon las simulaciones realizadas con la aplicación computacional para simular la transferencia de calor por diferencias finitas con propiedades térmicas variables con los datos experimentales de las hortalizas en estudio.

4.6.1 Escaldado del loche

Durante el escaldado del loche, se pudo experimentar algunas dificultades para tratar de mantener la termocupla suspendida en el centro de los cubos 1x1x1 cm, debido a al reducido tamaño de la forma y a la perforación que se debía hacer para ingresar la termocupla, todos estos factores en contra, resultaron en imprecisiones en el registro de la temperatura en el punto central del cubo, como se puede apreciar en la Figura 21.

Para el caso de cubos de 1x1x1 cm, se realizaron las simulaciones con 10 nodos en cada eje y con un diferencial de tiempo de 0.125 segundos.

Los valores numéricos de las temperaturas reales y simuladas para los cubos de loche de 1x1x1 cm, se muestran en el ANEXO VIII.

Los valores de los parámetros estadísticos de ajuste de los datos, resultaron elevados para los cubos de loche de 1x1x1 cm, como se muestran en la Tabla 14.

Para el caso de los cubos de loche de 2x2x2 y 3x3x3 cm resultó más sencillo mantener el termopar en la posición central, esto se puede ver reflejado en el grado de ajuste de las simulaciones, como se muestra en las Figuras 22 y 23. Para ambos casos las simulaciones se realizaron con una red de 20 nodos para cada eje y con un diferencial de tiempo de 0.125 segundos y 0.25 segundos respectivamente.

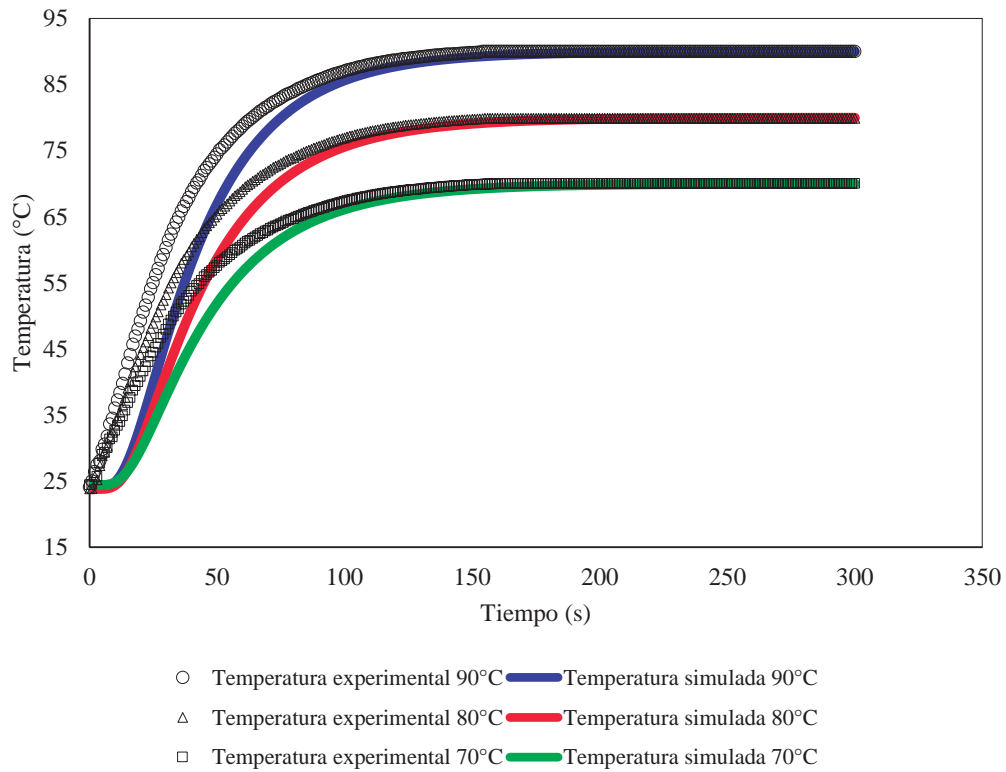


Figura 21: Comparación entre las simulaciones del escaldado de cubos de loche de 1x1x1 cm con los datos experimentales.

Tabla 14: Parámetros estadísticos de ajuste de los datos experimentales con los datos simulados para cubos de loche de 1x1x1 cm

Parámetros	Temperatura (°C)		
	70	80	90
%E	4.159	4.441	4.63
SSE	13.65	19.231	26.206
RMSE	3.695	4.385	5.119

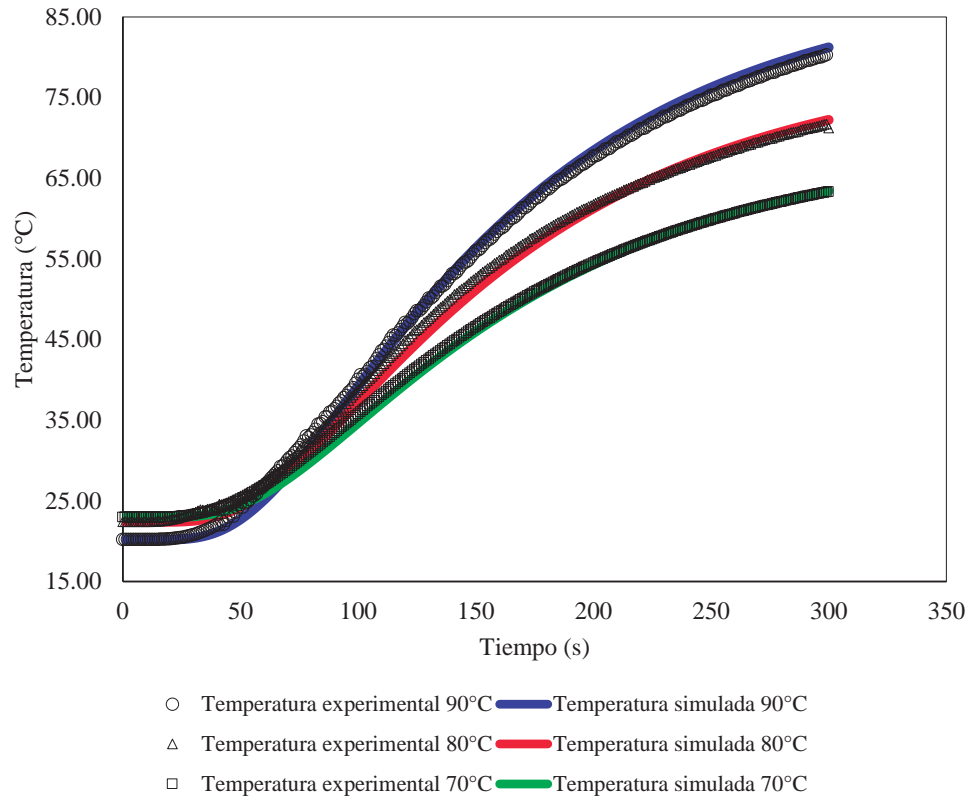


Figura 22: Comparación entre las simulaciones del escaldado de cubos de loche de 2x2x2 cm con los datos experimentales

Tabla 15: Parámetros estadísticos de ajuste de los datos experimentales con los datos simulados para cubos de loche de 2x2x2 cm

Parámetros	Temperatura (°C)		
	70	80	90
%E	1.276	2.066	1.842
SSE	0.372	1.001	0.864
RMSE	0.610	1.000	0.930

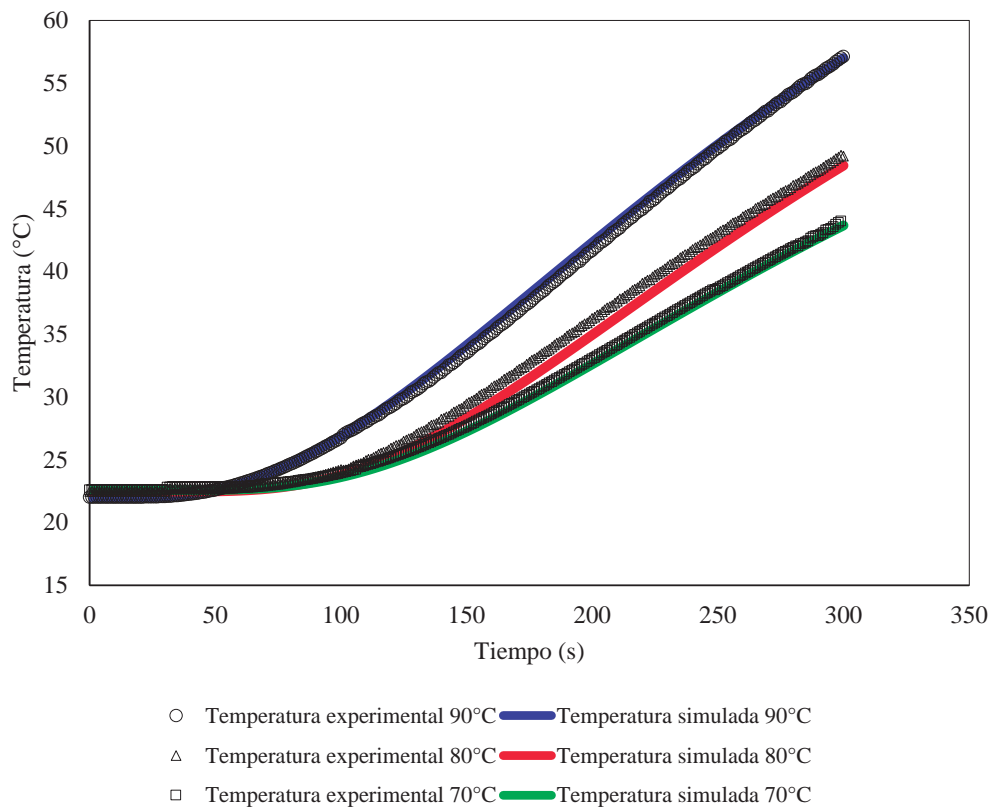


Figura 23: Comparación entre las simulaciones del escaldado de cubos de loche de 3x3x3 cm con los datos experimentales

Tabla 16: Parámetros estadísticos de ajuste de los datos experimentales con los datos simulados para cubos de loche de 3x3x3 cm

Parámetros	Temperatura (°C)		
	70	80	90
%E	1.022	2.170	0.718
SSE	0.108	0.749	0.137
RMSE	0.329	0.865	0.370

Para los cubos de loche de 2x2x2 cm, los valores más elevados de los parámetros estadísticos de ajuste, se muestran en la temperatura de 80°C; de la misma forma sucedió con los cubos de loche 3x3x3 cm, esto se puede apreciar en las Tablas 15 y 16.

Los valores numéricos de las temperaturas reales y simuladas para los cubos de loche de 2x2x2 cm y 3x3x3 cm, se muestran en el ANEXO IX y X respectivamente.

4.6.2 Escaldado de la papa

Durante el escaldado de papa, también se presentaron las dificultades anteriormente mencionadas para los cubos de 1x1x1 cm, pero adicionalmente se tuvo en contra la gelatinización del almidón, el cual hacía que el sensor sea expulsado y por lo tanto tener mayor imprecisión en tomar el registro de temperatura en el punto central.

Para el caso de cubos de 1x1x1 cm, se realizó la simulación con 10 nodos en cada eje y con un diferencial de tiempo de 0.125 segundos.

Los perfiles de temperatura experimentales con las simulaciones realizadas mediante el la solución por diferencias finitas en 3D con propiedades térmicas variables, para los cubos de papa de 1x1x1 cm, se muestran en la Figura 24. Así como los valores encontrados de los parámetros estadísticos (Tabla 17).

Los valores numéricos de las temperaturas reales y simuladas para los cubos de papa de 1x1x1 cm, se muestran en el ANEXO XI.

Tanto como el %E, SSE y RMSE, resultaron elevados en todas las temperaturas experimentadas en la forma de 1x1x1 cm, esto hace suponer que el registro de temperatura obtenido experimentalmente no fue en punto central.

Para el caso de los cubos de papa de 2x2x2 cm y 3x3x3 cm, las simulaciones realizadas fueron más precisas en comparación con los resultados experimentales (Fig. 25 y 26).

Las simulaciones de los cubos de papa de 2x2x2 cm y 3x3x3 cm se realizaron con 20 nodos en cada eje y con un diferencial de tiempo de 0.125 segundos y 0.25 segundos respectivamente.

Los valores numéricos de las temperaturas reales y simuladas para los cubos de papa de 2x2x2 cm y 3x3x3 cm, se muestran en el ANEXO XII y XIII respectivamente.

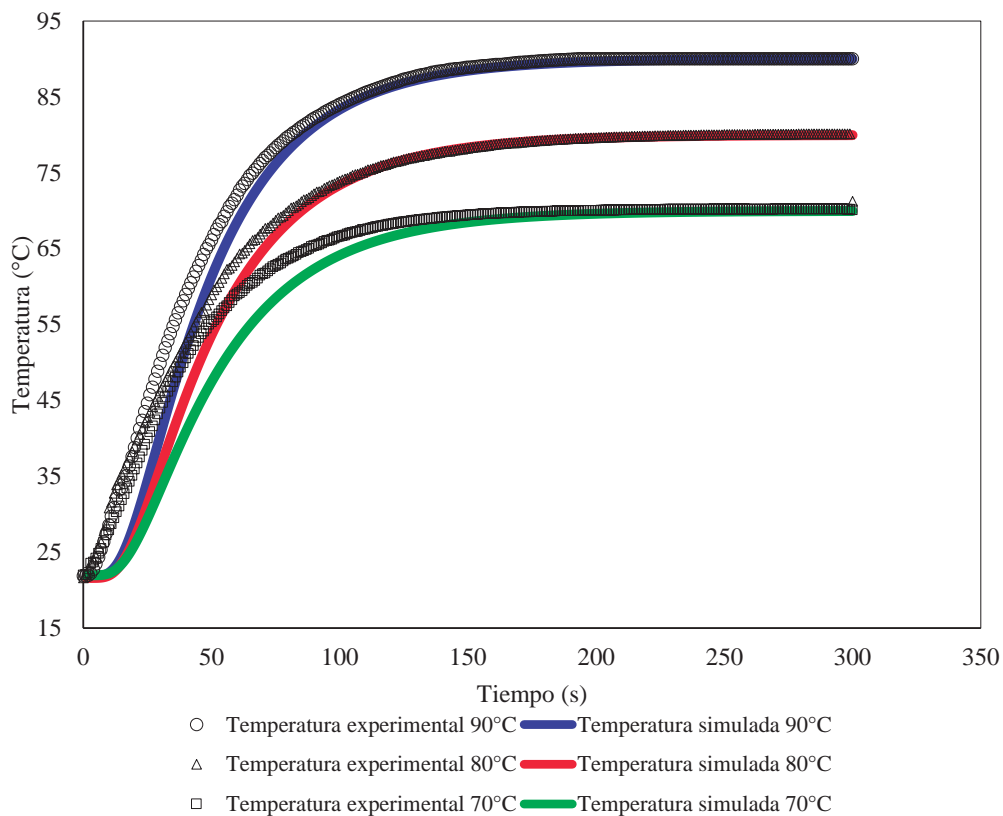


Figura 24: Comparación entre las simulaciones del escaldado de cubos de papa de 1x1x1 cm con los datos experimentales

Tabla 17: Parámetros estadísticos de ajuste de los datos experimentales con los datos simulados para cubos de papa de 1x1x1 cm

Parámetros	Temperatura (°C)		
	70	80	90
%E	5.211	4.031	3.440
SSE	16.665	14.253	10.857
RMSE	4.082	3.775	3.295

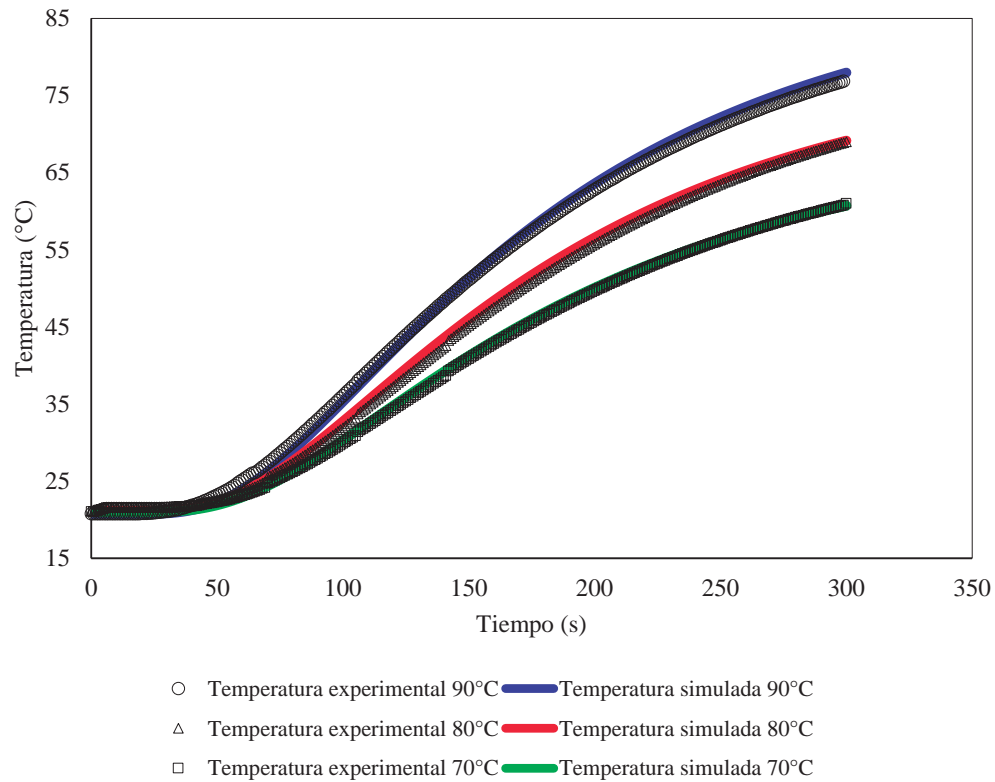


Figura 25: Comparación entre las simulaciones del escaldado de cubos de papa de 2x2x2 cm con los datos experimentales

Tabla 18: Parámetros estadísticos de ajuste de los datos experimentales con los datos simulados para cubos de papa de 2x2x2 cm

Parámetros	Temperatura (°C)		
	70	80	90
%E	0.995	1.489	1.530
SSE	0.141	0.450	0.601
RMSE	0.375	0.671	0.775

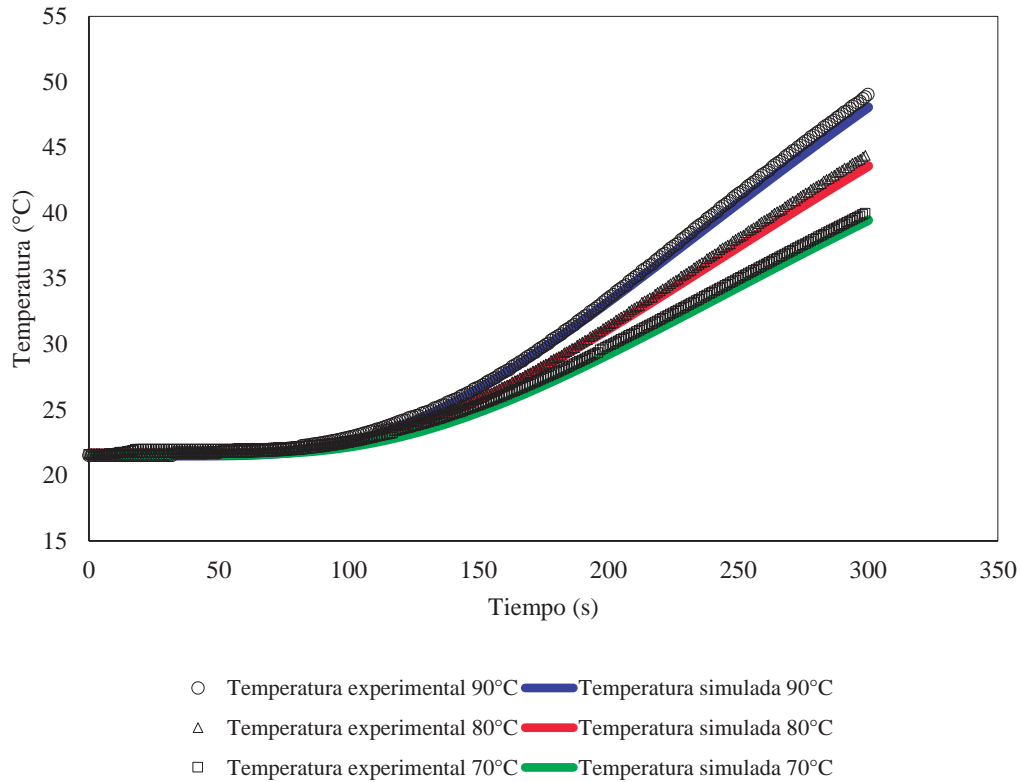


Figura 26: Comparación entre las simulaciones del escaldado de cubos de papa de 3x3x3 cm con los datos experimentales

Tabla 19: Parámetros estadísticos de ajuste de los datos experimentales con los datos simulados para cubos de papa de 3x3x3 cm

Parámetros	Temperatura (°C)		
	70	80	90
%E	1.706	0.888	1.092
SSE	0.241	0.169	0.191
RMSE	0.491	0.411	0.437

Para los cubos de papa de 2x2x2 cm, los valores más elevados de los parámetros estadísticos de ajuste, se muestran en la temperatura de 70°C; y para los cubos de 3x3x3 cm fue en la temperatura de 90°C, esto se puede apreciar en las Tablas 18 y 19.

Con respecto a los problemas obtenidos en las formas de cubos de loche y de papa de 1x1x1 cm, similares dificultades fueron reportadas por Loss *et al.* (2011), quienes realizaron la simulación por diferencias finitas de la transferencia de calor durante el secado de papaya, encontrando problemas al tratar de lograr exactitudes durante la toma de datos.

Erdoğdu (2008), menciona que en los estudios de validación de transferencia de calor, con datos experimentales, el conocimiento del lugar del termopar, es extremadamente importante para poder correlacionar los resultados de la simulación con los datos experimentales.

Anderson y Singh (2002) señalan que este es un problema cuando las muestras son demasiado pequeñas e incluso se puede recurrir a técnicas de rayos X para asegurarse de la posición real del termopar.

Otra forma reportada en la literatura para conocer la posición final de termopar en el alimento, es cortar en rodajas finas el alimento hasta dar con la posición final de la punta (Erdogdu *et al.*, 1998).

Según Erdoğdu (2008), todas estas formas pueden resultar en pérdida de tiempo, ya que se podría determinar la posición del termopar utilizando el intercepto del logaritmo del ratio de temperaturas con el tiempo y mediante el uso del método Newton–Raphson se podría determinar las variables implicadas en el intersección de la solución analítica.

El método propuesto en esta investigación también podría ayudar a ese propósito, ya que como se tiene una red nodal con diferentes historiales de temperaturas, se podría incluir una función para buscar el nodo que mejor superponga los datos. Este concepto ha sido utilizado bajo el nombre de optimización, como lo menciona Abakarov y Nuñez (2011), quienes desarrollan una aplicación denominada OPT-PROx, donde se puede determinar la difusividad térmica del alimento enlatado, cuando se obtiene el menor valor de MSE (Media de Cuadrados del Error) entre la simulación y el historial de calentamiento del alimento.

Diversas investigaciones reportan diferentes valores de los parámetros estadísticos en estudios de transferencia de calor, siendo el más utilizado el RMSE, como por ejemplo; en la investigación realizada por Hamdami *et al.* (2004) se desarrolla la simulación por diferencias finitas dos cilindros con dos láminas infinitas para simular la transferencia de

calor y masa durante el congelamiento de panes pre-cocidos, reportando el valor de RMSE entre los resultados experimentales y las predicciones del modelo de $0.505\text{ }^{\circ}\text{C}$ para la temperatura superficial, y $1.8\text{ }^{\circ}\text{C}$ para la temperatura central.

Ahromrit y Nema (2011), simulan la transferencia de calor y masa de cilindros de zapallos, camotes y taro, sometidos a fritura, utilizando la solución analítica, encontrando el valor de RMSE de 5%, considerando un buen ajuste con los valores reales.

Fabbri *et al.* (2011), desarrollaron un modelo en 3D por elemento finitos para describir la transferencia de calor y masa en el interior de un grano de café durante el proceso de tostado; encontrando que los valores de temperaturas simulados en el centro del grano, son similares a los experimentales, ya que el valor de RMSE fue de $5.97\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Cepeda *et al.* (2013), crearon un modelo en 3D mediante elementos finitos para simular el enfriamiento de productos cárnicos de forma irregular listos para consumir; encontrando que las temperaturas pronosticadas por el modelo estaban de acuerdo con los valores observados, determinando valores de RMSE de $1.19 \pm 0.54\text{ }^{\circ}\text{C}$ para las simulaciones de temperaturas en el punto central y $1.73 \pm 0.48\text{ }^{\circ}\text{C}$ para las simulaciones de temperaturas a 0.05 m desde el núcleo hasta la superficie, y $2.01 \pm 1.01\text{ }^{\circ}\text{C}$ para las simulaciones de temperaturas en la superficie.

4.6.3 Verificación de método durante el escaldado del loche y la papa en la coordenada (10,1,1)

Para verificar el ajuste del modelo propuesto, se consideró el registro de temperatura a la distancia de 0.75 cm del punto central en los cubos de loche y de papa de 3x3x3 cm. Para la simulación se utilizó una red de 20 nodos en cada eje, por lo tanto la coordenada específica para comparar con los datos experimentales fue la (10, 1, 1).

En la Figura 27, se puede apreciar que las simulaciones de temperatura en la coordenada (10, 1, 1) ajustan apropiadamente los valores experimentales. La Tabla 20, muestra los diferentes parámetros estadísticos que ajuste.

Los valores numéricos de las temperaturas reales y simuladas para los cubos de loche y de papa de 3x3x3 cm, se muestran en el ANEXO XIV.

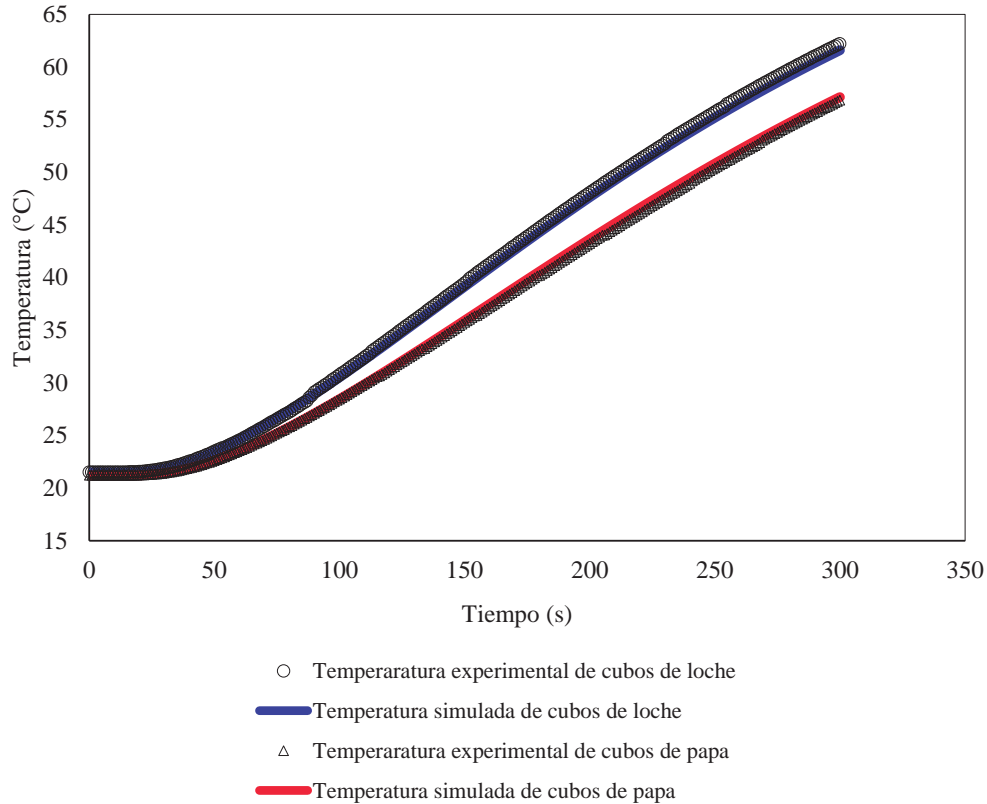


Figura 27: Comparación entre las simulaciones del escaldado de cubos de loche y de papa de 3x3x3 cm en la coordenada (10, 1, 1) con los datos experimentales

Similares valores fueron reportados por Uyar y Erdoğan (2012) quienes validan la simulación en 3D de transferencia de calor durante el calentamiento y enfriamiento de alimentos de forma esférica, como peras, fresas y papas, encontrando valores de RMSE de 0.26, 0.38 y 0.49 °C, respectivamente.

La inclusión de la variación de las propiedades térmicas de los alimentos, con respecto a la temperatura, se ha estudiado abundantemente en la simulación del proceso de congelación, donde se evidencia un cambio de estado del agua y por ende una variación drástica en las propiedades térmicas y físicas en los alimentos (Perussello *et al.*, 2011; Wang *et al.*, 2002; Pham, 1996; Mannapperuma y Singh, 1988; Wilson y Singh, 1987; Ramaswamy y Tung, 1984; Hung y Thompson, 1983; Cleland y Earle, 1979).

Tabla 20: Parámetros estadísticos de ajuste de los datos experimentales con los datos simulados para cubos de loche y papa de 3x3x3 en la coordenada (10, 1, 1)

Parámetros	Alimento	
	Loche	Papa
%E	0.662	0.462
SSE	0.133	0.078
RMSE	0.365	0.280

Scheerlinck *et al.* (2004), validan la simulación por elementos finitos de transferencia de calor durante el calentamiento y enfriamiento de fresas a las temperaturas de 45 y 25 °C, utilizando propiedades térmicas variables durante el proceso de transferencia de calor, aunque estas propiedades fueron obtenidas en su totalidad mediante el uso de ecuaciones empíricas, utilizando la composición, los valores de RMSE encontrados fueron entre 0.19 y 0.45°C.

Lemus-Mondaca *et al.* (2013), también simulan la transferencia de calor y masa durante el secado de cubos de papaya en 3D en una gama de temperaturas entre 40 y 80 °C, incluyendo la variación de las propiedades térmicas según el incremento de la temperatura, mediante el método numérico de elementos finitos; encontrando que los valores simulados, ajustan correctamente a los valores experimentales con un 6% de desviación.

V. CONCLUSIONES

1. Se modeló la transferencia de calor durante el escaldo de cubos de loche y de papa desarrollando la ecuación de difusión del calor, mediante el método analítico y el método de diferencias finitas explícitas en 3D.
2. Los coeficientes de transferencia de calor generados durante el escaldado de cubos de 1x1x1, 2x2x2 y 3x3x3 cm, fueron en promedio 650 W/ m² °C para la temperatura de 60°C, 750 W/ m² °C para la temperatura de 80°C y 1000 W/ m² °C para la temperatura de 90°C.
3. Los valores de difusividad térmica (α) del loche y la papa, se incrementaron ligeramente con la temperatura, siguiendo una función cuadrática. Encontrando que el loche difunde más rápido el calor que la papa. Los valores mínimos y máximos de (α) para el loche fueron de: 1.55 – 1.61 x 10⁻⁷ m²/s y para la papa fueron de: 1.40 – 1.46 x 10⁻⁷ m²/s. Asimismo se determinó la conductividad térmica (k) no varía significativamente durante el escaldo. El valor de (k) para el loche fue de: 0.59 W/m °C y para la papa fue de: 0.60 W/m °C.
4. Se desarrollaron aplicaciones computacionales utilizando el lenguaje Visual Basic®-2013 para simular la transferencia de calor por el método diferencias finitas en 3D, la cual fue validada con la simulación analítica, determinando que la simulación numérica es estable y convergente cuando se divide en 10 nodos, por cada eje, a los cubos de 1x1x1 cm, con una variación de tiempo de 0.125 segundos y 20 nodos, por cada eje, a los cubos de 2x2x2 cm y 3x3x3 cm, con una variación de tiempo de 0.25 segundos.
5. Al método de diferencias finitas explícitas en 3D se le adicionó la variación de las propiedades térmicas según la temperatura y se compararon los valores simulados con los valores experimentales del escaldado de loche y la papa, encontrando que la simulación converge de manera eficiente con los datos experimentales en las cubos de 2x2x2 cm y 3x3x3 cm; pudiéndose aplicar al escaldado de otros alimentos de forma cúbica; evitando de esta manera pérdidas en el tiempo y dinero que demandan las pruebas experimentales.

VI. RECOMENDACIONES

1. Utilizar termistores positivos tipo perla, para formas pequeñas de alimentos, para que de esta manera estar seguros de registrar las temperaturas en el punto central del alimento.
2. Optimizar los programas desarrollados y validarlos en otros procesos de transferencia de calor, donde sea notable la variación de las propiedades térmicas, como congelación y esterilización.
3. Desarrollar una subrutina para detectar la localización real del termopar, comparando los datos reales, con todos los nodos internos generados en la simulación por diferencias finitas, utilizando los parámetros estadísticos de ajuste de datos.
4. Determinar las propiedades térmicas de los alimentos, con instrumentos más sofisticados para aumentar la precisión de las simulaciones, como por ejemplo, el equipo KD2 Pro (Decagon[®], USA), el cual es capaz de medir conductividad térmica, resistividad, difusividad térmica y calor específico en alimentos a diferentes temperaturas.

VII. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Abakarova, A; Nuñez, M. 2013. Thermal food processing optimization: Algorithms and software. *Journal of Food Engineering*, 115 (4): 428–442.

Agüero, M; Ansorena, M; Roura, S; del Valle, C. 2008. Thermal inactivation of peroxidase during blanching of butternut squash. *LWT - Food Science and Technology*, 41(3): 401– 407.

Ahromrit, A; Nema, P. 2010. Heat and mass transfer in deep-frying of pumpkin, sweet potato and taro. *Journal of Food Science and Technology*, 47(6): 632-637.

Alhamdan, A; Sastry, S.K. 1990. Natural convection heat transfer between non- Newtonian fluids and an irregular shaped particle. *Journal of Food Process Engineering*, 13, 113–124.

Alhamdan, A; Sastry, S.K; Blaisdell, J.L. 1990. Natural convection heat transfer between water and an irregular-shaped particle. *Transactions of the ASAE*, 33(2): 620.

Almonacid-Merino, S. F; Simpson, R; Torres, J. A. 1993. Time-variable retort temperature profiles for cylindrical cans: batch process time, energy consumption, and quality retention model. *Journal of Food Process Engineering*, 16, 271–287.

Anderson, B; Singh, R. P. 2002. Air impingement heat transfer on a cylindrically shaped object. *The IFT Annual Meeting and Food Expo*. Presentation no; 91C-22.

Andreasen, M. 2009. Modelling of Heat and Mass Transfer in Food Products. *COMSOL Conference*, Milan.

Andres, C; Ugás R. 2006. Loche: A unique pre-columbian squash locally grown in north coastal Peru. En: *Proceedings of Cucurbitaceae*. G. J. Holmes, ed. Universal Press, Raleigh, North Carolina, USA.

Andrieu, J; Gonnet, E; and Laurent, M. 1986. Pulse method applied to foodstuffs: Thermal diffusivity determination, En: *Food Engineering and Process Applications*, Vol. 1. Transport Phenomena, Le Maguer, M. and Jelen, P., Eds., Elsevier Applied Science, London.

Ansari, F. 1999. Finite difference solution of heat and mass transfer problems related to precooling of food. *Energy Conversion & Management*, 40: 795-802.

AOAC. 2002. Official Methods of Analysis of the Association of Official Analytical Chemists.

Arroqui, C; López, A; Esnoz, A; Vírveda, P. 2003. Mathematical model of an integrated blancher/cooler. *Journal of Food Engineering*, 59(2-3): 297-307.

Awuah, G.B; Ramaswamy, H.S; Simpson, B.K. 1993. Surface heat transfer coefficients associated with heating of food particles in CMC solutions. *Journal of Food Process Engineering*, 16, 39–57.

Awuah, G.B; Ramaswamy, H.S; Simpson, B.K. 1995. Comparison of two methods for evaluating fluid-to-surface heat transfer coefficients. *Food Research International* 28, 261–271.

Bairi, A; Laraqi, N; Maria, J. 2007. Determination of thermal diffusivity of foods using 1D Fourier cylindrical solution. *Journal of Food Engineering*, 78, 669–675.

Betta, G; Rinaldi, M; Barbanti, D; Massini, R. 2009. A quick method for thermal diffusivity estimation: Application to several foods. *Journal of Food Engineering*, 91, 34–41.

Bisceglia, B; Brasiello, A; Pappacena, R; Vietri R. 2013. Food Cooking Process: Numerical Simulation of the Transport Phenomena. *COMSOL Conference*, Rotterdam.

Cai, R; Gou, C; Li, H. 2007. Algebraically explicit analytical solutions of unsteady 3-D nonlinear non-Fourier (hyperbolic) heat conduction. *International Journal of Thermal Sciences*, 45, 893 – 896.

Califano, A.N; Calvelo, A. 1991. Thermal conductivity of potato between 50°C and 100°C. *Journal of Food Science*, 56, 586–589.

Cariño-Sarabia, A; Vélez-Ruiz, J.F. 2013. Evaluation of convective heat transfer coefficient between fluids and particles in suspension as food model systems for natural convection using two methodologies. *Journal of Food Engineering*, 115, 173–181.

Çengel, Y. 2007. *Transferencia de calor y masa. Un enfoque práctico.* McGraw-Hill Interamericana. México.

Centro Internacional de la Papa. 2006. *Catálogo de variedades de papa nativa de Huancavelica*, Perú. Lima-Perú.

Cepeda, J.F; Weller, J.F.; Thippareddi, H; Negahban, M; Subbiah, J. 2013. Modeling cooling of ready-to-eat meats by 3D finite element analysis: Validation in meat processing facilities, *Journal of Food Engineering*, 116(2): 450–461.

Cernuschi, F; Bison, G; Figari, A; Merinetti, S; Grinzato, E. 2004. Thermal diffusivity measurements by photothermal and thermographic techniques. **International Journal of Thermophysics**, 25, 439–457.

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.

Chang, S.Y; Toledo, R.T. 1990. Simultaneous determination of thermal diffusivity and heat transfer coefficient during sterilization of carrot dices in a packed bed, *Journal of Food Science*, 55(1): 199.

Choi, Y.H. 1985. *Food thermal property prediction as effected by temperatura and composition*. Ph. D. Dissertation, Purdue University, W. Lafayette, IN.

Choi, Y; Okos, M.R. 1986. Effects of temperature and composition on the thermal properties of foods. En: *Food Engineering and Process Applications*, Vol. 1, Transport Phenomena, Le Maguer, M. and Jelen, P., eds., Elsevier Applied Science, London.

Christensen, M; Adler-Nissen, J. 2015. Simplified equations for transient heat transfer problems at low Fourier numbers. *Applied Thermal Engineering*, 76 (5): 382–390.

Cleland, A. C; Earle, R. L. 1979. Prediction of Freezing Times for Foods in Rectangular Packages. *Journal of Food Science*, 44: 964–970.

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.

Delgado, A; Sun, D. 2003. One-dimensional finite difference modelling of heat and mass transfer during thawing of cooked cured meat. *Journal of Food Engineering*, 57, 383–389.

Dickerson Jr., R.W. 1965. An apparatus for the measurement of termal diffusivity in foods. *International Journal of Food Properties*, 4, 383–403.

Durance, T. D; Jingle, J; Joseph, M. 1997. Selection of variable retort temperatura processes for canned salmon. *Journal of Food Process Engineering*, 20, 65–76.

Erdoğdu, F. 2005. Mathematical approaches for use of analytical solutions in experimental determination of heat and mass transfer parameters. *Journal of Food Engineering*, 68, 233–238.

Erdođdu, F. 2010. “Fundamentals of Heat Transfer in Food Processing”. En: *Mathematical Modeling of Food Processing*. Ed. M.M. Farid, 69-87, CRC Press – Taylor & Francis Group, Boca Raton, FL, USA.

Erdogdu, F; Balaban, M. O; Chau, K. V. 1998. Modeling of heat conduction in elliptical cross section: II. Adaptation to thermal processing of shrimp. *Journal of Food Engineering*, 28, 241–258.

Erdođdu, F; Linke, M; Praeger, U; Geyer, M; Schlüter, O. 2014. Experimental determination of thermal conductivity and thermal diffusivity of whole green (unripe) and yellow (ripe) Cavendish bananas under cooling conditions. *Journal of Food Engineering*. 128: 46–52.

Erdođdu, F; Turhan, M. 2009. Analytical Solutions in Conduction Heat Transfer Problems. En: *Optimization in Food Engineering*. Editado por Erdođdu, F. CRC Press, Taylor & Francis Group. Boca Raton, FL.

Fabbri, A; Cevoli, C; Romani, S; Dalla Rosa, M. 2011. Numerical model of heat and mass transfer during roasting coffee using 3D digitised geometry. *Procedia Food Science*, 1, 742–746.

FAOSTAT. 2015. Statistics Division of FAO. Disponible en: <http://faostat.fao.org>. Consultado el 21 de Enero del 2015.

Fasina, O; Fleming, H. 2001. Heat transfer characteristics of cucumbers during blanching. *Journal of Food Engineering*, 47: 203-210.

Fastag, J; Koide, H; Rizvi, S. S. 1996. Variable control of a batch retort and process simulation for optimization studies. *Journal of Food Process Engineering*, 19, 1–14.

Fellows, P. 2009. *Food Processing Technology: Principles and Practice*. Third edition. Woodhead Publishing Limited. UK.

Feyissa, A. 2011. *Robust Modelling of Heat and Mass Transfer in Processing of Solid Foods*. Ph. D. Dissertation, Food Production Engineering, National Food Institute. University of Denmark.

Gaffney, J; Baird, D.; Eshleman, D. 1980. Review and analysis of transient method for determining thermal diffusivity of fruits and vegetables. *ASHRAE Transaction*, 86(2), 261.

Ganthavorn, C; Nagel, C; Powers, J. 1991. Thermal inactivation of asparagus lipoxygenase and peroxidase. *Journal of Food Science*, 56(1): 47–49.

Garrote, R; Silva, E; Bertone, R; Roa; R. 2004. Predicting the end point of a blanching process. *LWT - Food Science and Technology*. 37(3):309-315.

Gökmen, V. 2010. Selection of the indicator enzyme for blanching of vegetables. En: *Enzymes in Fruit and Vegetable Processing*. Chemistry and Engineering Applications. CRC Press, Taylor & Francis Group. Boca Raton, FL.

Goñi, S; Salvadori, V. 2011. Multi-objective optimization of beef roasting. *Procedia Food Science*, 1, 747 – 752.

Gordon, C; Thorne, S. 1990. Determination of the thermal diffusivity of foods from temperature measurements during cooling, *Journal of Food Engineering*, 11, 133.

Gould, W. 1999. *Potato Production, Processing and Technology*. CTI Publication, Inc. Timonium – Maryland.

Gratzek, J.P; Toledo, R.T. 1993. Solid food thermal conductivity determination at high temperatures. *Journal of Food Science*, 58, 908–913.

Hahn, D; Özişik, N. 2012. *Heat Conduction*. 3rd ed. Hoboken: Wiley, USA.

Hallstrom, B; Skjoldebrand, C; Tragardh, C. 1988. *Heat Transfer and Food Products*, Elsevier Applied Science Publishers Ltd., London.

Hamdamia, N; Monteau, JY; Le Bail, A. 2004. Thermophysical properties evolution of French partly baked bread during freezing. *Food Research International*, 37(7): 703–713.

Hayakawa, K. and Succar, J. 1983. A method for determining the apparent thermal diffusivity of spherical foods, *Food Science and Technology*, 16, 373.

Horton, D. 1992. *La papa: Producción, Comercialización y Programas*. Centro Internacional de la Papa (CIP). Lima – Perú.

Huamán, Z. y Ross R.W. 1985. Updated listing of potato species names, abbreviations and taxonomic status. *American Journal of Potato Research*. 62(11):629-641.

Hung, Y. C; Thompson, D. R. 1983. Freezing Time Prediction for Slab Shape Foodstuffs by an Improved Analytical Method. *Journal of Food Science*, 48: 555–560.

Ibarz, A; Barbosa-Cánovas, G. 2005. *Operaciones Unitarias en la Ingeniería de Alimentos*. Mundi Prensa. Madrid, España.

Incropera, F y De Witt. 1999. *Fundamentos de Transferencia de Calor*. Person Education, S.A. México.

INDECOPI. 2010. Denominación de origen del Loche de Lambayeque. Resolución N° 018799 - 2010 /DSD-INDECOPI. Lima – Perú.

Jackson, J; Bourne, M; Barnard, J. 1996. Optimization of blanching for crispness of banana chips using response surface methodology. *Journal of Food Science*, 61(1): 165–166.

Jeffrey, D. 1990. Appendix: An outline classification of the Cucurbitaceae. En: Bates, DM, Robinson, RW, Jeffrey, C. *Biology and utilization of the Cucurbitaceae*. Ithaca and London: Cornell Univ.

Kim, K. H; Teixeira, A. 1997. Predicting internal temperature response to conduction heating of odd-shaped solids. *Journal of Food Process Engineering*, 20, 51–63.

Kookos, I; Stoforos, N. 2015. Heat Transfer. En: *Food Engineering Handbook – Fundamental*. Ed. T. Varzakas y C. Tzia, 75-112, CRC Press – Taylor & Francis Group, Boca Raton, FL, USA.

Lamberg, I; Hallstrom, B. 1986. Thermal properties of potatoes and a computer simulation model of a blanching process. *Food Technology*, 21, 577.

Lemus-Mondaca, R.A; Zambra, C.E; Vega-Gálvez, A; Moraga, N.O. 2013. Coupled 3D heat and mass transfer model for numerical analysis of drying process in papaya slices. *Journal of Food Engineering*, 116: 109–117.

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.

Loss, R; Santos, I; Muniz, E; Proveti, J; Porto, P. 2011. Finite difference solutions for heat transfer during drying of cubic papaya particles. *Procedia Food Science*, 1: 753–761.

Luh, B; Woodroof, I. 1988. *Commercial vegetable processing*, 2nd ed. New York: Van Nostrand Reinhold.

Luna, J; Garrote, R. 1987. Prediction of Vitamin C Retention of Potato Strips Blanched in Water. *Journal of Food Science*. 52: 634–638.

Luna, J; Garrote, R; Bressan, J. 1986. Thermo-Kinetic Modeling of Peroxidase Inactivation during Blanching-Cooling of Corn on the Cob. *Journal of Food Science*. 51: 141–145.

Lund, D; Bruin, S; Lazar, M. 1972. Internal temperature distribution during individual quick blanching. *Journal of Food Science*, 37, 167–170.

Magee, T; Bransburg, T. 1995. Measurement of thermal diffusivity of potato, malt bread and wheat flour. *Journal of Food Engineering*, 25, 223-233.

Maldonado, L; Suárez, V; G. Thiele. 2008. *Estudio de la adopción de variedades de papa en zonas pobres del Perú.* Centro Internacional de la Papa (CIP), Lima, Perú.

Mannapperuma, J.D; Singh, R.P. 1988. Prediction of freezing and thawing times of foods using a numerical method based on enthalpy formulation, *Journal of Food Science*, 53: 626 - 630.

Mariani, V.C; Lima, A.G; Coelho, L.S. 2008. Apparent thermal diffusivity estimation of the banana during drying using inverse method. *Journal of Food Engineering*, 85, 569-579.

Martinez, V. 2000. *Simulación de Procesos en Ingeniería Química.* Plaza y Valdes, S.A. de C.V. Editores.

Martins, R; Lopes, V; Vicente, A; Teixeira, A. 2009. Numerical Solutions: Finite Element and Finite Volume Methods. En: *Optimization in Food Engineering.* Editado por Erdoğan, F. CRC Press, Taylor & Francis Group. Boca Raton, FL.

Michailidis, P; Krokida, K; Rahman, S. 2009. Surface Heat Transfer Coefficient in Food Processing. En: *Handbook of Food Preservation*, 2nd ed. Rahman, M.S. (ed.). CRC Press, Boca Raton, FL.

Moens, D; Vandepitte, D. 2005. A survey of non-probabilistic uncertainty treatment in finite element analysis. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 194, (12–16):1527–1555.

Mohamed, I. 2003. Computer simulation of food sterilization using an alternating direction implicit finite difference method. *Journal of Food Engineering*, 60: 301–306.

Mohamed, S. and Hussein, R. 1994. Effect of low temperature blanching, cysteine-HCl, N-acetyl-L-cysteine, Na metabisulphite and drying temperatures on the firmness and nutrient content of dried carrots. *Journal of Food Process Preservation*, 18: 343–348.

Mohsenin, N. 1980. *Thermal Properties of Foods and Agricultural Materials*, Gordon and Breach Science Publishers Inc., New York.

Murakami, E.G. 1997. The thermal properties of potatoes and carrots as affected by thermal processing. *Journal of Food Process Engineering*, 20, 415–432.

Mwangi, J.M; Rizvi, S.S.H; Datta, A.K. 1993. Heat transfer to particles in shear flow: Applications in aseptic processing. *Journal of Food Engineering*, 19: 55.

Nesvadba, P. 1982. Methods for the measurement of thermal conductivity and diffusivity of foodstuffs. *Journal of Food Engineering*. (1): 93–113.

Newman, A.B. 1936. Heating and cooling rectangular and cylindrical solids. *Industrial & Engineering Chemistry*, 28, 545.

Nicolai, P. Verboven, N. Scheerlinck. 2001. The modelling of heat and mass transfer. En: *Food process modelling*. Editado por Tijskens, Hertog y Nicolai. Woodhead Publishing, Cambridge.

Obregón La Rosa, A; Repo-Carrasco, R; Peñafiel C. 1998. Estudio técnico para la obtención de un enlatado de papas a partir de variedades nativas .Anales Científicos Universidad Nacional Agraria La Molina. 174-196.

Ozisik, N. 1993. Heat Conduction. John Wiley and Sons, Inc. New York.

Palazoğlu, K., 2006. Influence of convective heat transfer coefficient on the heating rate of materials with different thermal conductivities. *Journal of Food Engineering*. 73, 290–296.

Palazoğlu, T.K; Erdođdu, F. 2009. Numerical Solutions: Finite Difference Methods. En: *Optimization in Food Engineering*. Editado por Erdođdu, F. CRC Press, Taylor & Francis Group. Boca Raton, FL.

Palazoglu, T.K; Sandeep, K.P. 2002, Assessment of the Effect of Fluid-to-particle Heat Transfer Coefficient on Microbial and Nutrient Destruction during Aseptic Processing of Particulate Food. *Journal of Food Science*, 67: 3359–3364.

Pérez, C; Barrientos, H; Román, J; Mahn, A. 2014. Optimization of a blanching step to maximize sulforaphane synthesis in broccoli florets. *Food Chemistry* 145 (15): 264–271.

Perry, R.H; Green, D. 1997. Perry's Chemical Engineers' Handbook, 7th ed. McGraw Hill, New York.

Perussello, C; Mariani, V; Amarante, A. 2011. Combined modeling of thermal properties and freezing process by convection applied to green beans. *Applied Thermal Engineering*, (31): 2894–2901.

Pham, Q.T. 1996. Prediction of calorimetric properties and freezing time of foods from composition data, *Journal of Food Engineering*, 30:95-107.

Puri, V; Anantheswaran, R. 1993. The Finite-element Method in Food Processing: A Review. *Journal of Food Engineering*, 19(3): 247-274.

Rahman, S. 1995. *Food Properties Handbook*, CRC Press, Boca Raton, FL.

Rahman, S; Perera, C. 2007. Drying and Food Preservation, En: Handbook of food preservation 2nd ed. Editado por: Shafiur Rahman. CRC Press, Taylor & Francis Group. Boca Raton.

Ramaswamy, H.S; Pannu, K; Simpson, B.K; and Smith, J.P. 1992. An apparatus for particle-to-fluid relative velocity measurement in tube flow at various temperatures under nonpressurized flow conditions. *Food Research International*, 25(4): 277.

Ramaswamy, H. S; Tung, M. A. 1984. A Review on Predicting Freezing Times of Foods. *Journal of Food Process Engineering*, 7: 169–203.

Ramesh, M.N; Sathiyarayana, K. 1997. Surface heat transfer coefficient in steam cooking of vegetables. *Journal of Food Science and Technology* 34, 159–161.

Ramesh, M; Wolf, W; Tevini, D; Bognár, A. 2002. Microwave Blanching of Vegetables. *Journal of Food Science*, 67(1): 390–398.

Rao, M.A; Barnard, J; Kenny, J. 1975. Thermal conductivity and thermal diffusivity of process variety squash and white potatoes. *Transactions of the ASAE*, 18, 1188–1192.

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.

Rice, P; Selman, J.D; Abdul-Rezzak, R.K. 1988. Effect of temperature on thermal properties of ‘record’ potatoes. *International Journal of Food Science and Technology*, 23, 281.

Sablani, S. 2009. Measurement of Surface Heat Transfer Coefficient. En: *Handbook of Food Preservation*, 2nd ed. Rahman, M.S. (ed.). CRC Press, Boca Raton, FL.

Schmalko, M. E; Morawicki, R. O; Ramallo, L. A. 1997. Simultaneous determination of specific heat capacity and thermal conductivity using the finite difference method. *Journal of Food Engineering*, 31, 531-540.

Sakin-Yilmazer, M; Kaymak-Ertekin, F; Ilicali, C. 2012. Modeling of simultaneous heat and mass transfer during convective oven ring cake baking. *Journal of Food Engineering*, 111: 289–298.

Sandeep, K; Soojin, J; Joseph, I. 2008. Introduction to Modeling and Numerical Simulation. *Food Processing Operations Modeling*. CRC Press.

Saravacos, G.D. 1995. Mass transfer properties of foods. In: *Engineering Properties of Foods*, 2nd ed. Saravacos, G.D. and Maroulis, Z.B. *Transport Properties of Foods*, Marcel Dekker, New York.

Saravacos, G; Kostaropoulos, A. 2002. *Handbook of Food Processing Equipment*. Kluwer Academic Plenum Publishers, New York.

Sastry, S.K; Heskitt, B.F; Blaisdell, J.L. 1989. Experimental and modeling studies on convective heat transfer at the particle–liquid interface in aseptic processing systems. *Food Technology*, 43(3): 132.

Scheerlinck, N; Marquenie, D; Jancsó P T; Verboven P, Moles CG; Banga JR; Nicolai, B. 2004, A model-based approach to develop periodic thermal treatments for surface decontamination of strawberries. *Postharvest Biology and Technology*, 34, 39-52.

Singh, R.P; Heldman, D. 2014. Introduction to Food Engineering, 5th ed. Elsevier, USA.

Singh, R.P. 1982. Thermal diffusivity in food processing. *Food Technology*. 36 (2): 87–91.

Teixeira, A. A; Dixon, J. R; Zahradnik, J. W; Zinsmeister, G. E. 1969. Computer optimization of nutrient retention in thermal processing of conduction-heated foods. *Food Technology*, 23, 137.

Teixeira, A. A; Zinsmeister, G. E; Zahradnik, J. W. 1975. Computer simulation of variable retort control and container geometry as a possible means of improving thiamine retention in thermally processed foods. *Journal of Food Science*, 40, 656–659.

Tung. M.A; Morello. G.F; Ramaswamy, H.S. 1989. Food properties. Heat transfer and sterilization considerations in retort processes. En: *Food Properties and Computer-Aided Engineering of Food Processing System*. Kluwer Academic Publishers. Dordrecht. NLD 49-71.

Uyar, R; Erdogdu. F. 2012. Numerical evaluation of spherical geometry approximation for heating and cooling of irregular shaped food products. *Journal of Food Science*, 77: E166-E175.

Vidaurre, J; Castañeda, M. 2014. Determinación de los parámetros de transferencia de calor durante el calentamiento del loche (*Cucurbita moschata* Duchesne) utilizando soluciones numéricas y analíticas. *Rev. Ingeniería: Ciencia, Tecnología e Innovación*. 1(2): 1-12.

Wang, L; Sun, D. 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.

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, Z; Wu, H; Zhao, G; Liao, X; Chen, F; Wu, J; Hu, X. 2002. One-dimensional finite difference modeling on temperature history and freezing time of individual food, *Journal of Food Engineering*, 79: 502-510.

Wilson, H.A.; Singh. R.P. 1987. Numerical Simulation of Individual Quick Freezing of Spherical Foods. *International Journal of Refrigeration*, 10: 149 – 155.

Woodfield, P.L; Monde, M; Mitsutake, Y. 2007. On estimating thermal diffusivity using analytical inverse solution for unsteady one-dimensional heat conduction. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 50, 1202–1205.

Wu, B; Yang, W; Jia, C. 2004. A three-dimensional numerical simulation of transient heat and mass transfer inside a single rice kernel during the drying process. *Biosystems Engineering* 87 (2), 191–200.

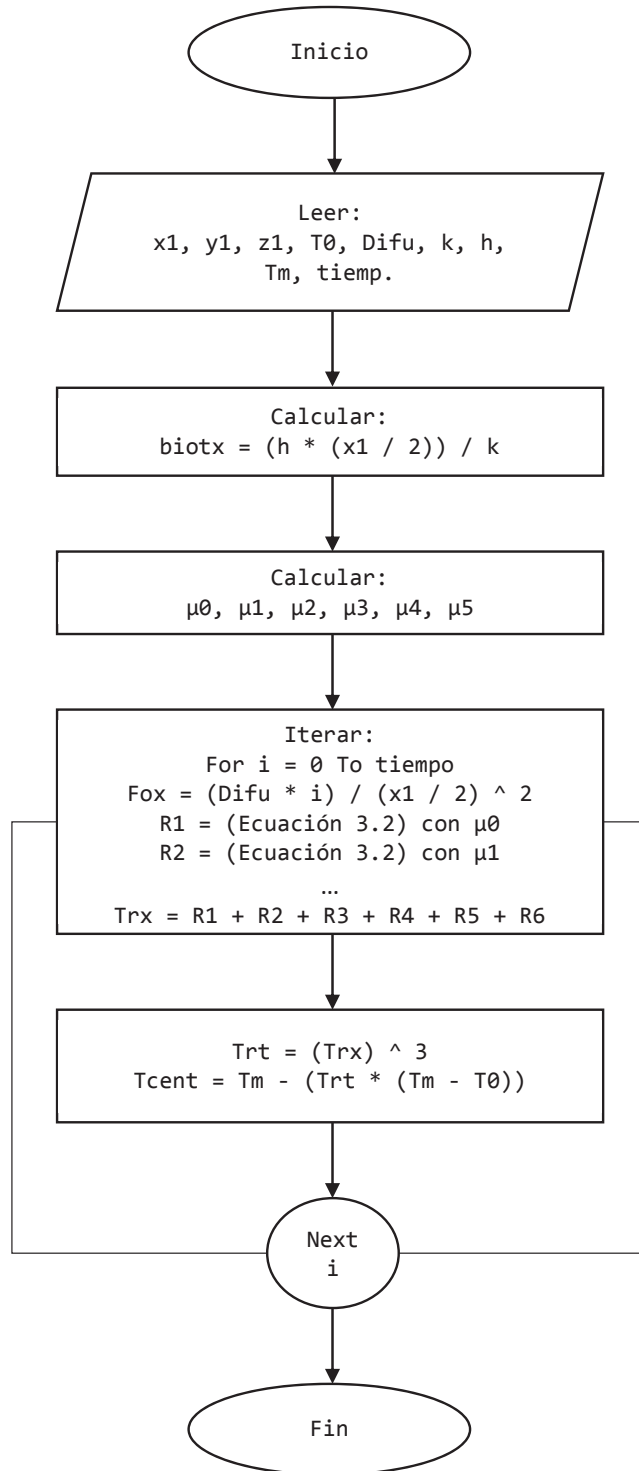
Yıldız, A; Palazoğlu, T.K; Erdoğan, F. 2007. Determination of heat and mass transfer parameters during frying of potato slices. *Journal of Food Engineering*, 79, 11-17.

VIII. ANEXOS

ANEXO I: Correlaciones de Choi y Okos (1986) para determinar la conductividad térmica (k), densidad (ρ), calor específico (c_p) con respecto a la composición y temperatura (0 a 150°C) de los alimentos

Propiedad	Forma del modelo	Componente	Función de la temperatura
Densidad (kg/m ³)	$\rho = \frac{1}{\sum(X_{si}/\rho_{si})}$	Carbohidratos	$\rho = 1599.1 - 0.3105T$
		Fibra	$\rho = 1311.5 - 0.3659T$
		Proteína	$\rho = 1330.0 - 0.518T$
		Grasa	$\rho = 925.6 - 0.4176T$
		Ceniza	$\rho = 2423.8 - 0.2806T$
		Agua Líquida	$\rho = 997.2 + 3.1439 \times 10^{-3}T - 3.7574 \times 10^{-3}T^2$
Calor específico (J/kg)	$c_p = \sum(X_{si}c_{psi})$	Carbohidratos	$cp = 1.5488 + 1.9625 \times 10^{-3}T - 5.9399 \times 10^{-6}T^2$
		Fibra	$cp = 1.8459 + 1.8306 \times 10^{-3}T - 4.6509 \times 10^{-6}T^2$
		Proteína	$cp = 2.0082 + 1.2089 \times 10^{-3}T - 1.3129 \times 10^{-6}T^2$
		Grasa	$cp = 1.9842 + 1.4733 \times 10^{-3}T - 4.8008 \times 10^{-6}T^2$
		Ceniza	$cp = 1.0926 + 1.8896 \times 10^{-3}T - 3.6817 \times 10^{-6}T^2$
		Agua Líquida	$cp = 4.1762 - 9.0854 \times 10^{-5}T + 5.4731 \times 10^{-6}T^2$
Conductividad térmica (W/m K)	$k = \sum(k_{si}E_{si})$	Carbohidratos	$k = 0.20141 + 1.3874 \times 10^{-3}T - 4.3312 \times 10^{-6}T^2$
		Fibra	$k = 0.18331 + 1.2497 \times 10^{-3}T - 3.1683 \times 10^{-6}T^2$
		Proteína	$k = 0.17881 + 1.1958 \times 10^{-3}T - 2.7178 \times 10^{-6}T^2$
		Grasa*	$k = 0.18071 - 2.7064 \times 10^{-4}T - 1.7749 \times 10^{-7}T^2$
		Ceniza	$k = 0.32962 + 1.4011 \times 10^{-3}T - 2.9069 \times 10^{-6}T^2$
		Agua Líquida	$k = 0.57109 + 1.7625 \times 10^{-3}T - 6.7063 \times 10^{-6}T^2$

ANEXO II: Diagrama de flujo de la aplicación computacional para simular la transferencia de calor mediante la solución analítica en 3D



ANEXO III: Códigos de programación en Visual Basic® – 2013 del método de separación de variable (analítico) para simular la transferencia de calor de un cubo en tres dimensiones

(3D)

```
Dim tiemp, Trx, Fox, Trt, Tcent, Difu, x1, y1, z1, T0, Tm, h, k, biotx, b(10),  
dif, xs(10), f(10), a(10), R1, R2, R3, R4, R5, R6, R7 As Double
```

```
'LEER DATOS
```

```
x1 = TextBox1.Text 'Dimensión en x  
y1 = TextBox2.Text 'Dimensión en y  
z1 = TextBox3.Text 'Dimensión en z  
T0 = TextBox4.Text 'Temperatura inicial  
Difu = TextBox6.Text * 0.0000001 'Difusividad térmica  
k = TextBox5.Text 'Conductividad térmica  
h = TextBox7.Text 'Coeficiente de transferencia de calor  
Tm = TextBox8.Text ' Temperatura del medio  
tiemp = TextBox9.Text 'Tiempo total del tratamiento
```

```
biotx = (h * (x1 / 2)) / k 'Cálculo del número de Biot para el eje x
```

```
'Subrutina para determinar las 6 raices de la ecuación característica para una  
placa infinita
```

```
For j = 0 To 5  
    a(j) = j * Math.PI  
    b(j) = (2 * j + 1) * (Math.PI / 2)  
    dif = 1  
    Do While dif > 0.001  
        xs(j) = (a(j) + b(j)) / 2  
        f(j) = biotx / Math.Tan(xs(j))  
        dif = Math.Abs((f(j) - xs(j)) / xs(j))  
        If f(j) > xs(j) Then  
            a(j) = xs(j)  
        Else
```

```

        b(j) = xs(j)
    End If
Loop
Next j

'Creación de la cuadrícula de datos
GridV1.Rows.Clear()
GridV1.ColumnCount = 5
GridV1.Columns(0).HeaderText = "Tiempo (s)"
GridV1.Columns(1).HeaderText = "Temp simulación analítica (°C)"

For X = 0 To tiemp
GridV1.Rows.Add(X.ToString)
Next X

'Proceso iterativo para determinar el ratio de temperaturas

For i As Integer = 0 To tiemp
Fox = (Difu * i) / (x1 / 2) ^ 2

R1 = ((2 * Math.Sin(xs(0))) / (xs(0) + Math.Sin(xs(0)) * Math.Cos(xs(0)))) *
(Math.Cos(xs(0)) * (0 / (x1 / 2)))) * (Math.Exp(-(xs(0)) ^ 2 * Fox))

R2 = ((2 * Math.Sin(xs(1))) / (xs(1) + Math.Sin(xs(1)) * Math.Cos(xs(1)))) *
(Math.Cos(xs(1)) * (0 / (x1 / 2)))) * (Math.Exp(-(xs(1)) ^ 2 * Fox))

R3 = ((2 * Math.Sin(xs(2))) / (xs(2) + Math.Sin(xs(2)) * Math.Cos(xs(2)))) *
(Math.Cos(xs(2)) * (0 / (x1 / 2)))) * (Math.Exp(-(xs(2)) ^ 2 * Fox))

R4 = ((2 * Math.Sin(xs(3))) / (xs(3) + Math.Sin(xs(3)) * Math.Cos(xs(3)))) *
(Math.Cos(xs(3)) * (0 / (x1 / 2)))) * (Math.Exp(-(xs(3)) ^ 2 * Fox))

```

```
R5 = ((2 * Math.Sin(xs(4))) / (xs(4) + Math.Sin(xs(4)) * Math.Cos(xs(4)))) *  
(Math.Cos(xs(4)) * (0 / (x1 / 2)))) * (Math.Exp(-(xs(4)) ^ 2 * Fox))
```

```
R6 = ((2 * Math.Sin(xs(5))) / (xs(5) + Math.Sin(xs(5)) * Math.Cos(xs(5)))) *  
(Math.Cos(xs(5)) * (0 / (x1 / 2)))) * (Math.Exp(-(xs(5)) ^ 2 * Fox))
```

```
'Suma de los seis términos de la ecuación
```

```
Trx = R1 + R2 + R3 + R4 + R5 + R6
```

```
' Intersección de tres placas infinitas para formar el 3D
```

```
Trt = (Trx) ^ 3
```

```
'Cálculo de la temperatura central para cada espacio de tiempo
```

```
Tcent = Tm - (Trt * (Tm - T0))
```

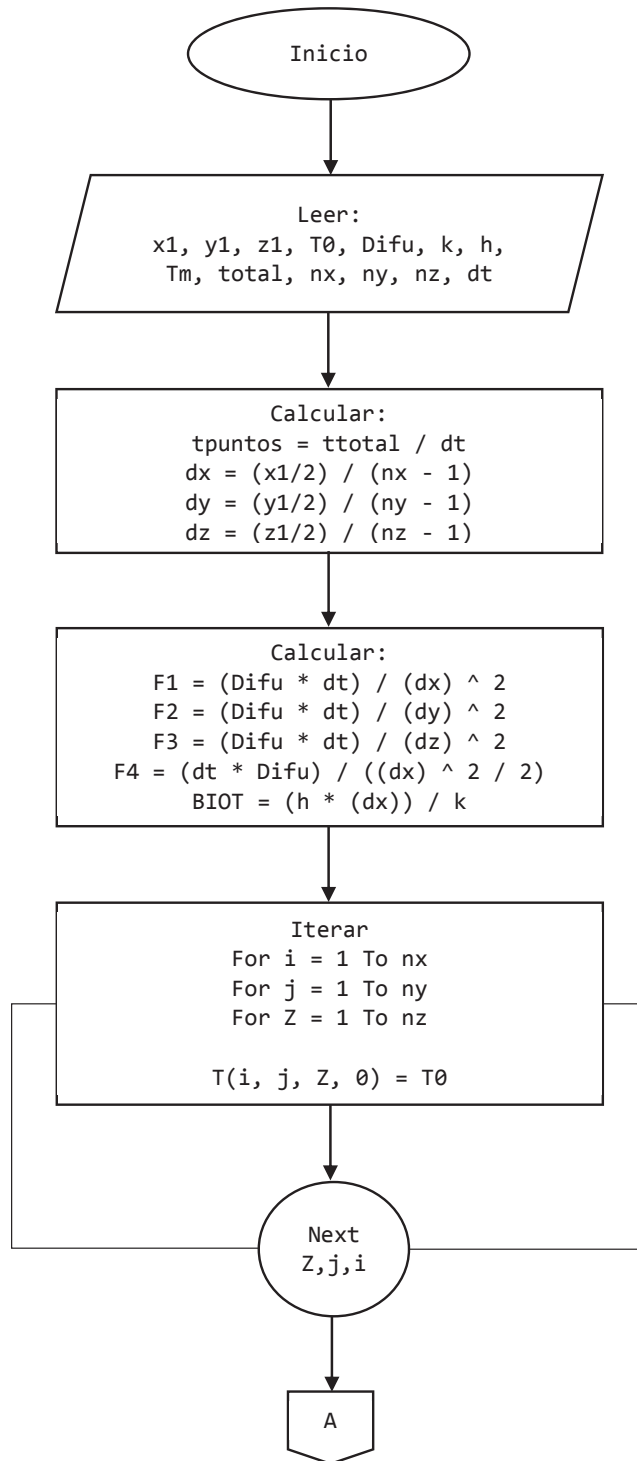
```
'Impresión de los resultados
```

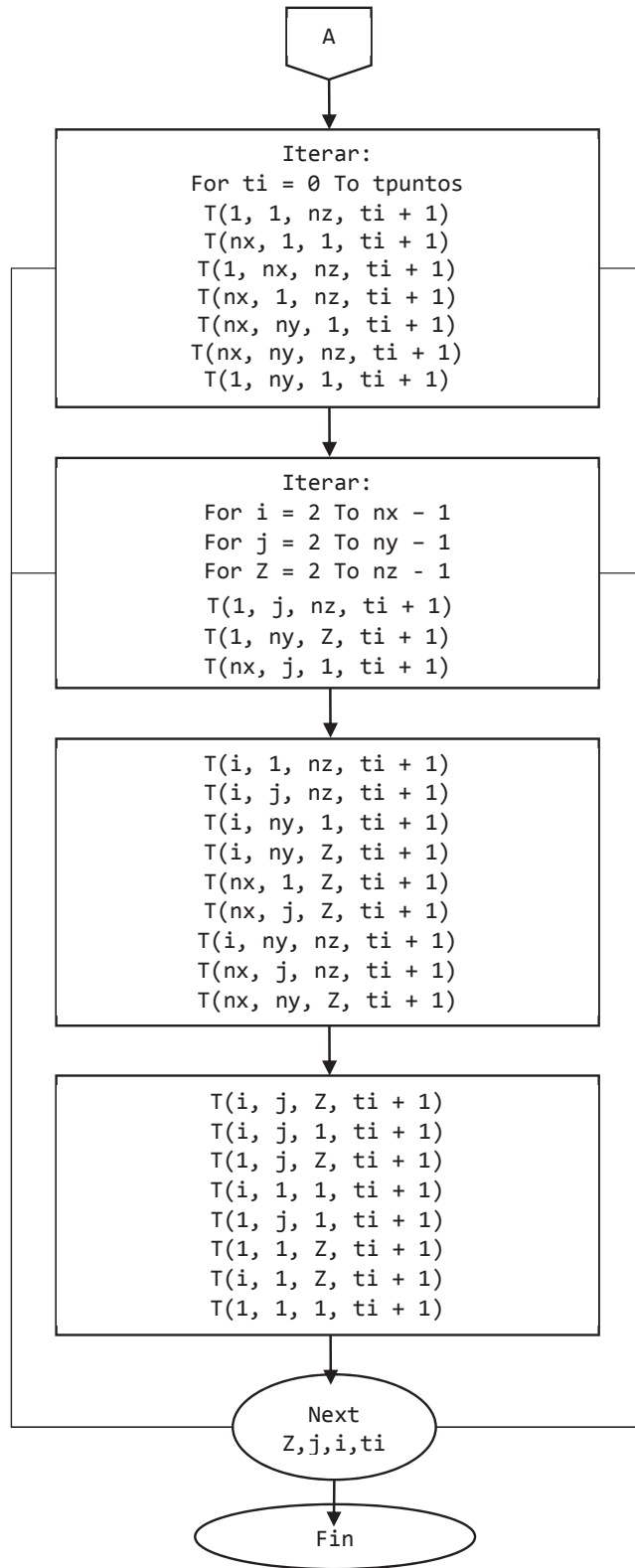
```
GridV1.Item(0, i).Value = i
```

```
GridV1.Item(1, i).Value = Format(Tcent, "#.###")
```

```
Next i
```


ANEXO IV: Diagrama de flujo de la aplicación computacional para simular la transferencia de calor mediante diferencias finitas explícitas en 3D





ANEXO V: Códigos de programación en Visual Basic® – 2013 del método de diferencias finitas explícitas para simular la transferencia de calor de un cubo en tres dimensiones (3D)

```
Dim T(20, 20, 20, 10000), P, F1, F2, F3, F4, F5, F6, BIOT, BIOT1, BIOT2, BI,  
B0, BU, tpuntos, ttotal, dx, dy, dz, Difu, x1, y1, z1, T0, Tm, h, k, nx, ny,  
nz, dt As Double
```

```
'LEER DATOS
```

```
x1 = TextBox15.Text / 2 'Mitad de la dimensión en x  
y1 = TextBox14.Text / 2 'Mitad de la dimensión en y  
z1 = TextBox13.Text / 2 'Mitad de la dimensión en z  
T0 = TextBox12.Text 'Temperatura inicial  
Difu = TextBox11.Text * 0.000001 'Difusividad térmica  
k = TextBox10.Text 'Conductividad térmica  
h = TextBox18.Text 'Coeficiente de transferencia de calor  
Tm = TextBox17.Text 'Temperatura del medio de calentamiento  
ttotal = TextBox16.Text 'Tiempo total del tratamiento  
nx = TextBox21.Text 'Nodos totales en el eje x  
ny = TextBox20.Text 'Nodos totales en el eje y  
nz = TextBox19.Text 'Nodos totales en el eje z  
dt = TextBox22.Text 'Diferencial de tiempo  
  
tpuntos = ttotal / dt 'Cálculo de los puntos totales  
  
dx = (x1) / (nx - 1) 'Cálculo del diferencial de espacio en x  
dy = (y1) / (ny - 1) 'Cálculo del diferencial de espacio en y  
dz = (z1) / (nz - 1) 'Cálculo del diferencial de espacio en z  
  
F1 = (Difu * dt) / (dx) ^ 2 'Parámetro fijo para nodos internos en x  
F2 = (Difu * dt) / (dy) ^ 2 'Parámetro fijo para nodos internos en y  
F3 = (Difu * dt) / (dz) ^ 2 'Parámetro fijo para nodos internos en z
```

```
F4 = (dt * Difu) / ((dx) ^ 2 / 2) 'Parámetro fijo para nodos externos tipo cara
BIOT = (h * (dx)) / k
```

```
F5 = (dt * Difu) / ((dx) ^ 2 / 2) 'Parámetro fijo para nodos externos tipo
vértice
BIOT1 = (h * (dx)) / k
```

```
F6 = (dt * Difu) / ((dx) ^ 2 / 2) 'Parámetro fijo para nodos externos tipo
arista
BIOT2 = (h * (dx)) / k
```

```
'Valores para multiplicar a los nodos con (h)
```

```
BI = 1
BO = 2
BU = 3
```

```
'Parámetro para la impresión de valores por segundo
```

```
P = 1 / dt
```

```
'Creación de la cuadrícula de datos
```

```
GridV1.Rows.Clear()
GridV1.ColumnCount = 5
GridV1.Columns(0).HeaderText = "Tiempo (s)"
GridV1.Columns(1).HeaderText = "Temp simulación diferencias finitas (°C)"
```

```
For X = 0 To (tpuntos / P)
```

```
GridV1.Rows.Add(X.ToString)
```

```
Next X
```

'Proceso iterativo para asignar a todos los nodos generados la temperatura inicial en el segundo cero

```
For i As Integer = 1 To nx
  For j As Integer = 1 To ny
    For Z As Integer = 1 To nz
      T(i, j, Z, 0) = T0
    Next Z
  Next j
Next i
```

'Proceso iterativo para determinar la temperatura en los nodos externos fijos

```
For ti As Integer = 0 To tpuntos
```

$$T(1, 1, nz, ti + 1) = (T(1, 1, nz, ti) * (1 - BI * F4 * BIOT - 5 * F4)) + (BI * F4 * BIOT * Tm) + (F4 * (T(2, 1, nz, ti) + T(2, 1, nz, ti) + T(1, 2, nz, ti) + T(1, 2, nz, ti) + T(1, 1, nz - 1, ti)))$$
$$T(nx, 1, 1, ti + 1) = T(nx, 1, 1, ti) * (1 - BI * F4 * BIOT - 5 * F4) + (BI * F4 * BIOT * Tm) + (F4 * (T(nx - 1, 1, 1, ti) + T(nx, 2, 1, ti) + T(nx, 2, 1, ti) + T(nx, 2, nz, ti) + T(nx, 1, 2, ti)))$$
$$T(1, nx, nz, ti + 1) = T(1, ny, nz, ti) * (1 - BO * F5 * BIOT - 4 * F5) + (BO * F5 * BIOT * Tm) + (F5 * (T(2, ny, nz, ti) + T(2, ny, nz, ti) + T(1, ny - 1, nz, ti) + T(1, ny, nz - 1, ti)))$$
$$T(nx, 1, nz, ti + 1) = T(nx, 1, nz, ti) * (1 - BO * F5 * BIOT1 - 4 * F5) + (BO * F5 * BIOT1 * Tm) + (F5 * (T(nx - 1, 1, nz, ti) + T(nx, 2, nz, ti) + T(nx, 2, nz, ti) + T(nx, 1, nz - 1, ti)))$$
$$T(nx, ny, 1, ti + 1) = T(nx, ny, 1, ti) * (1 - BO * F5 * BIOT1 - 4 * F5) + (BO * F5 * BIOT1 * Tm) + (F5 * (T(nx - 1, ny, 1, ti) + T(nx, ny - 1, nz, ti) + T(nx, ny, 2, ti) + T(nx, ny, 2, ti)))$$

$$T(n_x, n_y, n_z, t_i + 1) = T(n_x, n_y, n_z, t_i) * (1 - BU * F6 * BIOT2 - 3 * F6) + (BU * F6 * BIOT2 * T_m) + (F6 * (T(n_x - 1, n_y, n_z, t_i) + T(n_x, n_y - 1, n_z, t_i) + T(n_x, n_y, n_z - 1, t_i)))$$

$$T(1, n_y, 1, t_i + 1) = T(1, n_y, 1, t_i) * (1 - BI * F4 * BIOT - 5 * F4) + (BI * F4 * BIOT * T_m) + (F4 * (T(2, n_y, 1, t_i) + T(2, n_y, 1, t_i) + T(1, n_y - 1, 1, t_i) + T(1, n_y, 2, t_i) + T(1, n_y, 2, t_i)))$$

'Proceso iterativo para determinar la temperatura en los nodos externos
movibles

For i As Integer = 2 To nx - 1

 For j As Integer = 2 To ny - 1

 For Z As Integer = 2 To nz - 1

$$T(1, j, n_z, t_i + 1) = T(1, j, n_z, t_i) * (1 - BI * F4 * BIOT - 5 * F4) + (BI * F4 * BIOT * T_m) + (F4 * (T(2, j, n_z, t_i) + T(2, j, n_z, t_i) + T(1, j + 1, n_z, t_i) + T(1, j - 1, n_z, t_i) + T(1, j, n_z - 1, t_i)))$$

$$T(1, n_y, Z, t_i + 1) = T(1, n_y, Z, t_i) * (1 - BI * F4 * BIOT - 5 * F4) + (BI * F4 * BIOT * T_m) + (F4 * (T(2, n_y, Z, t_i) + T(2, n_y, Z, t_i) + T(1, n_y - 1, Z, t_i) + T(1, n_y, Z + 1, t_i) + T(1, n_y, Z - 1, t_i)))$$

$$T(n_x, j, 1, t_i + 1) = T(n_x, j, 1, t_i) * (1 - BI * F4 * BIOT - 5 * F4) + (BI * F4 * BIOT * T_m) + (F4 * (T(n_x - 1, j, 1, t_i) + T(n_x, j + 1, 1, t_i) + T(n_x, j - 1, 1, t_i) + T(n_x, j, 2, t_i) + T(n_x, j, 2, t_i)))$$

$$T(i, 1, n_z, t_i + 1) = T(i, 1, n_z, t_i) * (1 - BI * F4 * BIOT - 5 * F4) + (BI * F4 * BIOT * T_m) + (F4 * (T(i + 1, 1, n_z, t_i) + T(i - 1, 1, n_z, t_i) + T(i, 2, n_z, t_i) + T(i, 2, n_z, t_i) + T(i, 1, n_z - 1, t_i)))$$

$$T(i, j, nz, ti + 1) = T(i, j, nz, ti) * (1 - BI * F4 * BIOT - 5 * F4) + (BI * F4 * BIOT * Tm) + (F4 * (T(i + 1, j, nz, ti) + T(i - 1, j, nz, ti) + T(i, j + 1, nz, ti) + T(i, j - 1, nz, ti) + T(i, j, nz - 1, ti)))$$

$$T(i, ny, 1, ti + 1) = T(i, ny, 1, ti) * (1 - BI * F4 * BIOT - 5 * F4) + (BI * F4 * BIOT * Tm) + (F4 * (T(i + 1, ny, 1, ti) + T(i - 1, ny, 1, ti) + T(i, ny - 1, 1, ti) + T(i, ny, 2, ti) + T(i, ny, 2, ti)))$$

$$T(i, ny, Z, ti + 1) = T(i, ny, Z, ti) * (1 - BI * F4 * BIOT - 5 * F4) + (BI * F4 * BIOT * Tm) + (F4 * (T(i + 1, ny, Z, ti) + T(i - 1, ny, Z, ti) + T(i, ny - 1, Z, ti) + T(i, ny, Z + 1, ti) + T(i, ny, Z - 1, ti)))$$

$$T(nx, 1, Z, ti + 1) = T(nx, 1, Z, ti) * (1 - BI * F4 * BIOT - 5 * F4) + (BI * F4 * BIOT * Tm) + (F4 * (T(nx - 1, 1, Z, ti) + T(nx, 2, Z, ti) + T(nx, 2, Z, ti) + T(nx, 1, Z + 1, ti) + T(nx, 1, Z - 1, ti)))$$

$$T(nx, j, Z, ti + 1) = T(nx, j, Z, ti) * (1 - BI * F4 * BIOT - 5 * F4) + (BI * F4 * BIOT * Tm) + (F4 * (T(nx - 1, j, Z, ti) + T(nx, j + 1, Z, ti) + T(nx, j - 1, Z, ti) + T(nx, j, Z + 1, ti) + T(nx, j, Z - 1, ti)))$$

$$T(i, ny, nz, ti + 1) = T(i, ny, nz, ti) * (1 - BO * F5 * BIOT1 - 4 * F5) + (BO * F5 * BIOT1 * Tm) + (F5 * (T(i + 1, ny, nz, ti) + T(i - 1, ny, nz, ti) + T(i, ny - 1, nz, ti) + T(i, ny, nz - 1, ti)))$$

$$T(nx, j, nz, ti + 1) = T(nx, j, nz, ti) * (1 - BO * F5 * BIOT1 - 4 * F5) + (BO * F5 * BIOT1 * Tm) + (F5 * (T(nx - 1, j, nz, ti) + T(nx, j + 1, nz, ti) + T(nx, j - 1, nz, ti) + T(nx, j, nz - 1, ti)))$$

$$T(nx, ny, Z, ti + 1) = T(nx, ny, Z, ti) * (1 - BO * F5 * BIOT1 - 4 * F5) + (BO * F5 * BIOT1 * Tm) + (F5 * (T(nx - 1, ny, Z, ti) + T(nx, ny - 1, Z, ti) + T(nx, ny, Z + 1, ti) + T(nx, ny, Z - 1, ti)))$$

'Proceso iterativo para determinar la temperatura en los nodos internos

$$T(i, j, Z, t_i + 1) = (1 - 2 * F1 - 2 * F2 - 2 * F3) * T(i, j, Z, t_i) + F1 * (T(i + 1, j, Z, t_i) + T(i - 1, j, Z, t_i)) + F2 * (T(i, j + 1, Z, t_i) + T(i, j - 1, Z, t_i)) + F3 * (T(i, j, Z + 1, t_i) + T(i, j, Z - 1, t_i))$$

$$T(i, j, 1, t_i + 1) = (1 - 2 * F1 - 2 * F2 - 2 * F3) * T(i, j, 1, t_i) + F1 * (T(i + 1, j, 1, t_i) + T(i - 1, j, 1, t_i)) + F2 * (T(i, j + 1, 1, t_i) + T(i, j - 1, 1, t_i)) + F3 * (T(i, j, 2, t_i) + T(i, j, 2, t_i))$$

$$T(1, j, Z, t_i + 1) = (1 - 2 * F1 - 2 * F2 - 2 * F3) * T(1, j, Z, t_i) + F1 * (T(2, j, Z, t_i) + T(2, j, Z, t_i)) + F2 * (T(1, j + 1, Z, t_i) + T(1, j - 1, Z, t_i)) + F3 * (T(1, j, Z + 1, t_i) + T(1, j, Z - 1, t_i))$$

$$T(i, 1, 1, t_i + 1) = (1 - 2 * F1 - 2 * F2 - 2 * F3) * T(i, 1, 1, t_i) + F1 * (T(i + 1, 1, 1, t_i) + T(i - 1, 1, 1, t_i)) + F2 * (T(i, 2, 1, t_i) + T(i, 2, 1, t_i)) + F3 * (T(i, 1, 2, t_i) + T(i, 1, 2, t_i))$$

$$T(1, j, 1, t_i + 1) = (1 - 2 * F1 - 2 * F2 - 2 * F3) * T(1, j, 1, t_i) + F1 * (T(2, j, 1, t_i) + T(2, j, 1, t_i)) + F2 * (T(1, j + 1, 1, t_i) + T(1, j - 1, 1, t_i)) + F3 * (T(1, j, 2, t_i) + T(1, j, 2, t_i))$$

$$T(1, 1, Z, t_i + 1) = (1 - 2 * F1 - 2 * F2 - 2 * F3) * T(1, 1, Z, t_i) + F1 * (T(2, 1, Z, t_i) + T(2, 1, Z, t_i)) + F2 * (T(1, 2, Z, t_i) + T(1, 2, Z, t_i)) + F3 * (T(1, 1, Z + 1, t_i) + T(1, 1, Z - 1, t_i))$$

$$T(i, 1, Z, t_i + 1) = (1 - 2 * F1 - 2 * F2 - 2 * F3) * T(i, 1, Z, t_i) + F1 * (T(i + 1, 1, Z, t_i) + T(i - 1, 1, Z, t_i)) + F2 * (T(i, 2, Z, t_i) + T(i, 2, Z, t_i)) + F3 * (T(i, 1, Z + 1, t_i) + T(i, 1, Z - 1, t_i))$$

$$T(1, 1, 1, t_i + 1) = (1 - 2 * F1 - 2 * F2 - 2 * F3) * T(1, 1, 1, t_i) + F1 * (T(2, 1, 1, t_i) + T(2, 1, 1, t_i)) + F2 * (T(1, 2, 1, t_i) + T(1, 2, 1, t_i)) + F3 * (T(1, 1, 2, t_i) + T(1, 1, 2, t_i))$$

Next Z

Next j


```
Next i

Next ti

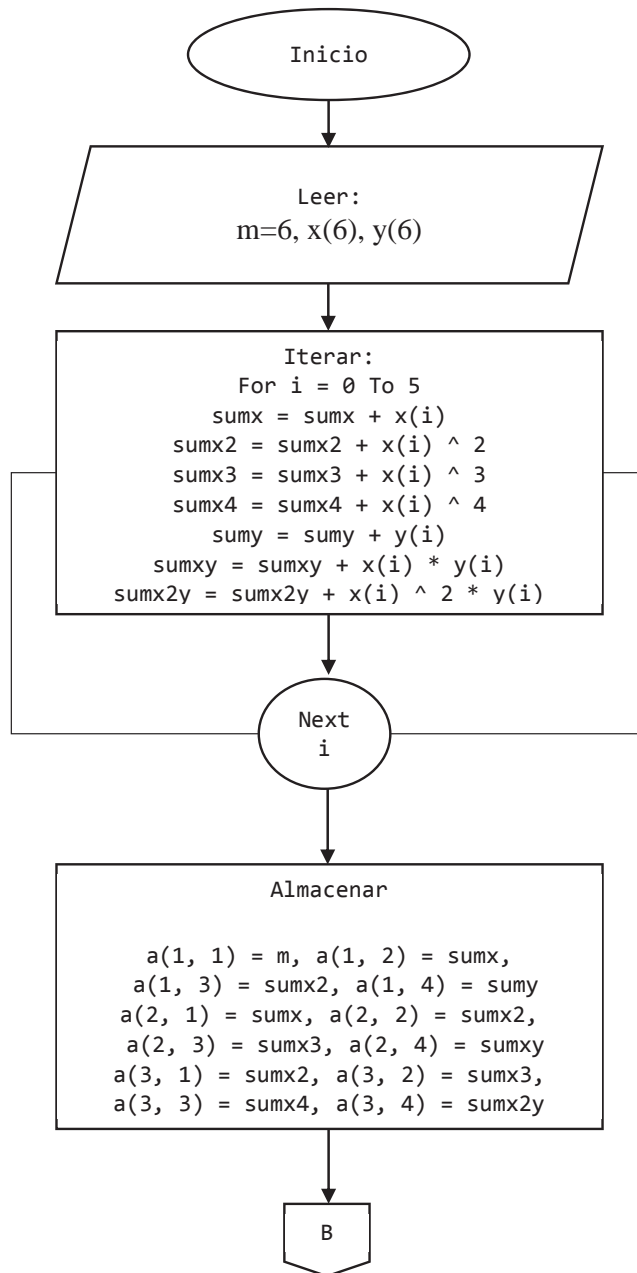
'Impresión de las temperaturas T(i,j,Z,t) en el punto central

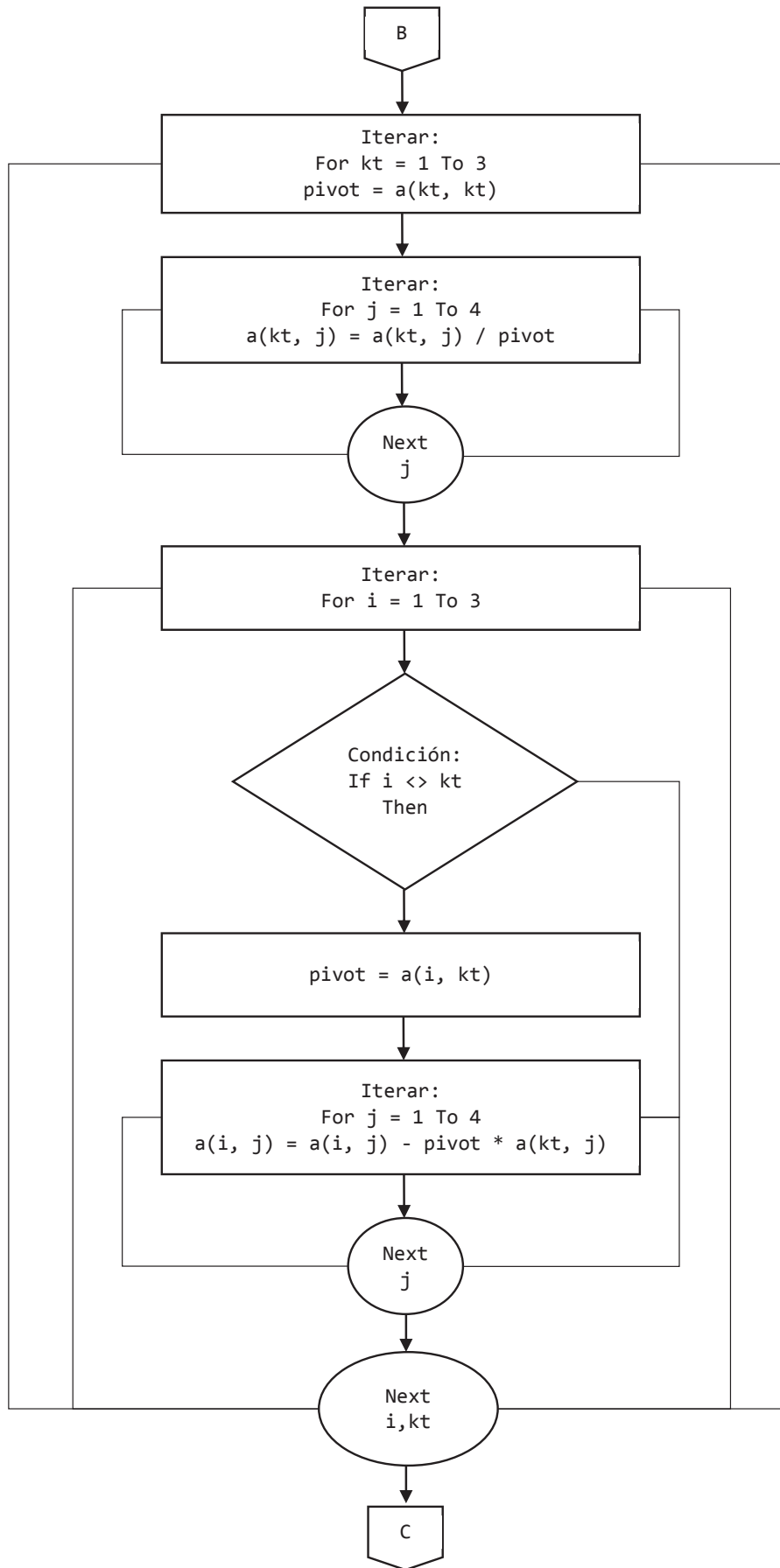
For ti As Integer = 0 To (tpuntos / P)

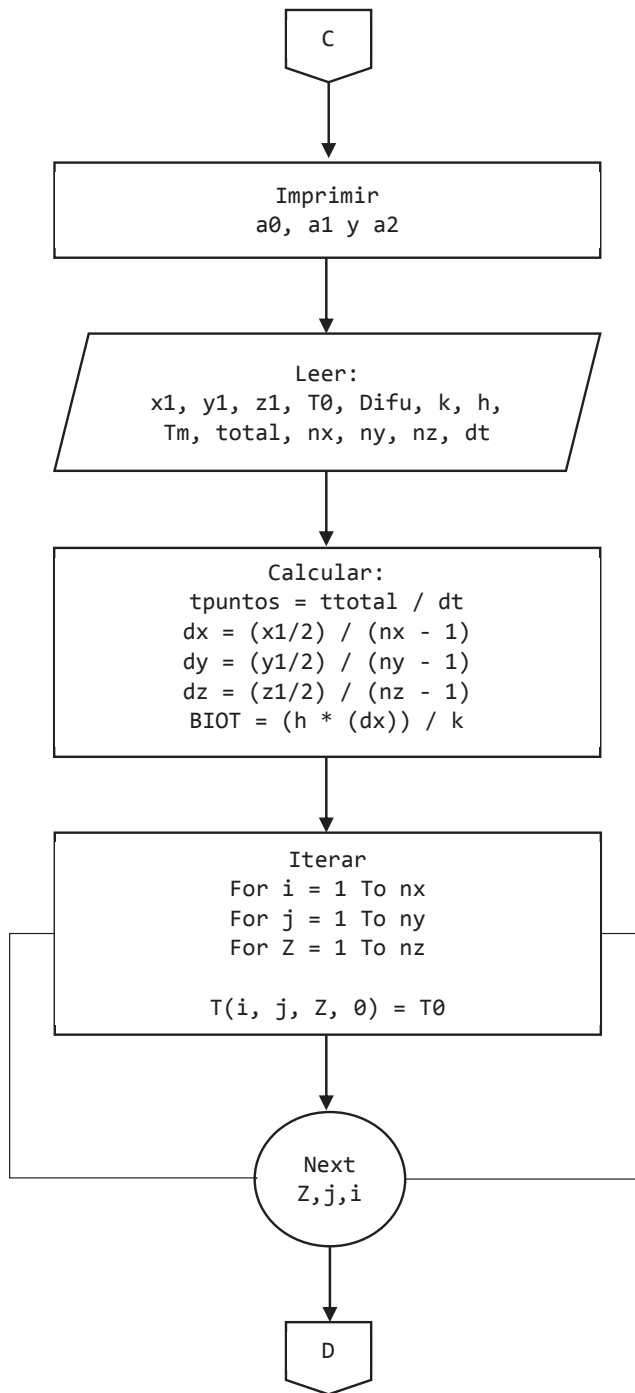
GridV1.Item(0, ti).Value = (ti * dt * P)
GridV1.Item(1, ti).Value = Format(T(1, 1, 1, ti * P), "#.###")

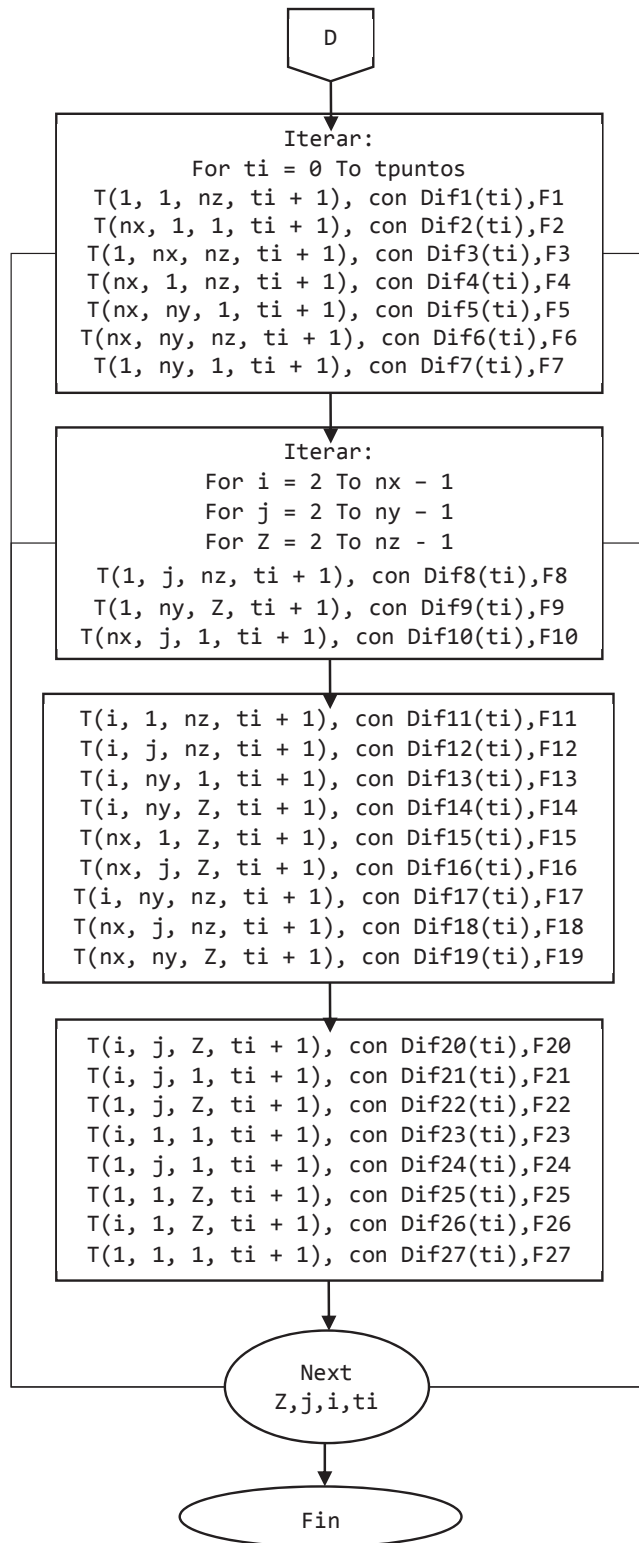
Next ti
```

ANEXO VI: Diagrama de flujo de la aplicación computacional para simular la transferencia de calor mediante diferencias finitas explícitas en 3D con difusividad térmica variable









ANEXO VII: Códigos de programación en Visual Basic® – 2013 del método de diferencias finitas explícitas para simular la transferencia de calor de un cubo en tres dimensiones (3D) con propiedades térmicas variables

```
'AJUSTE CUADRÁTICO DE DIFUSIVIDAD TÉRMICA V/S TEMPERATURA
```

```
Dim x(10000), y(10000), a(10, 10), m, sumx, sumx2, sumx3, sumx4, sumy, sumxy,  
sumx2y, pivot, ao, a1, a2 As Double
```

```
'LEER DATOS
```

```
m = 6
```

```
For i As Integer = 0 To 5
```

```
x(i) = GridV2.Item(0, i).Value
```

```
y(i) = (GridV2.Item(1, i).Value) * 0.0000001
```

```
Next i
```

```
'Cálculo de parámetros
```

```
For i = 0 To 5
```

```
sumx = sumx + x(i)
```

```
sumx2 = sumx2 + x(i) ^ 2
```

```
sumx3 = sumx3 + x(i) ^ 3
```

```
sumx4 = sumx4 + x(i) ^ 4
```

```
sumy = sumy + y(i)
```

```
sumxy = sumxy + x(i) * y(i)
```

```
sumx2y = sumx2y + x(i) ^ 2 * y(i)
```

```
Next i
```

'Almacenamiento de datos en forma de matriz

a(1, 1) = m

a(1, 2) = sumx

a(1, 3) = sumx2

a(1, 4) = sumy

a(2, 1) = sumx

a(2, 2) = sumx2

a(2, 3) = sumx3

a(2, 4) = sumxy

a(3, 1) = sumx2

a(3, 2) = sumx3

a(3, 3) = sumx4

a(3, 4) = sumx2y

'Subrutina de Gauss Jordan

For kt = 1 To 3

pivot = a(kt, kt)

For j = 1 To 4

a(kt, j) = a(kt, j) / pivot

Next j

For i = 1 To 3

If i <> kt Then

```
pivot = a(i, kt)
```

```
For j = 1 To 4
```

```
a(i, j) = a(i, j) - pivot * a(kt, j)
```

```
Next j
```

```
End If
```

```
Next i
```

```
Next kt
```

```
'Impresión de datos
```

```
ao = a(1, 4)
```

```
a1 = a(2, 4)
```

```
a2 = a(3, 4)
```

```
Dim Dif1(10000), Dif2(10000), Dif3(10000), Dif4(10000), Dif5(10000),  
Dif6(10000), Dif7(10000), Dif8(10000), Dif9(10000), Dif10(10000), Dif11(10000),  
Dif12(10000), Dif13(10000), Dif14(10000), Dif15(10000), Dif16(10000),  
Dif17(10000), Dif18(10000), Dif19(10000), Dif20(10000), Dif21(10000),  
Dif22(10000), Dif23(10000), Dif24(10000), Dif25(10000), Dif26(10000),  
Dif27(10000), T(20, 20, 20, 10000), P, F1, F2, F3, F4, F5, F6, F7, F8, F9, F10,  
F11, F12, F13, F14, F15, F16, F17, F18, F19, F20, F21, F22, F23, F24, F25, F26,  
F27, BIOT, BIOT1, BIOT2, BI, BO, BU, tpuntos, tttotal, dx, dy, dz, Difu, x1, y1,  
z1, T0, Tm, h, k, nx, ny, nz, dt As Double
```

```
'LEER DATOS
```

```
x1 = TextBox47.Text / 2 'Mitad de la dimensión en x
```

```
y1 = TextBox46.Text / 2 'Mitad de la dimensión en y
```



```

z1 = TextBox45.Text / 2 'Mitad de la dimensión en z
T0 = TextBox44.Text 'Temperatura inicial
k = TextBox42.Text 'Conductividad térmica
h = TextBox41.Text 'Coeficiente de transferencia de calor
Tm = TextBox40.Text 'Temperatura del medio de calentamiento
ttotal = TextBox39.Text 'Tiempo total del tratamiento
nx = TextBox38.Text 'Nodos totales en el eje x
ny = TextBox37.Text 'Nodos totales en el eje y
nz = TextBox36.Text 'Nodos totales en el eje z
dt = TextBox35.Text 'Diferencial de tiempo

tpuntos = ttotal / dt 'Cálculo de los puntos totales

dx = (x1) / (nx - 1) 'Cálculo del diferencial de espacio en x
dy = (y1) / (ny - 1) 'Cálculo del diferencial de espacio en y
dz = (z1) / (nz - 1) 'Cálculo del diferencial de espacio en z

'Parámetros para los nodos externos

BIOT = (h * (dx)) / k
BIOT1 = (h * (dx)) / k
BIOT2 = (h * (dx)) / k

'Valores para multiplicar a los nodos con (h)

BI = 1
BO = 2
BU = 3

'Parámetro para la impresión de valores por segundo

P = 1 / dt

```

'Creación de la cuadrícula de datos

```
GridV3.Rows.Clear()  
GridV3.ColumnCount = 21  
GridV3.Columns(0).HeaderText = "Tiempo (s)"  
GridV3.Columns(1).HeaderText = "Temp simulación diferencias finitas (°C)"
```

```
For xp = 0 To (tpuntos / P)
```

```
GridV1.Rows.Add(X.ToString)
```

```
Next xp
```

'Proceso iterativo para asignar a todos los nodos generados la temperatura inicial en el segundo cero

```
For i As Integer = 1 To nx  
    For j As Integer = 1 To ny  
        For Z As Integer = 1 To nz  
            T(i, j, Z, 0) = T0  
        Next Z  
    Next j  
Next i
```

'Proceso iterativo para determinar la temperatura en los nodos externos fijos con difusividad térmica variable

```
For ti As Integer = 0 To tpuntos
```

```
Dif1(ti) = (a2 * T(1, 1, nz, ti) ^ 2) + a1 * T(1, 1, nz, ti) + ao  
F1 = (dt * Dif1(ti)) / ((dx) ^ 2 / 2)
```

```
Dif2(ti) = (a2 * T(nx, 1, 1, ti) ^ 2) + a1 * T(nx, 1, 1, ti) + ao
```

$$F2 = (dt * Dif2(ti)) / ((dx) ^ 2 / 2)$$

$$Dif3(ti) = (a2 * T(1, ny, nz, ti) ^ 2) + a1 * T(1, ny, nz, ti) + ao$$

$$F3 = (dt * Dif3(ti)) / ((dx) ^ 2 / 2)$$

$$Dif4(ti) = (a2 * T(nx, 1, nz, ti) ^ 2) + a1 * T(nx, 1, nz, ti) + ao$$

$$F4 = (dt * Dif4(ti)) / ((dx) ^ 2 / 2)$$

$$Dif5(ti) = (a2 * T(nx, ny, 1, ti) ^ 2) + a1 * T(nx, ny, 1, ti) + ao$$

$$F5 = (dt * Dif5(ti)) / ((dx) ^ 2 / 2)$$

$$Dif6(ti) = (a2 * T(nx, ny, nz, ti) ^ 2) + a1 * T(nx, ny, nz, ti) + ao$$

$$F6 = (dt * Dif6(ti)) / ((dx) ^ 2 / 2)$$

$$Dif7(ti) = (a2 * T(1, ny, 1, ti) ^ 2) + a1 * T(1, ny, 1, ti) + ao$$

$$F7 = (dt * Dif7(ti)) / ((dx) ^ 2 / 2)$$

$$T(1, 1, nz, ti + 1) = (T(1, 1, nz, ti) * (1 - BI * F1 * BIOT - 5 * F1)) + (BI * F1 * BIOT * Tm) + (F1 * (T(2, 1, nz, ti) + T(2, 1, nz, ti) + T(1, 2, nz, ti) + T(1, 2, nz, ti) + T(1, 1, nz - 1, ti)))$$

$$T(nx, 1, 1, ti + 1) = T(nx, 1, 1, ti) * (1 - BI * F2 * BIOT - 5 * F2) + (BI * F2 * BIOT * Tm) + (F2 * (T(nx - 1, 1, 1, ti) + T(nx, 2, 1, ti) + T(nx, 2, 1, ti) + T(nx, 2, nz, ti) + T(nx, 1, 2, ti)))$$

$$T(1, nx, nz, ti + 1) = T(1, ny, nz, ti) * (1 - BO * F3 * BIOT - 4 * F3) + (BO * F3 * BIOT1 * Tm) + (F3 * (T(2, ny, nz, ti) + T(2, ny, nz, ti) + T(1, ny - 1, nz, ti) + T(1, ny, nz - 1, ti)))$$

$$T(nx, 1, nz, ti + 1) = T(nx, 1, nz, ti) * (1 - BO * F4 * BIOT1 - 4 * F4) + (BO * F4 * BIOT1 * Tm) + (F4 * (T(nx - 1, 1, nz, ti) + T(nx, 2, nz, ti) + T(nx, 2, nz, ti) + T(nx, 1, nz - 1, ti)))$$

$$T(n_x, n_y, 1, t_i + 1) = T(n_x, n_y, 1, t_i) * (1 - B_0 * F_5 * BIOT_1 - 4 * F_5) + (B_0 * F_5 * BIOT_1 * T_m) + (F_5 * (T(n_x - 1, n_y, 1, t_i) + T(n_x, n_y - 1, n_z, t_i) + T(n_x, n_y, 2, t_i) + T(n_x, n_y, 2, t_i)))$$

$$T(n_x, n_y, n_z, t_i + 1) = T(n_x, n_y, n_z, t_i) * (1 - B_U * F_6 * BIOT_2 - 3 * F_6) + (B_U * F_6 * BIOT_2 * T_m) + (F_6 * (T(n_x - 1, n_y, n_z, t_i) + T(n_x, n_y - 1, n_z, t_i) + T(n_x, n_y, n_z - 1, t_i)))$$

$$T(1, n_y, 1, t_i + 1) = T(1, n_y, 1, t_i) * (1 - B_I * F_7 * BIOT - 5 * F_7) + (B_I * F_7 * BIOT * T_m) + (F_7 * (T(2, n_y, 1, t_i) + T(2, n_y, 1, t_i) + T(1, n_y - 1, 1, t_i) + T(1, n_y, 2, t_i) + T(1, n_y, 2, t_i)))$$

'Proceso iterativo para determinar la temperatura en los nodos externos
movibles con difusividad térmica variable

For i As Integer = 2 To n_x - 1

 For j As Integer = 2 To n_y - 1

 For Z As Integer = 2 To n_z - 1

$$Dif_8(t_i) = (a_2 * T(1, j, n_z, t_i) ^ 2) + a_1 * T(1, j, n_z, t_i) + a_0$$

$$F_8 = (dt * Dif_8(t_i)) / ((dx) ^ 2 / 2)$$

$$Dif_9(t_i) = (a_2 * T(1, n_y, Z, t_i) ^ 2) + a_1 * T(1, n_y, Z, t_i) + a_0$$

$$F_9 = (dt * Dif_9(t_i)) / ((dx) ^ 2 / 2)$$

$$Dif_{10}(t_i) = (a_2 * T(n_x, j, 1, t_i) ^ 2) + a_1 * T(n_x, j, 1, t_i) + a_0$$

$$F_{10} = (dt * Dif_{10}(t_i)) / ((dx) ^ 2 / 2)$$

$$Dif_{11}(t_i) = (a_2 * T(i, 1, n_z, t_i) ^ 2) + a_1 * T(i, 1, n_z, t_i) + a_0$$

$$F_{11} = (dt * Dif_{11}(t_i)) / ((dx) ^ 2 / 2)$$

$$\text{Dif12}(\text{ti}) = (\text{a2} * \text{T}(\text{i}, \text{j}, \text{nz}, \text{ti}) ^ 2) + \text{a1} * \text{T}(\text{i}, \text{j}, \text{nz}, \text{ti}) + \text{ao}$$

$$\text{F12} = (\text{dt} * \text{Dif12}(\text{ti})) / ((\text{dx}) ^ 2 / 2)$$

$$\text{Dif13}(\text{ti}) = (\text{a2} * \text{T}(\text{i}, \text{ny}, 1, \text{ti}) ^ 2) + \text{a1} * \text{T}(\text{i}, \text{ny}, 1, \text{ti}) + \text{ao}$$

$$\text{F13} = (\text{dt} * \text{Dif13}(\text{ti})) / ((\text{dx}) ^ 2 / 2)$$

$$\text{Dif14}(\text{ti}) = (\text{a2} * \text{T}(\text{i}, \text{ny}, \text{Z}, \text{ti}) ^ 2) + \text{a1} * \text{T}(\text{i}, \text{ny}, \text{Z}, \text{ti}) + \text{ao}$$

$$\text{F14} = (\text{dt} * \text{Dif14}(\text{ti})) / ((\text{dx}) ^ 2 / 2)$$

$$\text{Dif15}(\text{ti}) = (\text{a2} * \text{T}(\text{nx}, 1, \text{Z}, \text{ti}) ^ 2) + \text{a1} * \text{T}(\text{nx}, 1, \text{Z}, \text{ti}) + \text{ao}$$

$$\text{F15} = (\text{dt} * \text{Dif15}(\text{ti})) / ((\text{dx}) ^ 2 / 2)$$

$$\text{Dif16}(\text{ti}) = (\text{a2} * \text{T}(\text{nx}, \text{j}, \text{Z}, \text{ti}) ^ 2) + \text{a1} * \text{T}(\text{nx}, \text{j}, \text{Z}, \text{ti}) + \text{ao}$$

$$\text{F16} = (\text{dt} * \text{Dif16}(\text{ti})) / ((\text{dx}) ^ 2 / 2)$$

$$\text{Dif17}(\text{ti}) = (\text{a2} * \text{T}(\text{i}, \text{ny}, \text{nz}, \text{ti}) ^ 2) + \text{a1} * \text{T}(\text{i}, \text{ny}, \text{nz}, \text{ti}) + \text{ao}$$

$$\text{F17} = (\text{dt} * \text{Dif17}(\text{ti})) / ((\text{dx}) ^ 2 / 2)$$

$$\text{Dif18}(\text{ti}) = (\text{a2} * \text{T}(\text{nx}, \text{j}, \text{nz}, \text{ti}) ^ 2) + \text{a1} * \text{T}(\text{nx}, \text{j}, \text{nz}, \text{ti}) + \text{ao}$$

$$\text{F18} = (\text{dt} * \text{Dif18}(\text{ti})) / ((\text{dx}) ^ 2 / 2)$$

$$\text{Dif19}(\text{ti}) = (\text{a2} * \text{T}(\text{nx}, \text{ny}, \text{Z}, \text{ti}) ^ 2) + \text{a1} * \text{T}(\text{nx}, \text{ny}, \text{Z}, \text{ti}) + \text{ao}$$

$$\text{F19} = (\text{dt} * \text{Dif19}(\text{ti})) / ((\text{dx}) ^ 2 / 2)$$

$$\text{Dif20}(\text{ti}) = (\text{a2} * \text{T}(\text{i}, \text{j}, \text{Z}, \text{ti}) ^ 2) + \text{a1} * \text{T}(\text{i}, \text{j}, \text{Z}, \text{ti} + 1) + \text{ao}$$

$$F20 = (dt * Dif20(ti)) / (dx) ^ 2$$

$$Dif21(ti) = (a2 * T(i, j, 1, ti) ^ 2) + a1 * T(i, j, 1, ti) + ao$$

$$F21 = (dt * Dif21(ti)) / (dx) ^ 2$$

$$Dif22(ti) = (a2 * T(1, j, Z, ti) ^ 2) + a1 * T(1, j, Z, ti) + ao$$

$$F22 = (dt * Dif22(ti)) / (dx) ^ 2$$

$$Dif23(ti) = (a2 * T(i, 1, 1, ti) ^ 2) + a1 * T(i, 1, 1, ti) + ao$$

$$F23 = (dt * Dif23(ti)) / (dx) ^ 2$$

$$Dif24(ti) = (a2 * T(1, j, 1, ti) ^ 2) + a1 * T(1, j, 1, ti) + ao$$

$$F24 = (dt * Dif24(ti)) / (dx) ^ 2$$

$$Dif25(ti) = (a2 * T(1, 1, Z, ti) ^ 2) + a1 * T(1, 1, Z, ti) + ao$$

$$F25 = (dt * Dif25(ti)) / (dx) ^ 2$$

$$Dif26(ti) = (a2 * T(i, 1, Z, ti) ^ 2) + a1 * T(i, 1, Z, ti) + ao$$

$$F26 = (dt * Dif26(ti)) / (dx) ^ 2$$

$$Dif27(ti) = (a2 * T(1, 1, 1, ti) ^ 2) + a1 * T(1, 1, 1, ti) + ao$$

$$F27 = (dt * Dif27(ti)) / (dx) ^ 2$$

$$T(1, j, nz, ti + 1) = T(1, j, nz, ti) * (1 - BI * F8 * BIOT - 5 * F8) + (BI * F8 * BIOT * Tm) + (F8 * (T(2, j, nz, ti) + T(2, j, nz, ti) + T(1, j + 1, nz, ti) + T(1, j - 1, nz, ti) + T(1, j, nz - 1, ti)))$$

$$T(1, ny, Z, ti + 1) = T(1, ny, Z, ti) * (1 - BI * F9 * BIOT - 5 * F9) + (BI * F9 * BIOT * Tm) + (F9 * (T(2, ny, Z, ti) + T(2, ny, Z, ti) + T(1, ny - 1, Z, ti) + T(1, ny, Z + 1, ti) + T(1, ny, Z - 1, ti)))$$

$$T(nx, j, 1, ti + 1) = T(nx, j, 1, ti) * (1 - BI * F10 * BIOT - 5 * F10) + (BI * F10 * BIOT * Tm) + (F10 * (T(nx - 1, j, 1, ti) + T(nx, j + 1, 1, ti) + T(nx, j - 1, 1, ti) + T(nx, j, 2, ti) + T(nx, j, 2, ti)))$$

$$T(i, 1, nz, ti + 1) = T(i, 1, nz, ti) * (1 - BI * F11 * BIOT - 5 * F11) + (BI * F11 * BIOT * Tm) + (F11 * (T(i + 1, 1, nz, ti) + T(i - 1, 1, nz, ti) + T(i, 2, nz, ti) + T(i, 2, nz, ti) + T(i, 1, nz - 1, ti)))$$

$$T(i, j, nz, ti + 1) = T(i, j, nz, ti) * (1 - BI * F12 * BIOT - 5 * F12) + (BI * F12 * BIOT * Tm) + (F12 * (T(i + 1, j, nz, ti) + T(i - 1, j, nz, ti) + T(i, j + 1, nz, ti) + T(i, j - 1, nz, ti) + T(i, j, nz - 1, ti)))$$

$$T(i, ny, 1, ti + 1) = T(i, ny, 1, ti) * (1 - BI * F13 * BIOT - 5 * F13) + (BI * F13 * BIOT * Tm) + (F13 * (T(i + 1, ny, 1, ti) + T(i - 1, ny, 1, ti) + T(i, ny - 1, 1, ti) + T(i, ny, 2, ti) + T(i, ny, 2, ti)))$$

$$T(i, ny, Z, ti + 1) = T(i, ny, Z, ti) * (1 - BI * F14 * BIOT - 5 * F14) + (BI * F14 * BIOT * Tm) + (F14 * (T(i + 1, ny, Z, ti) + T(i - 1, ny, Z, ti) + T(i, ny - 1, Z, ti) + T(i, ny, Z + 1, ti) + T(i, ny, Z - 1, ti)))$$

$$T(nx, 1, Z, ti + 1) = T(nx, 1, Z, ti) * (1 - BI * F15 * BIOT - 5 * F15) + (BI * F15 * BIOT * Tm) + (F15 * (T(nx - 1, 1, Z, ti) + T(nx, 2, Z, ti) + T(nx, 2, Z, ti) + T(nx, 1, Z + 1, ti) + T(nx, 1, Z - 1, ti)))$$

$$T(nx, j, Z, ti + 1) = T(nx, j, Z, ti) * (1 - BI * F16 * BIOT - 5 * F16) + (BI * F16 * BIOT * Tm) + (F16 * (T(nx - 1, j, Z, ti) + T(nx, j + 1, Z, ti) + T(nx, j - 1, Z, ti) + T(nx, j, Z + 1, ti) + T(nx, j, Z - 1, ti)))$$

$$T(i, ny, nz, ti + 1) = T(i, ny, nz, ti) * (1 - BO * F17 * BIOT1 - 4 * F17) + (BO * F17 * BIOT1 * Tm) + (F17 * (T(i + 1, ny, nz, ti) + T(i - 1, ny, nz, ti) + T(i, ny - 1, nz, ti) + T(i, ny, nz - 1, ti)))$$

$$T(nx, j, nz, ti + 1) = T(nx, j, nz, ti) * (1 - BO * F18 * BIOT1 - 4 * F18) + (BO * F18 * BIOT1 * Tm) + (F18 * (T(nx - 1, j, nz, ti) + T(nx, j + 1, nz, ti) + T(nx, j - 1, nz, ti) + T(nx, j, nz - 1, ti)))$$

$$T(nx, ny, Z, ti + 1) = T(nx, ny, Z, ti) * (1 - BO * F19 * BIOT1 - 4 * F19) + (BO * F19 * BIOT1 * Tm) + (F19 * (T(nx - 1, ny, Z, ti) + T(nx, ny - 1, Z, ti) + T(nx, ny, Z + 1, ti) + T(nx, ny, Z - 1, ti)))$$

'Proceso iterativo para determinar la temperatura en los nodos internos con difusividad térmica variable

$$T(i, j, Z, ti + 1) = (1 - 2 * F20 - 2 * F20 - 2 * F20) * T(i, j, Z, ti) + F20 * (T(i + 1, j, Z, ti) + T(i - 1, j, Z, ti)) + F20 * (T(i, j + 1, Z, ti) + T(i, j - 1, Z, ti)) + F20 * (T(i, j, Z + 1, ti) + T(i, j, Z - 1, ti))$$

$$T(i, j, 1, ti + 1) = (1 - 2 * F21 - 2 * F21 - 2 * F21) * T(i, j, 1, ti) + F21 * (T(i + 1, j, 1, ti) + T(i - 1, j, 1, ti)) + F21 * (T(i, j + 1, 1, ti) + T(i, j - 1, 1, ti)) + F21 * (T(i, j, 2, ti) + T(i, j, 2, ti))$$

$$T(1, j, Z, ti + 1) = (1 - 2 * F22 - 2 * F22 - 2 * F22) * T(1, j, Z, ti) + F22 * (T(2, j, Z, ti) + T(2, j, Z, ti)) + F22 * (T(1, j + 1, Z, ti) + T(1, j - 1, Z, ti)) + F22 * (T(1, j, Z + 1, ti) + T(1, j, Z - 1, ti))$$

$$T(i, 1, 1, ti + 1) = (1 - 2 * F23 - 2 * F23 - 2 * F23) * T(i, 1, 1, ti) + F23 * (T(i + 1, 1, 1, ti) + T(i - 1, 1, 1, ti)) + F23 * (T(i, 2, 1, ti) + T(i, 2, 1, ti)) + F23 * (T(i, 1, 2, ti) + T(i, 1, 2, ti))$$

$$T(1, j, 1, ti + 1) = (1 - 2 * F24 - 2 * F24 - 2 * F24) * T(1, j, 1, ti) + F24 * (T(2, j, 1, ti) + T(2, j, 1, ti)) + F24 * (T(1, j + 1, 1, ti) + T(1, j - 1, 1, ti)) + F24 * (T(1, j, 2, ti) + T(1, j, 2, ti))$$


```
T(1, 1, Z, ti + 1) = (1 - 2 * F25 - 2 * F25 - 2 * F25) * T(1, 1, Z, ti) + F25 *
(T(2, 1, Z, ti) + T(2, 1, Z, ti)) + F25 * (T(1, 2, Z, ti) + T(1, 2, Z, ti)) +
F25 * (T(1, 1, Z + 1, ti) + T(1, 1, Z - 1, ti))
```

```
T(i, 1, Z, ti + 1) = (1 - 2 * F26 - 2 * F26 - 2 * F26) * T(i, 1, Z, ti) + F26 *
(T(i + 1, 1, Z, ti) + T(i - 1, 1, Z, ti)) + F26 * (T(i, 2, Z, ti) + T(i, 2, Z,
ti)) + F26 * (T(i, 1, Z + 1, ti) + T(i, 1, Z - 1, ti))
```

```
T(1, 1, 1, ti + 1) = (1 - 2 * F27 - 2 * F27 - 2 * F27) * T(1, 1, 1, ti) + F27 *
(T(2, 1, 1, ti) + T(2, 1, 1, ti)) + F27 * (T(1, 2, 1, ti) + T(1, 2, 1, ti)) +
F27 * (T(1, 1, 2, ti) + T(1, 1, 2, ti))
```

```
Next Z
```

```
Next j
```

```
Next i
```

```
Next ti
```

```
'Impresión de las temperaturas T(i,j,Z,t) hasta 20 puntos hacia el exterior
```

```
For ti As Integer = 0 To (tpuntos / P)
```

```
For tu As Integer = 1 To nx
```

```
GridV3.Item(0, ti).Value = (ti * dt * P)
```

```
GridV3.Item(tu, ti).Value = Format(T(tu, 1, 1, ti * P), "#.###")
```

```
Next tu
```

```
Next ti
```

ANEXO VIII: Historial de temperaturas experimentales y simuladas durante el escaldado de cubos de loche de 1x1x1 cm

Tiempo (s)	Escaldado a 70°C	Simulación a 70°C	Escaldado a 80°C	Simulación a 80°C	Escaldado a 90°C	Simulación a 90°C
0	24.40	24.40	23.82	23.82	24.10	24.10
1	24.45	24.40	23.87	23.82	25.00	24.10
2	26.23	24.40	25.67	23.82	26.40	24.10
3	25.67	24.40	25.19	23.82	27.50	24.10
4	27.68	24.40	27.34	23.82	28.00	24.10
5	29.01	24.41	28.85	23.83	29.76	24.11
6	29.32	24.42	29.35	23.85	30.55	24.15
7	30.02	24.46	30.27	23.90	31.77	24.22
8	31.32	24.53	31.81	24.00	33.60	24.36
9	31.64	24.65	32.36	24.16	34.45	24.57
10	32.66	24.82	33.62	24.38	36.01	24.89
11	33.38	25.05	34.58	24.69	37.26	25.30
12	33.97	25.34	35.41	25.08	38.39	25.83
13	34.82	25.70	36.51	25.56	39.77	26.47
14	35.69	26.12	37.61	26.12	41.16	27.21
15	36.85	26.60	39.02	26.75	42.84	28.06
16	37.62	27.15	40.02	27.47	44.12	29.00
17	38.69	27.74	41.34	28.25	45.70	30.01
18	39.40	28.38	42.28	29.09	46.90	31.10
19	40.00	29.07	43.11	29.98	47.98	32.25
20	40.80	29.79	44.14	30.92	49.25	33.45
21	41.64	30.54	45.20	31.89	50.54	34.70
22	42.25	31.32	46.03	32.90	51.60	35.97
23	43.02	32.12	47.01	33.92	52.79	37.27
24	43.89	32.94	48.09	34.97	54.08	38.58
25	44.44	33.76	48.84	36.03	55.03	39.90
26	45.23	34.60	49.82	37.09	56.21	41.23
27	45.79	35.44	50.57	38.16	57.14	42.55
28	46.69	36.28	51.66	39.23	58.41	43.86
29	47.19	37.12	52.34	40.29	59.25	45.17
30	47.89	37.95	53.21	41.35	60.28	46.45
31	48.73	38.78	54.22	42.39	61.44	47.72
32	49.33	39.60	54.99	43.42	62.36	48.97
33	49.93	40.41	55.74	44.44	63.25	50.20
34	50.54	41.20	56.50	45.44	64.15	51.41
35	51.01	41.99	57.12	46.42	64.90	52.58
36	51.72	42.76	57.98	47.39	65.87	53.74
37	52.13	43.52	58.52	48.33	66.53	54.86

38	52.61	44.27	59.13	49.26	67.25	55.96
39	53.03	44.99	59.68	50.16	67.91	57.03
40	53.67	45.71	60.44	51.04	68.77	58.07
41	54.10	46.40	60.99	51.91	69.41	59.08
42	54.55	47.08	61.55	52.75	70.07	60.07
43	54.85	47.75	61.96	53.57	70.56	61.03
44	55.34	48.40	62.56	54.36	71.24	61.96
45	55.88	49.03	63.20	55.14	71.96	62.86
46	56.18	49.64	63.60	55.90	72.43	63.74
47	56.54	50.24	64.06	56.63	72.96	64.59
48	56.85	50.83	64.46	57.35	73.43	65.41
49	57.23	51.40	64.92	58.04	73.96	66.21
50	57.58	51.95	65.36	58.71	74.45	66.98
51	58.06	52.49	65.93	59.37	75.08	67.73
52	58.28	53.01	66.22	60.01	75.42	68.46
53	58.55	53.52	66.57	60.62	75.83	69.16
54	58.87	54.01	66.97	61.22	76.27	69.84
55	59.21	54.49	67.37	61.80	76.72	70.50
56	59.54	54.96	67.77	62.37	77.17	71.14
57	59.87	55.41	68.16	62.91	77.60	71.76
58	60.08	55.85	68.43	63.44	77.91	72.35
59	60.35	56.27	68.77	63.96	78.28	72.93
60	60.67	56.69	69.14	64.46	78.69	73.49
61	61.00	57.09	69.53	64.94	79.12	74.03
62	61.24	57.48	69.83	65.41	79.45	74.56
63	61.40	57.86	70.04	65.86	79.69	75.06
64	61.67	58.22	70.36	66.30	80.04	75.55
65	61.87	58.58	70.61	66.73	80.32	76.03
66	62.14	58.93	70.92	67.14	80.65	76.49
67	62.40	59.26	71.23	67.54	80.99	76.93
68	62.54	59.59	71.42	67.93	81.20	77.36
69	62.78	59.90	71.70	68.31	81.50	77.77
70	62.94	60.21	71.90	68.67	81.72	78.17
71	63.19	60.51	72.19	69.02	82.02	78.56
72	63.41	60.79	72.44	69.37	82.30	78.94
73	63.55	61.07	72.62	69.70	82.50	79.30
74	63.70	61.34	72.80	70.02	82.69	79.65
75	63.89	61.61	73.03	70.33	82.93	79.99
76	64.10	61.86	73.27	70.63	83.19	80.32
77	64.29	62.11	73.49	70.92	83.42	80.64
78	64.44	62.35	73.67	71.21	83.62	80.94
79	64.55	62.58	73.81	71.48	83.77	81.24
80	64.69	62.80	73.97	71.75	83.94	81.53
81	64.88	63.02	74.20	72.00	84.18	81.81
82	65.04	63.23	74.38	72.25	84.37	82.07
83	65.17	63.44	74.53	72.49	84.53	82.33

84	65.33	63.64	74.72	72.73	84.72	82.58
85	65.48	63.83	74.89	72.95	84.91	82.83
86	65.61	64.02	75.04	73.17	85.06	83.06
87	65.71	64.20	75.17	73.39	85.20	83.29
88	65.89	64.38	75.36	73.59	85.40	83.51
89	66.03	64.55	75.52	73.79	85.57	83.72
90	66.12	64.71	75.64	73.99	85.69	83.93
91	66.26	64.87	75.80	74.17	85.85	84.13
92	66.36	65.03	75.91	74.35	85.97	84.32
93	66.53	65.18	76.09	74.53	86.16	84.50
94	66.64	65.33	76.22	74.70	86.29	84.68
95	66.75	65.47	76.35	74.87	86.42	84.86
96	66.87	65.60	76.48	75.03	86.56	85.03
97	66.96	65.74	76.59	75.18	86.67	85.19
98	67.10	65.87	76.74	75.33	86.82	85.35
99	67.16	65.99	76.82	75.48	86.90	85.50
100	67.27	66.11	76.94	75.62	87.03	85.64
101	67.38	66.23	77.06	75.75	87.15	85.79
102	67.48	66.35	77.17	75.89	87.27	85.92
103	67.55	66.46	77.25	76.01	87.35	86.06
104	67.64	66.56	77.36	76.14	87.45	86.19
105	67.75	66.67	77.47	76.26	87.57	86.31
106	67.82	66.77	77.56	76.37	87.65	86.43
107	67.88	66.87	77.63	76.49	87.73	86.55
108	68.00	66.96	77.75	76.60	87.85	86.66
109	68.06	67.05	77.82	76.70	87.92	86.77
110	68.15	67.14	77.92	76.80	88.02	86.88
111	68.21	67.23	78.00	76.90	88.10	86.98
112	68.28	67.31	78.07	77.00	88.17	87.08
113	68.36	67.40	78.16	77.09	88.26	87.17
114	68.40	67.47	78.21	77.18	88.31	87.26
115	68.46	67.55	78.28	77.27	88.38	87.35
116	68.53	67.63	78.36	77.36	88.46	87.44
117	68.59	67.70	78.42	77.44	88.52	87.52
118	68.65	67.77	78.49	77.52	88.59	87.60
119	68.71	67.83	78.56	77.59	88.66	87.68
120	68.74	67.90	78.59	77.67	88.69	87.76
121	68.78	67.96	78.64	77.74	88.74	87.83
122	68.84	68.03	78.70	77.81	88.80	87.90
123	68.91	68.09	78.78	77.88	88.88	87.97
124	68.95	68.14	78.82	77.95	88.91	88.04
125	68.98	68.20	78.86	78.01	88.95	88.10
126	69.03	68.25	78.91	78.07	89.00	88.16
127	69.04	68.31	78.93	78.13	89.02	88.22
128	69.10	68.36	78.99	78.19	89.09	88.28
129	69.13	68.41	79.02	78.25	89.11	88.34

130	69.19	68.46	79.08	78.30	89.18	88.39
131	69.22	68.50	79.13	78.35	89.22	88.44
132	69.26	68.55	79.17	78.40	89.26	88.49
133	69.31	68.59	79.22	78.45	89.31	88.54
134	69.35	68.63	79.26	78.50	89.35	88.59
135	69.38	68.68	79.30	78.55	89.38	88.64
136	69.43	68.72	79.35	78.59	89.43	88.68
137	69.46	68.76	79.38	78.64	89.46	88.72
138	69.47	68.79	79.40	78.68	89.48	88.77
139	69.51	68.83	79.44	78.72	89.52	88.81
140	69.55	68.86	79.49	78.76	89.57	88.84
141	69.58	68.90	79.51	78.80	89.59	88.88
142	69.58	68.93	79.52	78.84	89.60	88.92
143	69.62	68.96	79.56	78.87	89.64	88.95
144	69.63	69.00	79.57	78.91	89.64	88.99
145	69.66	69.03	79.61	78.94	89.68	89.02
146	69.70	69.06	79.64	78.97	89.72	89.05
147	69.71	69.08	79.66	79.01	89.74	89.08
148	69.75	69.11	79.70	79.04	89.77	89.11
149	69.76	69.14	79.72	79.07	89.79	89.14
150	69.79	69.17	79.75	79.10	89.82	89.17
151	69.81	69.19	79.76	79.12	89.83	89.20
152	69.82	69.22	79.78	79.15	89.84	89.22
153	69.85	69.24	79.81	79.18	89.87	89.25
154	69.87	69.26	79.84	79.20	90.00	89.27
155	69.90	69.28	79.87	79.23	90.00	89.30
156	69.91	69.31	79.88	79.25	90.00	89.32
157	69.92	69.33	79.89	79.27	90.00	89.34
158	69.93	69.35	79.89	79.30	90.00	89.36
159	69.95	69.37	79.89	79.32	90.00	89.38
160	69.97	69.39	79.89	79.34	90.00	89.40
161	69.98	69.40	79.89	79.36	90.00	89.42
162	69.98	69.42	79.89	79.38	90.00	89.44
163	70.00	69.44	79.89	79.40	90.00	89.46
164	70.00	69.46	79.89	79.42	90.00	89.48
165	70.00	69.47	79.89	79.44	90.00	89.50
166	70.00	69.49	79.89	79.45	90.00	89.51
167	70.00	69.51	79.89	79.47	90.00	89.53
168	70.00	69.52	79.89	79.49	90.00	89.54
169	70.00	69.53	79.89	79.50	90.00	89.56
170	70.00	69.55	79.89	79.52	90.00	89.57
171	70.00	69.56	79.89	79.53	90.00	89.59
172	70.00	69.58	79.89	79.55	90.00	89.60
173	70.00	69.59	79.89	79.56	90.00	89.61
174	70.00	69.60	79.89	79.58	90.00	89.63
175	70.00	69.61	79.89	79.59	90.00	89.64

176	70.00	69.62	79.89	79.60	90.00	89.65
177	70.00	69.64	79.89	79.61	90.00	89.66
178	70.00	69.65	79.89	79.63	90.00	89.67
179	70.00	69.66	79.89	79.64	90.00	89.68
180	70.00	69.67	79.89	79.65	90.00	89.69
181	70.00	69.68	79.89	79.66	90.00	89.70
182	70.00	69.69	79.89	79.67	90.00	89.71
183	70.00	69.70	79.89	79.68	90.00	89.72
184	70.00	69.71	79.89	79.69	90.00	89.73
185	70.00	69.72	79.89	79.70	90.00	89.74
186	70.00	69.72	79.89	79.71	90.00	89.75
187	70.00	69.73	79.89	79.72	90.00	89.76
188	70.00	69.74	79.89	79.73	90.00	89.76
189	70.00	69.75	79.89	79.74	90.00	89.77
190	70.00	69.76	79.89	79.74	90.00	89.78
191	70.00	69.76	79.89	79.75	90.00	89.79
192	70.00	69.77	79.89	79.76	90.00	89.79
193	70.00	69.78	79.89	79.77	90.00	89.80
194	70.00	69.78	79.89	79.77	90.00	89.81
195	70.00	69.79	79.89	79.78	90.00	89.81
196	70.00	69.80	79.89	79.79	90.00	89.82
197	70.00	69.80	79.89	79.79	90.00	89.83
198	70.00	69.81	79.89	79.80	90.00	89.83
199	70.00	69.82	79.89	79.81	90.00	89.84
200	70.00	69.82	79.89	79.81	90.00	89.84
201	70.00	69.83	79.89	79.82	90.00	89.85
202	70.00	69.83	79.89	79.82	90.00	89.85
203	70.00	69.84	79.89	79.83	90.00	89.86
204	70.00	69.84	79.89	79.84	90.00	89.86
205	70.00	69.85	79.89	79.84	90.00	89.87
206	70.00	69.85	79.89	79.85	90.00	89.87
207	70.00	69.86	79.89	79.85	90.00	89.87
208	70.00	69.86	79.89	79.85	90.00	89.88
209	70.00	69.86	79.89	79.86	90.00	89.88
210	70.00	69.87	79.89	79.86	90.00	89.89
211	70.00	69.87	79.89	79.87	90.00	89.89
212	70.00	69.88	79.89	79.87	90.00	89.89
213	70.00	69.88	79.89	79.88	90.00	89.90
214	70.00	69.88	79.89	79.88	90.00	89.90
215	70.00	69.89	79.89	79.88	90.00	89.90
216	70.00	69.89	79.89	79.89	90.00	89.91
217	70.00	69.89	79.89	79.89	90.00	89.91
218	70.00	69.90	79.89	79.89	90.00	89.91
219	70.00	69.90	79.89	79.90	90.00	89.92
220	70.00	69.90	79.89	79.90	90.00	89.92
221	70.00	69.91	79.89	79.90	90.00	89.92

222	70.00	69.91	79.89	79.91	90.00	89.92
223	70.00	69.91	79.89	79.91	90.00	89.93
224	70.00	69.91	79.89	79.91	90.00	89.93
225	70.00	69.92	79.89	79.92	90.00	89.93
226	70.00	69.92	79.89	79.92	90.00	89.93
227	70.00	69.92	79.89	79.92	90.00	89.94
228	70.00	69.92	79.89	79.92	90.00	89.94
229	70.00	69.93	79.89	79.93	90.00	89.94
230	70.00	69.93	79.89	79.93	90.00	89.94
231	70.00	69.93	79.89	79.93	90.00	89.94
232	70.00	69.93	79.89	79.93	90.00	89.95
233	70.00	69.94	79.89	79.93	90.00	89.95
234	70.00	69.94	79.89	79.94	90.00	89.95
235	70.00	69.94	79.89	79.94	90.00	89.95
236	70.00	69.94	79.89	79.94	90.00	89.95
237	70.00	69.94	79.89	79.94	90.00	89.95
238	70.00	69.94	79.89	79.94	90.00	89.96
239	70.00	69.95	79.89	79.95	90.00	89.96
240	70.00	69.95	79.89	79.95	90.00	89.96
241	70.00	69.95	79.89	79.95	90.00	89.96
242	70.00	69.95	79.89	79.95	90.00	89.96
243	70.00	69.95	79.89	79.95	90.00	89.96
244	70.00	69.95	79.89	79.95	90.00	89.96
245	70.00	69.96	79.89	79.96	90.00	89.96
246	70.00	69.96	79.89	79.96	90.00	89.97
247	70.00	69.96	79.89	79.96	90.00	89.97
248	70.00	69.96	79.89	79.96	90.00	89.97
249	70.00	69.96	79.89	79.96	90.00	89.97
250	70.00	69.96	79.89	79.96	90.00	89.97
251	70.00	69.96	79.89	79.96	90.00	89.97
252	70.00	69.96	79.89	79.96	90.00	89.97
253	70.00	69.97	79.89	79.97	90.00	89.97
254	70.00	69.97	79.89	79.97	90.00	89.97
255	70.00	69.97	79.89	79.97	90.00	89.97
256	70.00	69.97	79.89	79.97	90.00	89.98
257	70.00	69.97	79.89	79.97	90.00	89.98
258	70.00	69.97	79.89	79.97	90.00	89.98
259	70.00	69.97	79.89	79.97	90.00	89.98
260	70.00	69.97	79.89	79.97	90.00	89.98
261	70.00	69.97	79.89	79.97	90.00	89.98
262	70.00	69.97	79.89	79.97	90.00	89.98
263	70.00	69.97	79.89	79.97	90.00	89.98
264	70.00	69.98	79.89	79.98	90.00	89.98
265	70.00	69.98	79.89	79.98	90.00	89.98
266	70.00	69.98	79.89	79.98	90.00	89.98
267	70.00	69.98	79.89	79.98	90.00	89.98

268	70.00	69.98	79.89	79.98	90.00	89.98
269	70.00	69.98	79.89	79.98	90.00	89.98
270	70.00	69.98	79.89	79.98	90.00	89.98
271	70.00	69.98	79.89	79.98	90.00	89.99
272	70.00	69.98	79.89	79.98	90.00	89.99
273	70.00	69.98	79.89	79.98	90.00	89.99
274	70.00	69.98	79.89	79.98	90.00	89.99
275	70.00	69.98	79.89	79.98	90.00	89.99
276	70.00	69.98	79.89	79.98	90.00	89.99
277	70.00	69.98	79.89	79.98	90.00	89.99
278	70.00	69.98	79.89	79.98	90.00	89.99
279	70.00	69.98	79.89	79.98	90.00	89.99
280	70.00	69.99	79.89	79.99	90.00	89.99
281	70.00	69.99	79.89	79.99	90.00	89.99
282	70.00	69.99	79.89	79.99	90.00	89.99
283	70.00	69.99	79.89	79.99	90.00	89.99
284	70.00	69.99	79.89	79.99	90.00	89.99
285	70.00	69.99	79.89	79.99	90.00	89.99
286	70.00	69.99	79.89	79.99	90.00	89.99
287	70.00	69.99	79.89	79.99	90.00	89.99
288	70.00	69.99	79.89	79.99	90.00	89.99
289	70.00	69.99	79.89	79.99	90.00	89.99
290	70.00	69.99	79.89	79.99	90.00	89.99
291	70.00	69.99	79.89	79.99	90.00	89.99
292	70.00	69.99	79.89	79.99	90.00	89.99
293	70.00	69.99	79.89	79.99	90.00	89.99
294	70.00	69.99	79.89	79.99	90.00	89.99
295	70.00	69.99	79.89	79.99	90.00	89.99
296	70.00	69.99	79.89	79.99	90.00	89.99
297	70.00	69.99	79.89	79.99	90.00	89.99
298	70.00	69.99	79.89	79.99	90.00	89.99
299	70.00	69.99	79.89	79.99	90.00	89.99
300	70.00	69.99	79.89	79.99	90.00	89.99

ANEXO IX: Historial de temperaturas experimentales y simuladas durante el escaldado de cubos de loche de 2x2x2 cm

Tiempo (s)	Escaldado a 70°C	Simulación a 70°C	Escaldado a 80°C	Simulación a 80°C	Escaldado a 90°C	Simulación a 90°C
0	23.00	23.00	22.40	22.40	20.20	20.20
1	23.00	23.00	22.40	22.40	20.20	20.20
2	23.00	23.00	22.40	22.40	20.20	20.20
3	23.00	23.00	22.40	22.40	20.20	20.20
4	23.00	23.00	22.40	22.40	20.20	20.20
5	23.00	23.00	22.40	22.40	20.20	20.20
6	23.00	23.00	22.40	22.40	20.20	20.20
7	23.00	23.00	22.40	22.40	20.20	20.20
8	23.00	23.00	22.40	22.40	20.20	20.20
9	23.00	23.00	22.40	22.40	20.20	20.20
10	23.00	23.00	22.41	22.40	20.20	20.20
11	23.00	23.00	22.41	22.40	20.20	20.20
12	23.00	23.00	22.42	22.40	20.20	20.20
13	23.00	23.00	22.43	22.40	20.21	20.20
14	23.00	23.00	22.44	22.40	20.21	20.20
15	23.00	23.00	22.46	22.40	20.21	20.20
16	23.00	23.00	22.49	22.40	20.22	20.20
17	23.00	23.00	22.52	22.40	20.23	20.20
18	23.00	23.00	22.55	22.40	20.25	20.20
19	23.00	23.00	22.59	22.40	20.26	20.21
20	23.00	23.01	22.64	22.41	20.28	20.21
21	23.01	23.01	22.70	22.41	20.31	20.21
22	23.03	23.01	22.76	22.42	20.34	20.22
23	23.05	23.02	22.83	22.42	20.38	20.23
24	23.07	23.02	22.90	22.43	20.42	20.24
25	23.10	23.03	22.98	22.44	20.46	20.26
26	23.13	23.04	23.07	22.45	20.52	20.27
27	23.16	23.05	23.17	22.47	20.58	20.30
28	23.20	23.07	23.27	22.49	20.64	20.32
29	23.24	23.08	23.38	22.51	20.72	20.35
30	23.29	23.10	23.49	22.54	20.80	20.39
31	23.34	23.13	23.61	22.57	20.89	20.43
32	23.39	23.16	23.74	22.60	20.99	20.48
33	23.45	23.19	23.88	22.65	21.09	20.54
34	23.52	23.22	23.86	22.69	21.20	20.60
35	23.59	23.26	23.76	22.74	21.32	20.67
36	23.67	23.30	23.97	22.80	21.45	20.75
37	23.75	23.35	23.96	22.86	21.59	20.83
38	23.83	23.41	23.88	22.93	21.73	20.92

39	23.92	23.46	23.95	23.01	21.89	21.03
40	24.01	23.53	23.83	23.09	22.05	21.14
41	24.11	23.59	24.58	23.18	21.99	21.25
42	24.22	23.67	24.51	23.27	22.47	21.38
43	24.33	23.75	24.44	23.37	22.05	21.52
44	24.44	23.83	24.42	23.48	22.55	21.66
45	24.56	23.92	24.47	23.60	22.95	21.81
46	24.69	24.01	24.60	23.72	23.45	21.98
47	24.82	24.11	24.77	23.85	23.07	22.15
48	24.95	24.22	24.75	23.98	23.59	22.33
49	25.09	24.33	24.73	24.13	24.11	22.52
50	25.23	24.44	25.29	24.27	24.55	22.71
51	25.38	24.57	25.45	24.43	24.18	22.92
52	25.53	24.69	25.66	24.59	24.73	23.13
53	25.69	24.82	25.77	24.76	24.88	23.35
54	25.85	24.96	25.79	24.94	25.13	23.58
55	26.01	25.10	25.85	25.12	25.59	23.82
56	26.18	25.25	26.45	25.30	25.66	24.06
57	26.35	25.40	26.56	25.50	25.93	24.32
58	26.53	25.55	26.87	25.69	26.50	24.57
59	26.71	25.71	26.95	25.90	26.58	24.84
60	26.89	25.88	27.21	26.11	26.86	25.11
61	27.08	26.05	27.44	26.32	27.15	25.39
62	27.27	26.22	27.57	26.55	27.44	25.68
63	27.46	26.40	27.98	26.77	27.83	25.97
64	27.65	26.58	28.19	27.00	28.12	26.27
65	27.85	26.76	28.41	27.24	28.42	26.57
66	28.05	26.95	28.53	27.48	28.72	26.88
67	28.26	27.14	28.69	27.72	29.22	27.20
68	28.46	27.34	28.92	27.97	29.33	27.52
69	28.67	27.54	29.76	28.22	29.63	27.84
70	28.88	27.74	29.87	28.48	30.04	28.17
71	29.09	27.94	30.18	28.74	30.35	28.51
72	29.31	28.15	30.26	29.00	30.56	28.84
73	29.52	28.36	30.51	29.26	30.97	29.18
74	29.74	28.57	30.90	29.53	31.28	29.53
75	29.96	28.79	31.43	29.81	31.59	29.88
76	30.19	29.01	31.69	30.08	31.90	30.23
77	30.41	29.23	31.86	30.36	32.42	30.58
78	30.64	29.45	32.23	30.64	33.03	30.94
79	30.86	29.68	32.34	30.93	32.84	31.30
80	31.09	29.90	32.72	31.21	33.15	31.67
81	31.32	30.13	32.93	31.50	33.46	32.03
82	31.55	30.36	33.35	31.79	33.87	32.40
83	31.78	30.59	33.57	32.08	34.48	32.77
84	32.01	30.82	33.76	32.37	34.59	33.14

85	32.24	31.06	34.15	32.67	34.79	33.51
86	32.48	31.29	34.41	32.96	35.40	33.89
87	32.71	31.53	34.60	33.26	35.40	34.26
88	32.95	31.77	34.93	33.56	36.00	34.64
89	33.18	32.01	35.14	33.86	36.10	35.01
90	33.42	32.25	35.57	34.16	36.40	35.39
91	33.65	32.49	35.98	34.46	36.70	35.77
92	33.89	32.73	36.12	34.76	37.09	36.15
93	34.12	32.97	36.36	35.06	37.38	36.53
94	34.36	33.21	36.57	35.37	37.77	36.91
95	34.60	33.46	37.05	35.67	38.06	37.29
96	34.83	33.70	37.43	35.97	38.45	37.67
97	35.07	33.94	37.81	36.28	38.73	38.05
98	35.31	34.19	38.13	36.58	39.01	38.43
99	35.54	34.43	38.45	36.89	39.58	38.81
100	35.78	34.68	38.73	37.19	40.05	39.19
101	36.01	34.92	39.02	37.50	40.63	39.57
102	36.25	35.16	39.28	37.80	40.39	39.95
103	36.49	35.41	39.60	38.10	40.66	40.33
104	36.72	35.65	39.86	38.41	41.02	40.71
105	36.95	35.89	40.19	38.71	41.47	41.08
106	37.19	36.14	40.45	39.01	41.63	41.46
107	37.42	36.38	40.77	39.31	42.18	41.83
108	37.65	36.62	41.14	39.61	42.63	42.21
109	37.89	36.86	41.43	39.91	43.07	42.58
110	38.12	37.11	41.73	40.21	43.61	42.95
111	38.35	37.35	41.99	40.51	43.75	43.32
112	38.58	37.59	42.33	40.81	44.18	43.69
113	38.81	37.83	42.76	41.11	44.61	44.05
114	39.04	38.07	42.96	41.40	45.14	44.42
115	39.27	38.30	43.26	41.70	45.56	44.78
116	39.49	38.54	43.53	41.99	45.48	45.15
117	39.72	38.78	43.83	42.29	45.79	45.51
118	39.94	39.02	44.20	42.58	46.20	45.87
119	40.17	39.25	44.47	42.87	46.61	46.22
120	40.39	39.48	44.87	43.16	47.11	46.58
121	40.61	39.72	45.01	43.45	47.01	46.93
122	40.84	39.95	45.31	43.73	47.31	47.29
123	41.06	40.18	45.68	44.02	47.70	47.64
124	41.28	40.41	46.08	44.30	48.19	47.99
125	41.49	40.64	46.22	44.59	48.57	48.33
126	41.71	40.87	46.43	44.87	48.55	48.68
127	41.93	41.10	46.76	45.15	48.83	49.02
128	42.14	41.32	47.10	45.43	49.20	49.36
129	42.36	41.55	47.31	45.70	49.67	49.70
130	42.57	41.77	47.61	45.98	50.13	50.04

131	42.78	42.00	47.85	46.25	50.09	50.37
132	42.99	42.22	48.12	46.53	50.35	50.71
133	43.20	42.44	48.46	46.80	50.80	51.04
134	43.41	42.66	48.70	47.07	51.15	51.37
135	43.62	42.88	48.97	47.34	51.59	51.69
136	43.82	43.09	49.18	47.60	51.63	52.02
137	44.03	43.31	49.45	47.87	51.87	52.34
138	44.23	43.52	49.75	48.13	52.30	52.66
139	44.44	43.74	49.99	48.39	52.73	52.98
140	44.64	43.95	50.23	48.65	53.15	53.29
141	44.84	44.16	50.60	48.91	53.18	53.61
142	45.04	44.37	50.74	49.17	53.39	53.92
143	45.23	44.58	51.05	49.42	53.81	54.23
144	45.43	44.78	51.25	49.68	54.21	54.54
145	45.63	44.99	51.45	49.93	54.52	54.84
146	45.82	45.19	51.66	50.18	54.62	55.14
147	46.01	45.40	51.93	50.43	54.82	55.44
148	46.20	45.60	52.20	50.68	55.21	55.74
149	46.39	45.80	52.40	50.92	55.60	56.04
150	46.58	46.00	52.64	51.16	55.99	56.33
151	46.77	46.20	52.84	51.41	56.07	56.62
152	46.96	46.39	53.08	51.65	56.25	56.91
153	47.14	46.59	53.35	51.88	56.62	57.20
154	47.33	46.78	53.55	52.12	56.99	57.49
155	47.51	46.97	53.79	52.36	57.36	57.77
156	47.69	47.16	53.96	52.59	57.42	58.05
157	47.87	47.35	54.16	52.82	57.68	58.33
158	48.05	47.54	54.42	53.05	58.04	58.61
159	48.23	47.73	54.59	53.28	58.39	58.88
160	48.41	47.92	54.83	53.51	58.74	59.15
161	48.58	48.10	54.96	53.73	58.78	59.42
162	48.75	48.28	55.19	53.95	59.03	59.69
163	48.93	48.46	55.46	54.18	59.36	59.96
164	49.10	48.65	55.63	54.40	59.70	60.22
165	49.27	48.82	55.86	54.61	60.03	60.48
166	49.44	49.00	55.99	54.83	60.05	60.74
167	49.61	49.18	56.22	55.05	60.28	61.00
168	49.77	49.35	56.45	55.26	60.60	61.26
169	49.94	49.53	56.58	55.47	60.92	61.51
170	50.10	49.70	56.81	55.68	61.33	61.76
171	50.27	49.87	56.98	55.89	61.34	62.01
172	50.43	50.04	57.14	56.10	61.54	62.26
173	50.59	50.21	57.44	56.30	61.85	62.50
174	50.75	50.38	57.57	56.50	62.15	62.75
175	50.91	50.54	57.73	56.71	62.54	62.99
176	51.06	50.71	57.92	56.91	62.54	63.23

177	51.22	50.87	58.12	57.11	62.73	63.46
178	51.37	51.04	58.31	57.30	63.01	63.70
179	51.53	51.20	58.47	57.50	63.40	63.93
180	51.68	51.36	58.63	57.69	63.68	64.16
181	51.83	51.51	58.79	57.89	63.65	64.39
182	51.98	51.67	58.99	58.08	63.93	64.62
183	52.13	51.83	59.18	58.27	64.20	64.85
184	52.28	51.98	59.34	58.45	64.47	65.07
185	52.42	52.14	59.50	58.64	64.73	65.29
186	52.57	52.29	59.62	58.82	64.79	65.51
187	52.71	52.44	59.81	59.01	64.95	65.73
188	52.86	52.59	59.97	59.19	65.20	65.95
189	53.00	52.74	60.09	59.37	65.46	66.16
190	53.14	52.89	60.28	59.55	65.81	66.37
191	53.28	53.03	60.44	59.73	65.75	66.58
192	53.42	53.18	60.59	59.90	66.00	66.79
193	53.56	53.32	60.78	60.08	66.24	67.00
194	53.69	53.47	60.90	60.25	66.47	67.20
195	53.83	53.61	61.06	60.42	66.71	67.41
196	53.96	53.75	61.18	60.59	66.74	67.61
197	54.10	53.89	61.30	60.76	66.97	67.81
198	54.23	54.03	61.49	60.93	67.19	68.01
199	54.36	54.16	61.61	61.09	67.42	68.20
200	54.49	54.30	61.76	61.26	67.74	68.40
201	54.62	54.43	61.88	61.42	67.76	68.59
202	54.75	54.57	62.06	61.58	67.87	68.78
203	54.88	54.70	62.18	61.74	68.08	68.97
204	55.00	54.83	62.30	61.90	68.29	69.16
205	55.13	54.96	62.48	62.06	68.60	69.35
206	55.25	55.09	62.60	62.22	68.60	69.53
207	55.37	55.22	62.72	62.37	68.70	69.71
208	55.50	55.35	62.86	62.52	69.00	69.89
209	55.62	55.47	62.98	62.68	69.20	70.07
210	55.74	55.60	63.13	62.83	69.49	70.25
211	55.86	55.72	63.24	62.98	69.49	70.43
212	55.97	55.85	63.36	63.13	69.67	70.60
213	56.09	55.97	63.54	63.27	69.86	70.78
214	56.21	56.09	63.65	63.42	70.04	70.95
215	56.32	56.21	63.77	63.56	70.33	71.12
216	56.44	56.33	63.91	63.71	70.30	71.29
217	56.55	56.45	63.99	63.85	70.48	71.46
218	56.66	56.56	64.17	63.99	70.66	71.62
219	56.78	56.68	64.29	64.13	70.93	71.79
220	56.89	56.79	64.40	64.27	71.10	71.95
221	57.00	56.91	64.48	64.41	71.16	72.11
222	57.11	57.02	64.62	64.54	71.23	72.27

223	57.21	57.13	64.80	64.68	71.49	72.43
224	57.32	57.25	64.84	64.81	71.65	72.59
225	57.43	57.36	65.02	64.95	71.91	72.75
226	57.53	57.47	65.10	65.08	71.87	72.90
227	57.64	57.57	65.20	65.21	72.02	73.05
228	57.74	57.68	65.35	65.34	72.27	73.21
229	57.84	57.79	65.46	65.47	72.42	73.36
230	57.95	57.89	65.53	65.59	72.67	73.50
231	58.05	58.00	65.67	65.72	72.61	73.65
232	58.15	58.10	65.78	65.84	72.75	73.80
233	58.25	58.21	65.92	65.97	72.89	73.94
234	58.34	58.31	65.99	66.09	73.13	74.09
235	58.44	58.41	66.13	66.21	73.27	74.23
236	58.54	58.51	66.21	66.33	73.40	74.37
237	58.64	58.61	66.31	66.45	73.44	74.51
238	58.73	58.71	66.45	66.57	73.67	74.65
239	58.83	58.81	66.56	66.69	73.79	74.79
240	58.92	58.90	66.66	66.81	74.02	74.93
241	59.01	59.00	66.70	66.92	74.04	75.06
242	59.11	59.09	66.87	67.04	74.17	75.19
243	59.20	59.19	66.98	67.15	74.29	75.33
244	59.29	59.28	67.05	67.26	74.51	75.46
245	59.38	59.38	67.19	67.37	74.62	75.59
246	59.47	59.47	67.29	67.49	74.64	75.72
247	59.56	59.56	67.36	67.60	74.75	75.85
248	59.64	59.65	67.46	67.70	74.96	75.97
249	59.73	59.74	67.56	67.81	75.07	76.10
250	59.82	59.83	67.67	67.92	75.28	76.22
251	59.90	59.92	67.77	68.02	75.28	76.35
252	59.99	60.00	67.84	68.13	75.39	76.47
253	60.07	60.09	67.97	68.23	75.49	76.59
254	60.15	60.18	68.11	68.34	75.69	76.71
255	60.24	60.26	68.17	68.44	75.89	76.83
256	60.32	60.35	68.24	68.54	75.88	76.95
257	60.40	60.43	68.31	68.64	75.98	77.06
258	60.48	60.51	68.47	68.74	76.17	77.18
259	60.56	60.60	68.54	68.84	76.26	77.30
260	60.64	60.68	68.64	68.94	76.45	77.41
261	60.72	60.76	68.71	69.03	76.44	77.52
262	60.80	60.84	68.77	69.13	76.53	77.63
263	60.88	60.92	68.94	69.23	76.71	77.75
264	60.95	61.00	69.00	69.32	76.90	77.86
265	61.03	61.08	69.10	69.41	76.98	77.96
266	61.10	61.15	69.16	69.51	77.06	78.07
267	61.18	61.23	69.23	69.60	77.14	78.18
268	61.25	61.31	69.39	69.69	77.31	78.28

269	61.33	61.38	69.42	69.78	77.39	78.39
270	61.40	61.46	69.49	69.87	77.56	78.49
271	61.47	61.53	69.62	69.96	77.54	78.60
272	61.54	61.60	69.68	70.05	77.71	78.70
273	61.61	61.68	69.77	70.13	77.78	78.80
274	61.69	61.75	69.87	70.22	77.95	78.90
275	61.76	61.82	69.93	70.31	78.11	79.00
276	61.82	61.89	69.96	70.39	78.08	79.10
277	61.89	61.96	70.12	70.48	78.14	79.20
278	61.96	62.03	70.18	70.56	78.30	79.29
279	62.03	62.10	70.21	70.64	78.46	79.39
280	62.10	62.17	70.37	70.72	78.52	79.48
281	62.16	62.24	70.40	70.81	78.58	79.58
282	62.23	62.31	70.50	70.89	78.64	79.67
283	62.29	62.37	70.56	70.97	78.79	79.76
284	62.36	62.44	70.65	71.04	78.95	79.86
285	62.42	62.51	70.71	71.12	79.00	79.95
286	62.49	62.57	70.74	71.20	79.05	80.04
287	62.55	62.63	70.83	71.28	79.20	80.13
288	62.61	62.70	70.95	71.35	79.25	80.21
289	62.68	62.76	71.05	71.43	79.40	80.30
290	62.74	62.83	71.11	71.51	79.54	80.39
291	62.80	62.89	71.16	71.58	79.59	80.47
292	62.86	62.95	71.22	71.65	79.63	80.56
293	62.92	63.01	71.28	71.73	79.77	80.64
294	62.98	63.07	71.34	71.80	79.82	80.73
295	63.04	63.13	71.43	71.87	79.95	80.81
296	63.10	63.19	71.49	71.94	79.99	80.89
297	63.15	63.25	71.54	72.01	80.03	80.97
298	63.21	63.31	71.67	72.08	80.17	81.06
299	63.27	63.37	71.73	72.15	80.30	81.14
300	63.33	63.42	71.22	72.22	90.00	89.99

ANEXO X: Historial de temperaturas experimentales y simuladas durante el escaldado de cubos de loche de 3x3x3 cm

Tiempo (s)	Escaldado a 70°C	Simulación a 70°C	Escaldado a 80°C	Simulación a 80°C	Escaldado a 90°C	Simulación a 90°C
0	22.60	22.60	22.48	22.48	22.02	22.02
1	22.60	22.60	22.48	22.48	22.02	22.02
2	22.60	22.60	22.48	22.48	22.02	22.02
3	22.60	22.60	22.48	22.48	22.02	22.02
4	22.60	22.60	22.48	22.48	22.02	22.02
5	22.60	22.60	22.48	22.48	22.02	22.02
6	22.60	22.60	22.48	22.48	22.02	22.02
7	22.60	22.60	22.48	22.48	22.02	22.02
8	22.60	22.60	22.48	22.48	22.02	22.02
9	22.60	22.60	22.48	22.48	22.02	22.02
10	22.60	22.60	22.48	22.48	22.02	22.02
11	22.60	22.60	22.48	22.48	22.02	22.02
12	22.60	22.60	22.48	22.48	22.02	22.02
13	22.60	22.60	22.48	22.48	22.02	22.02
14	22.60	22.60	22.48	22.48	22.02	22.02
15	22.60	22.60	22.48	22.48	22.02	22.02
16	22.60	22.60	22.48	22.48	22.02	22.02
17	22.60	22.60	22.48	22.48	22.02	22.02
18	22.60	22.60	22.48	22.48	22.02	22.02
19	22.60	22.60	22.48	22.48	22.02	22.02
20	22.60	22.60	22.48	22.48	22.02	22.02
21	22.60	22.60	22.48	22.48	22.03	22.03
22	22.60	22.60	22.48	22.48	22.03	22.03
23	22.60	22.60	22.48	22.48	22.03	22.03
24	22.60	22.60	22.48	22.48	22.03	22.03
25	22.60	22.60	22.48	22.48	22.04	22.04
26	22.60	22.60	22.48	22.48	22.04	22.04
27	22.60	22.60	22.48	22.48	22.05	22.05
28	22.60	22.60	22.48	22.48	22.06	22.06
29	22.60	22.60	22.48	22.48	22.07	22.07
30	22.60	22.60	22.48	22.48	22.07	22.07
31	22.80	22.60	22.68	22.48	22.09	22.09
32	22.80	22.60	22.68	22.48	22.10	22.10
33	22.80	22.60	22.68	22.48	22.11	22.11
34	22.80	22.60	22.68	22.48	22.13	22.13
35	22.80	22.60	22.68	22.48	22.14	22.14
36	22.80	22.60	22.68	22.48	22.16	22.16
37	22.80	22.60	22.68	22.48	22.18	22.18
38	22.80	22.60	22.68	22.48	22.20	22.20

39	22.80	22.60	22.68	22.48	22.22	22.22
40	22.80	22.60	22.68	22.48	22.25	22.25
41	22.80	22.60	22.68	22.48	22.27	22.28
42	22.80	22.60	22.69	22.49	22.30	22.30
43	22.80	22.60	22.69	22.49	22.33	22.33
44	22.81	22.61	22.69	22.49	22.36	22.37
45	22.81	22.61	22.69	22.49	22.40	22.40
46	22.81	22.61	22.69	22.49	22.43	22.43
47	22.81	22.61	22.70	22.49	22.47	22.47
48	22.81	22.61	22.70	22.50	22.51	22.51
49	22.81	22.61	22.70	22.50	22.55	22.55
50	22.82	22.62	22.71	22.50	22.59	22.59
51	22.82	22.62	22.71	22.50	22.64	22.64
52	22.82	22.62	22.71	22.51	22.68	22.68
53	22.83	22.63	22.72	22.51	22.73	22.73
54	22.83	22.63	22.72	22.52	22.78	22.78
55	22.83	22.63	22.73	22.52	22.83	22.83
56	22.84	22.64	22.74	22.53	22.88	22.89
57	22.84	22.64	22.75	22.53	22.94	22.94
58	22.85	22.65	22.75	22.54	22.99	23.00
59	22.85	22.65	22.76	22.55	23.05	23.06
60	22.86	22.66	22.78	22.56	23.11	23.12
61	22.87	22.67	22.79	22.57	23.17	23.18
62	22.88	22.68	22.80	22.58	23.24	23.25
63	22.88	22.68	22.81	22.59	23.30	23.31
64	22.89	22.69	22.82	22.60	23.37	23.38
65	22.90	22.70	22.84	22.61	23.43	23.45
66	22.91	22.71	22.86	22.63	23.50	23.52
67	22.92	22.72	22.87	22.64	23.58	23.60
68	23.04	22.74	22.89	22.65	23.65	23.67
69	23.05	22.75	22.91	22.67	23.72	23.75
70	23.06	22.76	22.93	22.69	23.80	23.83
71	23.08	22.78	22.95	22.71	23.88	23.91
72	23.09	22.79	22.98	22.73	23.96	23.99
73	23.11	22.81	23.00	22.75	24.04	24.07
74	23.12	22.82	23.03	22.77	24.12	24.15
75	23.14	22.84	23.05	22.79	24.20	24.24
76	23.16	22.86	23.08	22.81	24.29	24.33
77	23.18	22.88	23.11	22.84	24.37	24.42
78	23.20	22.90	23.14	22.87	24.46	24.51
79	23.22	22.92	23.18	22.89	24.55	24.60
80	23.25	22.95	23.21	22.92	24.64	24.70
81	23.27	22.97	23.25	22.95	24.74	24.79
82	23.29	22.99	23.28	22.99	24.83	24.89
83	23.32	23.02	23.32	23.02	24.92	24.99
84	23.35	23.05	23.36	23.05	25.02	25.09

85	23.38	23.08	23.40	23.09	25.12	25.19
86	23.40	23.10	23.45	23.12	25.22	25.29
87	23.43	23.13	23.49	23.16	25.32	25.40
88	23.47	23.17	23.54	23.20	25.42	25.50
89	23.50	23.20	23.58	23.24	25.52	25.61
90	23.53	23.23	23.64	23.29	25.63	25.72
91	23.57	23.27	23.69	23.33	25.73	25.83
92	23.60	23.30	23.74	23.38	25.84	25.94
93	23.64	23.34	23.79	23.42	25.95	26.05
94	23.68	23.38	23.85	23.47	26.06	26.17
95	23.72	23.42	23.91	23.52	26.17	26.28
96	23.76	23.46	23.97	23.57	26.28	26.40
97	23.80	23.50	24.03	23.63	26.39	26.52
98	23.84	23.54	24.09	23.68	26.51	26.64
99	23.89	23.59	24.15	23.74	26.62	26.76
100	23.93	23.63	24.22	23.79	26.74	26.88
101	23.98	23.68	24.17	23.85	26.97	27.00
102	24.03	23.73	24.21	23.91	27.12	27.13
103	24.08	23.78	24.28	23.97	27.24	27.25
104	24.13	23.83	24.39	24.04	27.32	27.38
105	24.18	23.88	24.50	24.10	27.41	27.51
106	24.23	23.93	24.58	24.17	27.53	27.64
107	24.38	23.98	24.66	24.23	27.65	27.77
108	24.44	24.04	24.71	24.30	27.80	27.90
109	24.49	24.09	24.80	24.37	27.92	28.03
110	24.55	24.15	24.95	24.44	27.97	28.16
111	24.61	24.21	25.04	24.52	28.10	28.29
112	24.67	24.27	25.07	24.59	28.28	28.43
113	24.73	24.33	25.19	24.67	28.37	28.57
114	24.79	24.39	25.29	24.75	28.50	28.70
115	24.85	24.45	25.45	24.82	28.56	28.84
116	24.92	24.52	25.51	24.90	28.71	28.98
117	24.98	24.58	25.58	24.99	28.87	29.12
118	25.05	24.65	25.65	25.07	29.03	29.26
119	25.11	24.71	25.78	25.15	29.12	29.40
120	25.18	24.78	25.92	25.24	29.22	29.54
121	25.25	24.85	26.03	25.32	29.35	29.69
122	25.32	24.92	26.14	25.41	29.47	29.83
123	25.39	24.99	26.18	25.50	29.67	29.98
124	25.46	25.06	26.29	25.59	29.80	30.12
125	25.54	25.14	26.47	25.68	29.86	30.27
126	25.61	25.21	26.58	25.78	29.99	30.41
127	25.69	25.29	26.67	25.87	30.15	30.56
128	25.76	25.36	26.72	25.97	30.35	30.71
129	25.84	25.44	26.87	26.06	30.45	30.86
130	25.92	25.52	27.02	26.16	30.55	31.01

131	26.00	25.60	27.14	26.26	30.68	31.16
132	26.08	25.68	27.23	26.36	30.84	31.31
133	26.16	25.76	27.29	26.46	31.04	31.46
134	26.24	25.84	27.41	26.56	31.18	31.62
135	26.32	25.92	27.61	26.66	31.25	31.77
136	26.41	26.01	27.74	26.77	31.38	31.92
137	26.49	26.09	27.80	26.87	31.58	32.08
138	26.58	26.18	27.89	26.98	31.75	32.23
139	26.66	26.26	27.99	27.09	31.92	32.39
140	26.75	26.35	28.22	27.20	31.96	32.54
141	26.84	26.44	28.29	27.31	32.16	32.70
142	26.93	26.53	28.43	27.42	32.29	32.86
143	27.01	26.61	28.46	27.53	32.53	33.01
144	27.11	26.71	28.67	27.64	32.60	33.17
145	27.20	26.80	28.80	27.75	32.74	33.33
146	27.29	26.89	28.91	27.87	32.91	33.49
147	27.38	26.98	29.01	27.98	33.08	33.65
148	27.47	27.07	29.09	28.10	33.29	33.80
149	27.57	27.17	29.26	28.22	33.40	33.96
150	27.66	27.26	29.44	28.33	33.50	34.12
151	27.76	27.36	29.58	28.45	33.64	34.28
152	27.85	27.45	29.66	28.57	33.85	34.44
153	27.95	27.55	29.77	28.69	34.02	34.61
154	28.05	27.65	29.91	28.81	34.16	34.77
155	28.15	27.75	30.09	28.94	34.27	34.93
156	28.24	27.84	30.21	29.06	34.45	35.09
157	28.34	27.94	30.29	29.18	34.66	35.25
158	28.44	28.04	30.40	29.31	34.83	35.41
159	28.54	28.14	30.55	29.43	34.97	35.58
160	28.64	28.24	30.73	29.56	35.08	35.74
161	28.75	28.35	30.89	29.68	35.23	35.90
162	28.85	28.45	30.97	29.81	35.44	36.07
163	28.95	28.55	31.09	29.93	35.61	36.23
164	29.05	28.65	31.24	30.06	35.76	36.39
165	29.16	28.76	31.42	30.19	35.87	36.56
166	29.26	28.86	31.54	30.32	36.04	36.72
167	29.37	28.97	31.66	30.45	36.22	36.88
168	29.47	29.07	31.75	30.58	36.43	37.05
169	29.58	29.18	31.90	30.71	36.58	37.21
170	29.68	29.28	32.09	30.84	36.69	37.38
171	29.79	29.39	32.21	30.97	36.87	37.54
172	29.90	29.50	32.33	31.11	37.05	37.71
173	30.00	29.60	32.42	31.24	37.26	37.87
174	30.11	29.71	32.61	31.37	37.37	38.03
175	30.22	29.82	32.77	31.50	37.52	38.20
176	30.33	29.93	32.92	31.64	37.66	38.36

177	30.44	30.04	33.01	31.77	37.88	38.53
178	30.55	30.15	33.14	31.91	38.06	38.69
179	30.66	30.26	33.29	32.04	38.20	38.86
180	30.76	30.36	33.45	32.18	38.35	39.02
181	30.87	30.47	33.61	32.32	38.50	39.19
182	30.99	30.59	33.70	32.45	38.71	39.35
183	31.10	30.70	33.82	32.59	38.89	39.52
184	31.21	30.81	33.98	32.72	39.04	39.68
185	31.32	30.92	34.14	32.86	39.19	39.84
186	31.43	31.03	34.30	33.00	39.33	40.01
187	31.54	31.14	34.39	33.14	39.55	40.17
188	31.65	31.25	34.51	33.28	39.73	40.34
189	31.77	31.37	34.67	33.41	39.88	40.50
190	31.88	31.48	34.86	33.55	39.99	40.67
191	31.99	31.59	34.98	33.69	40.17	40.83
192	32.10	31.70	35.11	33.83	40.36	40.99
193	32.22	31.82	35.20	33.97	40.57	41.16
194	32.33	31.93	35.36	34.11	40.72	41.32
195	32.44	32.04	35.58	34.25	40.80	41.49
196	32.56	32.16	35.67	34.39	41.02	41.65
197	32.67	32.27	35.83	34.53	41.17	41.81
198	32.79	32.39	35.89	34.67	41.41	41.97
199	32.90	32.50	36.08	34.81	41.53	42.14
200	33.01	32.61	36.27	34.95	41.65	42.30
201	33.13	32.73	36.36	35.09	41.86	42.46
202	33.24	32.84	36.52	35.23	42.01	42.63
203	33.36	32.96	36.57	35.37	42.26	42.79
204	33.47	33.07	36.80	35.51	42.34	42.95
205	33.59	33.19	36.95	35.65	42.49	43.11
206	33.70	33.30	37.11	35.80	42.64	43.27
207	33.82	33.42	37.20	35.94	42.86	43.43
208	33.93	33.53	37.29	36.08	43.07	43.60
209	34.05	33.65	37.48	36.22	43.19	43.76
210	34.16	33.76	37.63	36.36	43.34	43.92
211	34.28	33.88	37.82	36.50	43.46	44.08
212	34.39	33.99	37.87	36.64	43.71	44.24
213	34.51	34.11	38.03	36.79	43.86	44.40
214	34.62	34.22	38.15	36.93	44.04	44.56
215	34.74	34.34	38.30	37.07	44.19	44.72
216	34.85	34.45	38.49	37.21	44.31	44.88
217	34.97	34.57	38.58	37.35	44.52	45.04
218	35.08	34.68	38.69	37.49	44.71	45.19
219	35.20	34.80	38.85	37.63	44.86	45.35
220	35.31	34.91	39.07	37.77	44.94	45.51
221	35.43	35.03	39.15	37.92	45.15	45.67
222	35.54	35.14	39.30	38.06	45.30	45.83

223	35.66	35.26	39.35	38.20	45.55	45.98
224	35.77	35.37	39.57	38.34	45.64	46.14
225	35.89	35.49	39.72	38.48	45.79	46.30
226	36.00	35.60	39.84	38.62	45.97	46.45
227	36.12	35.72	39.95	38.76	46.15	46.61
228	36.23	35.83	40.07	38.90	46.34	46.77
229	36.35	35.95	40.22	39.04	46.49	46.92
230	36.46	36.06	40.40	39.18	46.60	47.08
231	36.58	36.18	40.54	39.32	46.75	47.23
232	36.69	36.29	40.62	39.46	46.97	47.38
233	36.81	36.41	40.74	39.60	47.15	47.54
234	36.92	36.52	40.88	39.74	47.30	47.69
235	37.03	36.63	41.09	39.88	47.39	47.85
236	37.15	36.75	41.21	40.02	47.57	48.00
237	37.26	36.86	41.35	40.16	47.72	48.15
238	37.38	36.98	41.39	40.30	47.97	48.30
239	37.49	37.09	41.57	40.44	48.08	48.46
240	37.60	37.20	41.75	40.58	48.20	48.61
241	37.72	37.32	41.89	40.72	48.35	48.76
242	37.83	37.43	41.96	40.85	48.57	48.91
243	37.94	37.54	42.11	40.99	48.72	49.06
244	38.06	37.66	42.21	41.13	48.90	49.21
245	38.17	37.77	42.42	41.27	48.98	49.36
246	38.28	37.88	42.53	41.41	49.16	49.51
247	38.40	38.00	42.63	41.54	49.35	49.66
248	38.51	38.11	42.74	41.68	49.53	49.81
249	38.52	38.22	42.88	41.82	49.68	49.96
250	38.63	38.33	43.05	41.95	49.79	50.11
251	38.74	38.44	43.18	42.09	49.94	50.25
252	38.86	38.56	43.32	42.23	50.09	50.40
253	38.97	38.67	43.36	42.36	50.34	50.55
254	39.08	38.78	43.56	42.50	50.42	50.69
255	39.19	38.89	43.73	42.64	50.54	50.84
256	39.30	39.00	43.86	42.77	50.69	50.99
257	39.41	39.11	43.93	42.91	50.90	51.13
258	39.52	39.22	44.03	43.04	51.08	51.28
259	39.63	39.33	44.16	43.18	51.23	51.42
260	39.74	39.44	44.36	43.31	51.31	51.56
261	39.85	39.55	44.49	43.44	51.46	51.71
262	39.96	39.66	44.58	43.58	51.64	51.85
263	40.07	39.77	44.68	43.71	51.82	51.99
264	40.18	39.88	44.81	43.84	51.97	52.14
265	40.29	39.99	45.00	43.98	52.05	52.28
266	40.40	40.10	45.10	44.11	52.23	52.42
267	40.51	40.21	45.22	44.24	52.38	52.56
268	40.62	40.32	45.32	44.37	52.56	52.70

269	40.73	40.43	45.41	44.51	52.74	52.84
270	40.83	40.53	45.64	44.64	52.79	52.98
271	40.94	40.64	45.73	44.77	52.97	53.12
272	41.05	40.75	45.85	44.90	53.12	53.26
273	41.16	40.86	45.94	45.03	53.30	53.40
274	41.26	40.96	46.06	45.16	53.45	53.54
275	41.37	41.07	46.25	45.29	53.53	53.68
276	41.48	41.18	46.34	45.42	53.71	53.82
277	41.58	41.28	46.46	45.55	53.85	53.95
278	41.69	41.39	46.51	45.68	54.07	54.09
279	41.80	41.50	46.67	45.81	54.18	54.23
280	41.90	41.60	46.85	45.93	54.26	54.36
281	42.01	41.71	46.94	46.06	54.44	54.50
282	42.01	41.81	47.02	46.19	54.62	54.63
283	42.18	41.92	47.17	46.32	54.80	54.77
284	42.24	42.02	47.27	46.45	54.91	54.90
285	42.33	42.13	47.47	46.57	54.96	55.04
286	42.43	42.23	47.58	46.70	55.11	55.17
287	42.63	42.33	47.69	46.82	55.35	55.30
288	42.76	42.44	47.83	46.95	55.50	55.44
289	42.82	42.54	47.94	47.08	55.61	55.57
290	42.84	42.64	48.03	47.20	55.69	55.70
291	42.95	42.75	48.15	47.33	55.83	55.83
292	43.08	42.85	48.29	47.45	55.98	55.96
293	43.28	42.95	48.46	47.57	56.16	56.09
294	43.34	43.05	48.57	47.70	56.27	56.22
295	43.41	43.15	48.67	47.82	56.38	56.35
296	43.54	43.26	48.81	47.94	56.53	56.48
297	43.74	43.36	48.99	48.07	56.70	56.61
298	43.88	43.46	49.13	48.19	56.85	56.74
299	44.01	43.56	49.26	48.31	56.99	56.87
300	44.03	43.66	49.19	48.43	57.12	57.00

ANEXO XI: Historial de temperaturas experimentales y simuladas durante el escaldado de cubos de papa de 1x1x1 cm

Tiempo (s)	Escaldado a 70°C	Simulación a 70°C	Escaldado a 80°C	Simulación a 80°C	Escaldado a 90°C	Simulación a 90°C
0	21.95	21.95	21.60	21.60	21.83	21.83
1	22.00	21.95	22.07	21.60	21.83	21.83
2	22.29	21.95	22.80	21.60	21.91	21.83
3	23.50	21.95	23.64	21.60	22.18	21.83
4	23.66	21.95	23.93	21.60	22.70	21.83
5	24.20	21.95	24.40	21.60	23.43	21.84
6	24.80	21.96	25.70	21.62	24.31	21.85
7	25.45	21.98	26.30	21.64	25.29	21.89
8	26.30	22.02	27.80	21.70	26.33	21.97
9	27.24	22.09	28.64	21.79	27.42	22.10
10	27.93	22.20	30.79	21.94	28.54	22.30
11	28.70	22.35	31.55	22.13	29.69	22.57
12	29.48	22.55	32.74	22.40	30.85	22.93
13	30.31	22.80	33.86	22.73	32.02	23.38
14	31.05	23.11	34.47	23.13	33.20	23.92
15	31.88	23.46	35.24	23.60	33.40	24.54
16	32.67	23.88	35.98	24.14	34.20	25.25
17	33.45	24.34	36.75	24.74	35.10	26.05
18	34.30	24.85	37.53	25.40	36.34	26.91
19	35.08	25.40	38.25	26.12	37.54	27.84
20	35.91	26.00	39.00	26.88	38.80	28.83
21	36.71	26.63	39.76	27.69	40.02	29.87
22	37.53	27.29	40.53	28.54	41.22	30.96
23	38.38	27.98	41.27	29.42	42.34	32.08
24	39.19	28.69	42.02	30.33	43.49	33.23
25	40.02	29.42	42.71	31.27	44.62	34.41
26	40.83	30.17	43.43	32.22	45.71	35.60
27	41.62	30.94	44.16	33.18	46.73	36.81
28	42.39	31.71	44.83	34.16	47.79	38.02
29	43.19	32.49	45.53	35.14	48.80	39.23
30	43.95	33.27	46.24	36.12	49.85	40.44
31	44.70	34.05	46.85	37.10	50.91	41.65
32	45.42	34.84	47.54	38.09	51.90	42.85
33	46.14	35.62	48.16	39.06	52.84	44.04
34	46.81	36.39	48.88	40.03	53.77	45.22
35	47.44	37.17	49.51	40.99	54.71	46.38
36	48.04	37.93	50.08	41.94	55.59	47.52
37	48.71	38.69	50.72	42.88	56.50	48.64

38	49.32	39.43	51.37	43.80	57.35	49.75
39	49.94	40.17	52.02	44.71	58.11	50.84
40	50.55	40.90	52.65	45.60	58.95	51.90
41	51.17	41.61	53.28	46.48	59.71	52.94
42	51.63	42.31	53.89	47.34	60.49	53.96
43	52.18	43.01	54.64	48.19	61.23	54.96
44	52.77	43.68	55.33	49.02	62.01	55.93
45	53.25	44.35	55.96	49.83	62.73	56.88
46	53.75	45.00	56.60	50.63	63.44	57.81
47	54.10	45.64	56.82	51.40	64.20	58.72
48	54.49	46.26	57.55	52.16	64.95	59.60
49	55.02	46.87	58.26	52.90	65.47	60.46
50	55.33	47.47	58.91	53.63	66.13	61.30
51	55.62	48.05	59.57	54.34	66.85	62.12
52	55.95	48.62	59.98	55.03	67.55	62.91
53	56.37	49.18	60.50	55.70	68.14	63.68
54	56.79	49.73	61.07	56.35	68.54	64.44
55	57.17	50.26	61.69	56.99	69.27	65.17
56	57.41	50.78	62.25	57.62	69.85	65.88
57	57.85	51.28	62.43	58.23	70.52	66.57
58	58.22	51.78	62.79	58.82	70.95	67.25
59	58.74	52.26	63.27	59.40	71.44	67.90
60	58.96	52.73	63.79	59.96	72.02	68.54
61	59.19	53.18	64.30	60.50	72.68	69.15
62	59.41	53.63	64.39	61.04	73.22	69.75
63	59.77	54.07	64.77	61.55	73.57	70.34
64	60.14	54.49	65.20	62.06	74.09	70.90
65	60.36	54.90	65.65	62.55	74.60	71.45
66	60.53	55.30	66.08	63.03	74.91	71.99
67	60.76	55.69	66.20	63.49	75.35	72.51
68	61.09	56.08	66.47	63.95	75.75	73.01
69	61.46	56.45	66.89	64.39	76.20	73.50
70	61.65	56.81	67.30	64.81	76.59	73.98
71	61.76	57.16	67.67	65.23	76.97	74.44
72	62.01	57.50	67.75	65.64	77.27	74.89
73	62.30	57.84	68.03	66.03	77.59	75.33
74	62.59	58.16	68.39	66.41	77.99	75.75
75	62.74	58.48	68.74	66.79	78.30	76.16
76	62.90	58.79	69.05	67.15	78.60	76.56
77	63.06	59.09	69.17	67.50	78.91	76.95
78	63.33	59.38	69.36	67.85	79.18	77.32
79	63.57	59.66	69.73	68.18	79.51	77.69
80	63.71	59.94	70.00	68.50	79.78	78.04
81	63.85	60.21	70.35	68.82	80.01	78.39
82	64.00	60.47	70.43	69.13	80.28	78.72
83	64.19	60.73	70.63	69.42	80.48	79.05

84	64.46	60.97	70.89	69.71	80.76	79.36
85	64.57	61.22	71.18	70.00	81.04	79.67
86	64.70	61.45	71.42	70.27	81.24	79.97
87	64.84	61.68	71.52	70.54	81.45	80.25
88	64.99	61.90	71.72	70.80	81.66	80.53
89	65.23	62.12	71.97	71.05	81.93	80.81
90	65.35	62.33	72.21	71.30	82.14	81.07
91	65.44	62.54	72.45	71.53	82.34	81.33
92	65.56	62.74	72.51	71.77	82.50	81.58
93	65.72	62.93	72.67	71.99	82.71	81.82
94	65.92	63.12	72.92	72.21	82.93	82.05
95	66.02	63.30	73.10	72.43	83.13	82.28
96	66.08	63.48	73.30	72.63	83.31	82.50
97	66.20	63.66	73.40	72.84	83.48	82.72
98	66.36	63.83	73.52	73.03	83.65	82.93
99	66.52	63.99	73.74	73.22	83.81	83.13
100	66.59	64.15	73.88	73.41	84.01	83.33
101	66.68	64.31	74.06	73.59	84.16	83.52
102	66.75	64.46	74.16	73.76	84.32	83.71
103	66.89	64.61	74.25	73.94	84.48	83.89
104	67.03	64.75	74.45	74.10	84.65	84.06
105	67.12	64.89	74.63	74.26	84.80	84.23
106	67.17	65.03	74.75	74.42	84.96	84.40
107	67.24	65.16	74.82	74.57	85.07	84.56
108	67.35	65.29	74.96	74.72	85.25	84.71
109	67.49	65.42	75.06	74.87	85.39	84.87
110	67.52	65.54	75.22	75.01	85.53	85.01
111	67.60	65.66	75.38	75.14	85.67	85.16
112	67.68	65.78	75.43	75.28	85.80	85.29
113	67.76	65.89	75.55	75.40	85.90	85.43
114	67.87	66.00	75.66	75.53	86.02	85.56
115	67.92	66.11	75.80	75.65	86.16	85.69
116	67.96	66.21	75.94	75.77	86.27	85.81
117	68.04	66.31	75.98	75.89	86.41	85.93
118	68.10	66.41	76.08	76.00	86.51	86.05
119	68.17	66.51	76.20	76.11	86.63	86.16
120	68.21	66.60	76.29	76.22	86.75	86.27
121	68.27	66.69	76.41	76.32	86.87	86.38
122	68.33	66.78	76.47	76.42	86.95	86.48
123	68.39	66.86	76.55	76.52	87.04	86.58
124	68.47	66.95	76.63	76.61	87.17	86.68
125	68.50	67.03	76.73	76.70	87.29	86.77
126	68.55	67.11	76.84	76.79	87.39	86.87
127	68.57	67.19	76.91	76.88	87.46	86.95
128	68.66	67.26	76.94	76.97	87.52	87.04
129	68.69	67.33	77.04	77.05	87.63	87.13

130	68.75	67.41	77.10	77.13	87.72	87.21
131	68.76	67.47	77.16	77.21	87.83	87.29
132	68.80	67.54	77.25	77.29	87.90	87.37
133	68.85	67.61	77.27	77.36	87.93	87.44
134	68.90	67.67	77.36	77.43	88.00	87.51
135	68.93	67.73	77.41	77.50	88.10	87.59
136	68.97	67.79	77.49	77.57	88.19	87.65
137	68.98	67.85	77.54	77.64	88.23	87.72
138	69.03	67.91	77.58	77.70	88.32	87.79
139	69.08	67.97	77.65	77.76	88.38	87.85
140	69.11	68.02	77.73	77.82	88.41	87.91
141	69.13	68.07	77.80	77.88	88.47	87.97
142	69.16	68.12	77.83	77.94	88.52	88.03
143	69.20	68.17	77.83	78.00	88.60	88.08
144	69.27	68.22	77.93	78.05	88.62	88.14
145	69.26	68.27	77.96	78.11	88.67	88.19
146	69.29	68.32	78.03	78.16	88.69	88.24
147	69.30	68.36	78.09	78.21	88.73	88.29
148	69.33	68.41	78.11	78.26	88.77	88.34
149	69.36	68.45	78.17	78.30	88.84	88.39
150	69.39	68.49	78.22	78.35	88.88	88.44
151	69.45	68.53	78.28	78.40	88.89	88.48
152	69.44	68.57	78.33	78.44	88.92	88.52
153	69.45	68.61	78.38	78.48	88.95	88.57
154	69.48	68.64	78.40	78.52	89.01	88.61
155	69.51	68.68	78.45	78.56	89.04	88.65
156	69.55	68.72	78.50	78.60	89.07	88.69
157	69.56	68.75	78.54	78.64	89.07	88.72
158	69.57	68.78	78.59	78.68	89.12	88.76
159	69.59	68.82	78.63	78.71	89.17	88.79
160	69.60	68.85	78.67	78.75	89.19	88.83
161	69.63	68.88	78.72	78.78	89.24	88.86
162	69.64	68.91	78.76	78.82	89.23	88.89
163	69.68	68.94	78.80	78.85	89.25	88.93
164	69.69	68.97	78.83	78.88	89.30	88.96
165	69.69	68.99	78.84	78.91	89.31	88.99
166	69.70	69.02	78.91	78.94	89.35	89.02
167	69.71	69.05	78.91	78.97	89.39	89.04
168	69.73	69.07	78.91	79.00	89.43	89.07
169	69.76	69.10	78.95	79.02	89.47	89.10
170	69.76	69.12	79.01	79.05	89.50	89.12
171	69.79	69.14	79.01	79.08	89.54	89.15
172	69.79	69.17	79.04	79.10	89.55	89.17
173	69.80	69.19	79.07	79.13	89.56	89.20
174	69.82	69.21	79.10	79.15	89.59	89.22
175	69.83	69.23	79.13	79.17	89.62	89.24

176	69.83	69.25	79.16	79.20	89.65	89.26
177	69.84	69.27	79.19	79.22	89.68	89.28
178	69.86	69.29	79.21	79.24	89.71	89.30
179	69.85	69.31	79.24	79.26	89.71	89.32
180	69.89	69.33	79.26	79.28	89.74	89.34
181	69.89	69.35	79.29	79.30	89.77	89.36
182	69.90	69.36	79.31	79.32	89.79	89.38
183	69.90	69.38	79.33	79.34	89.79	89.40
184	69.94	69.40	79.36	79.36	89.82	89.42
185	69.94	69.41	79.38	79.37	89.82	89.43
186	69.95	69.43	79.40	79.39	89.87	89.45
187	69.95	69.44	79.42	79.41	89.86	89.46
188	69.96	69.46	79.44	79.42	89.89	89.48
189	69.96	69.47	79.46	79.44	89.91	89.49
190	69.97	69.49	79.48	79.45	89.93	89.51
191	69.97	69.50	79.50	79.47	89.95	89.52
192	69.97	69.51	79.52	79.48	89.97	89.54
193	69.98	69.53	79.54	79.50	89.99	89.55
194	70.00	69.54	79.52	79.51	90.01	89.56
195	70.00	69.55	79.54	79.52	90.00	89.57
196	70.00	69.56	79.59	79.54	90.00	89.59
197	70.01	69.58	79.57	79.55	90.00	89.60
198	70.01	69.59	79.59	79.56	90.00	89.61
199	70.01	69.60	79.60	79.57	90.00	89.62
200	70.02	69.61	79.62	79.59	90.00	89.63
201	70.02	69.62	79.63	79.60	90.00	89.64
202	70.02	69.63	79.64	79.61	90.00	89.65
203	70.06	69.64	79.66	79.62	90.00	89.66
204	70.04	69.65	79.67	79.63	90.00	89.67
205	70.05	69.66	79.68	79.64	90.00	89.68
206	70.05	69.67	79.70	79.65	90.00	89.69
207	70.04	69.68	79.71	79.66	90.00	89.70
208	70.06	69.69	79.72	79.67	90.00	89.71
209	70.07	69.69	79.73	79.68	90.00	89.72
210	70.08	69.70	79.74	79.69	90.00	89.72
211	70.06	69.71	79.75	79.69	90.00	89.73
212	70.10	69.72	79.77	79.70	90.00	89.74
213	70.12	69.72	79.78	79.71	90.00	89.75
214	70.10	69.73	79.79	79.72	90.00	89.75
215	70.10	69.74	79.80	79.73	90.00	89.76
216	70.12	69.75	79.81	79.73	90.00	89.77
217	70.11	69.75	79.82	79.74	90.00	89.77
218	70.11	69.76	79.82	79.75	90.00	89.78
219	70.13	69.77	79.83	79.76	90.00	89.79
220	70.11	69.77	79.84	79.76	90.00	89.79
221	70.12	69.78	79.85	79.77	90.00	89.80

222	70.13	69.78	79.86	79.77	90.00	89.81
223	70.14	69.79	79.87	79.78	90.00	89.81
224	70.12	69.80	79.87	79.79	90.00	89.82
225	70.14	69.80	79.88	79.79	90.00	89.82
226	70.14	69.81	79.89	79.80	90.00	89.83
227	70.16	69.81	79.90	79.80	90.00	89.83
228	70.16	69.82	79.90	79.81	90.00	89.84
229	70.16	69.82	79.91	79.81	90.00	89.84
230	70.15	69.83	79.92	79.82	90.00	89.85
231	70.16	69.83	79.92	79.82	90.00	89.85
232	70.17	69.84	79.93	79.83	90.00	89.85
233	70.17	69.84	79.94	79.83	90.00	89.86
234	70.17	69.84	79.94	79.84	90.00	89.86
235	70.17	69.85	79.95	79.84	90.00	89.87
236	70.17	69.85	79.95	79.85	90.00	89.87
237	70.17	69.86	79.96	79.85	90.00	89.87
238	70.17	69.86	79.97	79.86	90.00	89.88
239	70.17	69.86	79.97	79.86	90.00	89.88
240	70.18	69.87	79.98	79.86	90.00	89.88
241	70.18	69.87	79.98	79.87	90.00	89.89
242	70.18	69.87	79.99	79.87	90.00	89.89
243	70.16	69.88	79.99	79.87	90.00	89.89
244	70.16	69.88	79.99	79.88	90.00	89.90
245	70.16	69.88	80.00	79.88	90.00	89.90
246	70.18	69.89	80.00	79.88	90.00	89.90
247	70.17	69.89	80.01	79.89	90.00	89.91
248	70.17	69.89	80.01	79.89	90.00	89.91
249	70.17	69.90	80.02	79.89	90.00	89.91
250	70.18	69.90	80.02	79.90	90.00	89.91
251	70.17	69.90	80.02	79.90	90.00	89.92
252	70.17	69.90	80.03	79.90	90.00	89.92
253	70.19	69.91	80.03	79.90	90.00	89.92
254	70.17	69.91	80.03	79.91	90.00	89.92
255	70.19	69.91	80.04	79.91	90.00	89.93
256	70.19	69.91	80.04	79.91	90.00	89.93
257	70.17	69.92	80.04	79.91	90.00	89.93
258	70.19	69.92	80.05	79.92	90.00	89.93
259	70.17	69.92	80.05	79.92	90.00	89.93
260	70.18	69.92	80.05	79.92	90.00	89.94
261	70.18	69.93	80.06	79.92	90.00	89.94
262	70.18	69.93	80.06	79.93	90.00	89.94
263	70.18	69.93	80.06	79.93	90.00	89.94
264	70.18	69.93	80.07	79.93	90.00	89.94
265	70.18	69.93	80.07	79.93	90.00	89.94
266	70.18	69.93	80.07	79.93	90.00	89.95
267	70.18	69.94	80.07	79.94	90.00	89.95

268	70.18	69.94	80.08	79.94	90.00	89.95
269	70.18	69.94	80.08	79.94	90.00	89.95
270	70.18	69.94	80.08	79.94	90.00	89.95
271	70.18	69.94	80.08	79.94	90.00	89.95
272	70.20	69.94	80.08	79.94	90.00	89.95
273	70.20	69.95	80.09	79.95	90.00	89.96
274	70.20	69.95	80.09	79.95	90.00	89.96
275	70.18	69.95	80.09	79.95	90.00	89.96
276	70.20	69.95	80.09	79.95	90.00	89.96
277	70.20	69.95	80.09	79.95	90.00	89.96
278	70.20	69.95	80.10	79.95	90.00	89.96
279	70.20	69.95	80.10	79.95	90.00	89.96
280	70.20	69.96	80.10	79.95	90.00	89.96
281	70.20	69.96	80.10	79.96	90.00	89.96
282	70.20	69.96	80.10	79.96	90.00	89.97
283	70.20	69.96	80.11	79.96	90.00	89.97
284	70.20	69.96	80.11	79.96	90.00	89.97
285	70.20	69.96	80.11	79.96	90.00	89.97
286	70.20	69.96	80.11	79.96	90.00	89.97
287	70.20	69.96	80.11	79.96	90.00	89.97
288	70.19	69.96	80.11	79.96	90.00	89.97
289	70.19	69.97	80.11	79.96	90.00	89.97
290	70.19	69.97	80.12	79.97	90.00	89.97
291	70.21	69.97	80.12	79.97	90.00	89.97
292	70.19	69.97	80.12	79.97	90.00	89.97
293	70.19	69.97	80.12	79.97	90.00	89.98
294	70.19	69.97	80.12	79.97	90.00	89.98
295	70.19	69.97	80.12	79.97	90.00	89.98
296	70.19	69.97	80.12	79.97	90.00	89.98
297	70.19	69.97	80.12	79.97	90.00	89.98
298	70.17	69.97	80.13	79.97	90.00	89.98
299	70.17	69.97	80.13	79.97	90.00	89.98
300	70.10	69.97	80.13	79.97	90.00	89.98

ANEXO XII: Historial de temperaturas experimentales y simuladas durante el escaldado
de cubos de papa de 2x2x2 cm

Tiempo (s)	Escaldado a 70°C	Simulación a 70°C	Escaldado a 80°C	Simulación a 80°C	Escaldado a 90°C	Simulación a 90°C
0	21.03	21.00	21.13	21.13	20.75	20.75
1	21.03	21.00	21.13	21.13	20.75	20.75
2	21.08	21.00	21.18	21.13	20.75	20.75
3	21.23	21.00	21.33	21.13	20.75	20.75
4	21.28	21.00	21.38	21.13	20.75	20.75
5	21.43	21.00	21.53	21.13	20.75	20.75
6	21.53	21.00	21.63	21.13	20.75	20.75
7	21.53	21.00	21.63	21.13	20.75	20.75
8	21.53	21.00	21.63	21.13	20.75	20.75
9	21.53	21.00	21.63	21.13	20.75	20.75
10	21.53	21.00	21.63	21.13	20.75	20.75
11	21.53	21.00	21.63	21.13	20.75	20.75
12	21.53	21.00	21.63	21.13	20.75	20.75
13	21.53	21.00	21.63	21.13	20.75	20.75
14	21.53	21.00	21.63	21.13	20.75	20.75
15	21.53	21.00	21.63	21.13	20.75	20.75
16	21.53	21.00	21.63	21.13	20.75	20.75
17	21.53	21.00	21.63	21.13	20.75	20.75
18	21.53	21.00	21.63	21.13	20.76	20.75
19	21.53	21.00	21.63	21.13	20.77	20.75
20	21.53	21.00	21.63	21.13	20.78	20.75
21	21.53	21.00	21.63	21.13	20.79	20.76
22	21.53	21.00	21.63	21.14	20.80	20.76
23	21.53	21.01	21.63	21.14	20.82	20.76
24	21.53	21.01	21.64	21.14	20.84	20.77
25	21.54	21.01	21.64	21.15	20.87	20.77
26	21.54	21.02	21.64	21.15	20.90	20.78
27	21.54	21.02	21.65	21.16	20.93	20.79
28	21.55	21.03	21.65	21.17	20.96	20.81
29	21.55	21.04	21.66	21.18	21.01	20.82
30	21.56	21.05	21.67	21.20	21.05	20.84
31	21.57	21.06	21.68	21.21	21.10	20.86
32	21.58	21.08	21.69	21.23	21.15	20.89
33	21.59	21.10	21.71	21.25	21.21	20.92
34	21.60	21.11	21.72	21.28	21.27	20.95
35	21.62	21.14	21.74	21.31	21.34	20.99
36	21.63	21.16	21.77	21.34	21.46	21.03
37	21.65	21.19	21.79	21.38	21.54	21.08
38	21.68	21.22	21.82	21.42	21.63	21.13

39	21.70	21.26	21.85	21.46	21.73	21.19
40	21.73	21.30	21.89	21.51	21.83	21.26
41	21.76	21.34	21.92	21.57	21.93	21.33
42	21.79	21.39	21.97	21.63	22.04	21.41
43	21.83	21.44	22.01	21.69	22.16	21.49
44	21.97	21.49	22.17	21.76	22.29	21.58
45	22.01	21.55	22.22	21.83	22.42	21.68
46	22.06	21.61	22.28	21.91	22.55	21.78
47	22.11	21.68	22.34	22.00	22.69	21.89
48	22.16	21.75	22.41	22.09	22.84	22.01
49	22.22	21.83	22.48	22.18	22.99	22.14
50	22.28	21.90	22.56	22.29	23.15	22.27
51	22.34	21.99	22.64	22.39	23.32	22.40
52	22.41	22.08	22.73	22.50	23.49	22.55
53	22.48	22.17	22.82	22.62	23.67	22.70
54	22.56	22.27	22.92	22.75	23.85	22.86
55	22.64	22.37	23.02	22.87	24.03	23.02
56	22.72	22.48	23.12	23.01	24.23	23.19
57	22.81	22.59	23.23	23.15	24.42	23.37
58	22.90	22.70	23.35	23.29	24.71	23.56
59	22.99	22.82	23.47	23.44	24.91	23.75
60	23.09	22.94	23.59	23.60	25.13	23.94
61	23.19	23.07	23.72	23.76	25.34	24.15
62	23.30	23.20	23.85	23.92	25.57	24.36
63	23.41	23.34	23.99	24.09	25.79	24.57
64	23.52	23.47	24.13	24.26	26.02	24.79
65	23.64	23.62	24.28	24.44	26.06	25.02
66	23.76	23.76	24.43	24.63	26.30	25.25
67	23.88	23.91	24.58	24.81	26.54	25.49
68	24.01	24.07	24.74	25.01	26.79	25.73
69	24.14	24.22	24.91	25.20	27.04	25.98
70	24.67	24.39	25.48	25.40	27.30	26.23
71	24.81	24.55	25.65	25.61	27.55	26.49
72	24.95	24.72	25.82	25.82	27.82	26.75
73	25.10	24.89	26.00	26.03	28.08	27.02
74	25.24	25.06	26.18	26.24	28.35	27.29
75	25.39	25.24	26.37	26.46	28.62	27.56
76	25.54	25.42	26.56	26.69	28.90	27.84
77	25.70	25.60	26.75	26.91	29.17	28.12
78	25.86	25.78	26.95	27.14	29.45	28.41
79	26.02	25.97	27.15	27.37	29.73	28.70
80	26.18	26.16	27.35	27.61	30.02	28.99
81	26.34	26.35	27.56	27.85	30.31	29.29
82	26.51	26.54	27.77	28.09	30.59	29.58
83	26.68	26.74	27.98	28.33	30.89	29.89
84	26.85	26.94	28.19	28.58	31.18	30.19

85	27.03	27.14	28.41	28.83	31.47	30.50
86	27.21	27.34	28.63	29.08	31.77	30.81
87	27.39	27.55	28.85	29.33	32.07	31.12
88	27.57	27.75	29.08	29.58	32.37	31.43
89	27.75	27.96	29.30	29.84	32.67	31.75
90	27.93	28.17	29.53	30.10	32.97	32.07
91	28.12	28.38	29.76	30.36	33.28	32.39
92	28.31	28.59	29.99	30.62	33.58	32.71
93	28.50	28.80	30.23	30.88	33.89	33.03
94	28.69	29.02	30.47	31.15	34.19	33.36
95	28.88	29.23	30.70	31.41	34.50	33.68
96	29.08	29.45	30.94	31.68	34.81	34.01
97	29.27	29.67	31.18	31.95	35.12	34.34
98	29.47	29.89	31.43	32.21	35.43	34.67
99	29.67	30.11	31.67	32.48	35.74	35.00
100	29.86	30.33	31.92	32.76	36.05	35.33
101	30.06	30.55	32.16	33.03	36.36	35.66
102	30.27	30.77	32.41	33.30	36.67	35.99
103	30.47	30.99	32.66	33.57	36.99	36.32
104	30.67	31.22	32.91	33.84	37.30	36.65
105	30.87	31.44	33.16	34.12	37.61	36.99
106	31.38	31.66	33.71	34.39	38.02	37.32
107	31.58	31.89	33.96	34.67	38.33	37.65
108	31.79	32.11	34.21	34.94	38.65	37.99
109	32.00	32.34	34.47	35.22	38.96	38.32
110	32.20	32.56	34.72	35.49	39.27	38.65
111	32.41	32.79	34.98	35.77	39.58	38.99
112	32.62	33.01	35.23	36.04	39.89	39.32
113	32.83	33.24	35.49	36.32	40.20	39.65
114	33.04	33.46	35.74	36.59	40.51	39.98
115	33.25	33.69	36.00	36.86	40.82	40.31
116	33.45	33.91	36.25	37.14	41.13	40.65
117	33.66	34.14	36.51	37.41	41.44	40.98
118	33.87	34.36	36.77	37.69	41.74	41.30
119	34.08	34.58	37.02	37.96	42.05	41.63
120	34.29	34.81	37.28	38.23	42.36	41.96
121	34.50	35.03	37.54	38.50	42.66	42.29
122	34.71	35.26	37.79	38.78	42.97	42.62
123	34.92	35.48	38.05	39.05	43.27	42.94
124	35.13	35.70	38.30	39.32	43.58	43.27
125	35.34	35.92	38.56	39.59	43.88	43.59
126	35.55	36.15	38.81	39.86	44.18	43.91
127	35.76	36.37	39.07	40.12	44.48	44.23
128	35.97	36.59	39.32	40.39	44.78	44.55
129	36.18	36.81	39.58	40.66	45.08	44.87
130	36.39	37.03	39.83	40.93	45.37	45.19

131	36.60	37.25	40.08	41.19	45.67	45.51
132	36.80	37.46	40.34	41.46	45.96	45.82
133	37.01	37.68	40.59	41.72	46.26	46.14
134	37.22	37.90	40.84	41.98	46.55	46.45
135	37.43	38.11	41.09	42.24	46.84	46.76
136	37.63	38.33	41.34	42.50	47.13	47.07
137	37.84	38.54	41.59	42.76	47.42	47.38
138	38.04	38.76	41.84	43.02	47.71	47.69
139	38.25	38.97	42.09	43.28	48.00	47.99
140	38.45	39.18	42.34	43.53	48.28	48.30
141	38.66	39.40	42.59	43.79	48.56	48.60
142	39.26	39.61	43.23	44.04	48.85	48.90
143	39.46	39.82	43.48	44.30	49.13	49.20
144	39.66	40.02	43.72	44.55	49.41	49.50
145	39.87	40.23	43.97	44.80	49.69	49.80
146	40.07	40.44	44.21	45.05	49.96	50.09
147	40.27	40.64	44.45	45.30	50.24	50.39
148	40.47	40.85	44.69	45.54	50.51	50.68
149	40.66	41.05	44.93	45.79	50.79	50.97
150	40.86	41.26	45.17	46.04	51.06	51.26
151	41.06	41.46	45.41	46.28	51.33	51.55
152	41.26	41.66	45.65	46.52	51.60	51.83
153	41.45	41.86	45.88	46.76	51.87	52.12
154	41.65	42.06	46.12	47.00	52.13	52.40
155	41.84	42.26	46.35	47.24	52.40	52.68
156	42.04	42.46	46.59	47.48	52.66	52.96
157	42.23	42.65	46.82	47.71	52.92	53.24
158	42.42	42.85	47.05	47.95	53.18	53.51
159	42.61	43.04	47.28	48.18	53.44	53.79
160	42.80	43.23	47.51	48.41	53.70	54.06
161	42.99	43.43	47.74	48.64	53.95	54.33
162	43.18	43.62	47.96	48.87	54.21	54.60
163	43.37	43.81	48.19	49.10	54.46	54.87
164	43.55	43.99	48.41	49.32	54.71	55.13
165	43.74	44.18	48.64	49.55	54.96	55.40
166	43.92	44.37	48.86	49.77	55.21	55.66
167	44.11	44.55	49.08	50.00	55.46	55.92
168	44.29	44.74	49.30	50.22	55.70	56.18
169	44.47	44.92	49.52	50.44	55.95	56.44
170	44.66	45.11	49.74	50.66	56.19	56.69
171	44.84	45.29	49.96	50.87	56.43	56.95
172	45.02	45.47	50.17	51.09	56.67	57.20
173	45.19	45.65	50.39	51.30	56.91	57.45
174	45.37	45.82	50.60	51.52	57.14	57.70
175	45.55	46.00	50.81	51.73	57.38	57.94
176	45.72	46.18	51.02	51.94	57.61	58.19

177	45.90	46.35	51.23	52.15	57.84	58.43
178	46.07	46.52	51.44	52.35	58.07	58.68
179	46.25	46.70	51.65	52.56	58.30	58.92
180	46.42	46.87	51.85	52.76	58.53	59.15
181	46.59	47.04	52.06	52.97	58.76	59.39
182	46.76	47.21	52.26	53.17	58.98	59.63
183	46.93	47.38	52.47	53.37	59.20	59.86
184	47.10	47.54	52.67	53.57	59.42	60.09
185	47.27	47.71	52.87	53.77	59.65	60.32
186	47.43	47.87	53.07	53.97	59.86	60.55
187	47.60	48.04	53.27	54.16	60.08	60.78
188	47.76	48.20	53.46	54.35	60.30	61.01
189	47.93	48.36	53.66	54.55	60.51	61.23
190	48.09	48.52	53.85	54.74	60.72	61.45
191	48.25	48.68	54.05	54.93	60.94	61.67
192	48.41	48.84	54.24	55.12	61.15	61.89
193	48.57	49.00	54.43	55.31	61.36	62.11
194	48.73	49.16	54.62	55.49	61.56	62.33
195	48.89	49.31	54.81	55.68	61.77	62.54
196	49.05	49.47	55.00	55.86	61.97	62.75
197	49.20	49.62	55.18	56.04	62.18	62.96
198	49.36	49.77	55.37	56.22	62.38	63.17
199	49.51	49.92	55.55	56.40	62.58	63.38
200	49.66	50.07	55.73	56.58	62.78	63.59
201	49.82	50.22	55.92	56.76	62.98	63.79
202	49.97	50.37	56.10	56.94	63.17	64.00
203	50.12	50.52	56.28	57.11	63.37	64.20
204	50.27	50.66	56.45	57.29	63.56	64.40
205	50.42	50.81	56.63	57.46	63.75	64.60
206	50.56	50.95	56.81	57.63	63.94	64.80
207	50.71	51.10	56.98	57.80	64.13	64.99
208	50.86	51.24	57.16	57.97	64.32	65.19
209	51.00	51.38	57.33	58.14	64.51	65.38
210	51.15	51.52	57.50	58.30	64.69	65.57
211	51.29	51.66	57.67	58.47	64.88	65.76
212	51.43	51.80	57.84	58.63	65.06	65.95
213	51.57	51.93	58.01	58.79	65.24	66.14
214	51.71	52.07	58.18	58.96	65.42	66.33
215	51.85	52.20	58.34	59.12	65.60	66.51
216	51.99	52.34	58.51	59.27	65.78	66.70
217	52.13	52.47	58.67	59.43	65.96	66.88
218	52.27	52.60	58.83	59.59	66.13	67.06
219	52.40	52.74	59.00	59.75	66.31	67.24
220	52.54	52.87	59.16	59.90	66.48	67.41
221	52.67	53.00	59.32	60.05	66.65	67.59
222	52.80	53.12	59.47	60.21	66.82	67.77

223	52.94	53.25	59.63	60.36	66.99	67.94
224	53.07	53.38	59.79	60.51	67.16	68.11
225	53.20	53.50	59.94	60.66	67.33	68.28
226	53.33	53.63	60.10	60.80	67.49	68.45
227	53.46	53.75	60.25	60.95	67.66	68.62
228	53.59	53.88	60.40	61.10	67.82	68.79
229	53.71	54.00	60.55	61.24	67.98	68.96
230	53.84	54.12	60.70	61.38	68.14	69.12
231	53.97	54.24	60.85	61.53	68.30	69.28
232	54.09	54.36	61.00	61.67	68.46	69.45
233	54.21	54.48	61.15	61.81	68.62	69.61
234	54.34	54.60	61.29	61.95	68.78	69.77
235	54.46	54.71	61.44	62.09	68.93	69.92
236	54.58	54.83	61.58	62.22	69.09	70.08
237	54.70	54.94	61.73	62.36	69.24	70.24
238	54.82	55.06	61.87	62.50	69.39	70.39
239	54.94	55.17	62.01	62.63	69.54	70.55
240	55.06	55.28	62.15	62.76	69.69	70.70
241	55.18	55.40	62.29	62.89	69.84	70.85
242	55.29	55.51	62.43	63.03	69.99	71.00
243	55.41	55.62	62.56	63.16	70.14	71.15
244	55.52	55.73	62.70	63.29	70.28	71.30
245	55.64	55.84	62.84	63.41	70.43	71.44
246	55.75	55.94	62.97	63.54	70.57	71.59
247	55.86	56.05	63.10	63.67	70.71	71.73
248	55.98	56.16	63.24	63.79	70.85	71.87
249	56.09	56.26	63.37	63.92	70.99	72.02
250	56.20	56.37	63.50	64.04	71.13	72.16
251	56.31	56.47	63.63	64.16	71.27	72.30
252	56.42	56.57	63.76	64.28	71.41	72.44
253	56.53	56.68	63.89	64.41	71.54	72.57
254	56.63	56.78	64.01	64.52	71.68	72.71
255	56.74	56.88	64.14	64.64	71.81	72.85
256	56.85	56.98	64.26	64.76	71.95	72.98
257	56.95	57.08	64.39	64.88	72.08	73.11
258	57.06	57.18	64.51	64.99	72.21	73.25
259	57.16	57.27	64.63	65.11	72.34	73.38
260	57.26	57.37	64.76	65.22	72.47	73.51
261	57.36	57.47	64.88	65.34	72.60	73.64
262	57.47	57.56	65.00	65.45	72.73	73.76
263	57.57	57.66	65.12	65.56	72.85	73.89
264	57.67	57.75	65.24	65.67	72.98	74.02
265	57.77	57.84	65.35	65.78	73.10	74.14
266	57.87	57.94	65.47	65.89	73.23	74.27
267	57.96	58.03	65.59	66.00	73.35	74.39
268	58.06	58.12	65.70	66.11	73.47	74.51

269	58.16	58.21	65.82	66.22	73.59	74.63
270	58.25	58.30	65.93	66.32	73.71	74.76
271	58.35	58.39	66.04	66.43	73.83	74.87
272	58.44	58.48	66.15	66.53	73.95	74.99
273	58.54	58.57	66.26	66.63	74.07	75.11
274	58.63	58.65	66.37	66.74	74.18	75.23
275	58.72	58.74	66.48	66.84	74.30	75.34
276	58.82	58.83	66.59	66.94	74.41	75.46
277	58.91	58.91	66.70	67.04	74.53	75.57
278	59.00	59.00	66.81	67.14	74.64	75.68
279	59.09	59.08	66.92	67.24	74.75	75.80
280	59.18	59.16	67.02	67.34	74.87	75.91
281	59.27	59.25	67.13	67.43	74.98	76.02
282	59.36	59.33	67.23	67.53	75.09	76.13
283	59.44	59.41	67.33	67.63	75.20	76.24
284	59.53	59.49	67.44	67.72	75.30	76.34
285	59.62	59.57	67.54	67.82	75.41	76.45
286	59.70	59.65	67.64	67.91	75.52	76.56
287	59.79	59.73	67.74	68.00	75.62	76.66
288	59.87	59.81	67.84	68.10	75.73	76.77
289	59.96	59.89	67.94	68.19	75.83	76.87
290	60.04	59.96	68.04	68.28	75.94	76.97
291	60.12	60.04	68.14	68.37	76.04	77.08
292	60.21	60.12	68.23	68.46	76.14	77.18
293	60.29	60.19	68.33	68.55	76.24	77.28
294	60.37	60.27	68.42	68.63	76.35	77.38
295	60.45	60.34	68.52	68.72	76.45	77.48
296	60.53	60.41	68.61	68.81	76.54	77.57
297	60.61	60.49	68.71	68.89	76.64	77.67
298	60.69	60.56	68.80	68.98	76.74	77.77
299	60.77	60.63	68.89	69.06	76.84	77.86
300	61.00	60.70	69.00	69.15	77.13	77.96

ANEXO XIII: Historial de temperaturas experimentales y simuladas durante el escaldado
de cubos de papa de 3x3x3 cm

Tiempo (s)	Escaldado a 70°C	Simulación a 70°C	Escaldado a 80°C	Simulación a 80°C	Escaldado a 90°C	Simulación a 90°C
0	21.58	21.58	21.67	21.67	21.50	21.50
1	21.58	21.58	21.67	21.67	21.50	21.50
2	21.58	21.58	21.67	21.67	21.50	21.50
3	21.58	21.58	21.67	21.67	21.50	21.50
4	21.58	21.58	21.67	21.67	21.50	21.50
5	21.58	21.58	21.65	21.67	21.50	21.50
6	21.58	21.58	21.67	21.67	21.50	21.50
7	21.58	21.58	21.67	21.67	21.50	21.50
8	21.61	21.58	21.67	21.67	21.50	21.50
9	21.65	21.58	21.69	21.67	21.50	21.50
10	21.65	21.58	21.69	21.67	21.50	21.50
11	21.68	21.58	21.71	21.67	21.50	21.50
12	21.75	21.58	21.73	21.67	21.50	21.50
13	21.74	21.58	21.73	21.67	21.50	21.50
14	21.74	21.58	21.73	21.67	21.50	21.50
15	21.81	21.58	21.73	21.67	21.50	21.50
16	21.84	21.58	21.73	21.67	21.50	21.50
17	21.87	21.58	21.73	21.67	21.50	21.50
18	21.96	21.58	21.73	21.67	21.50	21.50
19	21.96	21.58	21.73	21.67	21.50	21.50
20	21.96	21.58	21.73	21.67	21.50	21.50
21	21.96	21.58	21.73	21.67	21.50	21.50
22	21.96	21.58	21.73	21.67	21.50	21.50
23	21.96	21.58	21.73	21.67	21.50	21.50
24	21.96	21.58	21.73	21.67	21.50	21.50
25	21.96	21.58	21.73	21.67	21.50	21.50
26	21.96	21.58	21.73	21.67	21.50	21.50
27	21.96	21.58	21.73	21.67	21.50	21.50
28	21.96	21.58	21.73	21.67	21.50	21.50
29	21.96	21.58	21.73	21.67	21.50	21.50
30	21.96	21.58	21.73	21.67	21.50	21.50
31	21.96	21.58	21.73	21.67	21.50	21.50
32	21.96	21.58	21.73	21.67	21.50	21.50
33	21.96	21.58	21.73	21.67	21.70	21.50
34	21.96	21.58	21.73	21.67	21.70	21.50
35	21.96	21.58	21.73	21.67	21.70	21.50
36	21.96	21.58	21.73	21.67	21.70	21.50
37	21.96	21.58	21.73	21.67	21.70	21.50
38	21.96	21.58	21.73	21.67	21.70	21.50

39	21.97	21.58	21.73	21.67	21.70	21.50
40	21.97	21.58	21.73	21.67	21.70	21.50
41	21.97	21.58	21.73	21.67	21.70	21.50
42	21.97	21.58	21.73	21.67	21.70	21.50
43	21.97	21.58	21.73	21.67	21.70	21.50
44	21.97	21.58	21.73	21.67	21.70	21.50
45	21.97	21.58	21.73	21.67	21.70	21.50
46	21.97	21.58	21.73	21.67	21.71	21.51
47	21.97	21.58	21.73	21.68	21.71	21.51
48	21.97	21.58	21.74	21.68	21.71	21.51
49	21.97	21.59	21.74	21.68	21.71	21.51
50	21.97	21.59	21.74	21.68	21.71	21.51
51	21.97	21.59	21.74	21.68	21.81	21.51
52	21.97	21.59	21.74	21.68	21.82	21.52
53	21.97	21.59	21.74	21.68	21.82	21.52
54	21.98	21.59	21.74	21.69	21.82	21.52
55	21.98	21.59	21.75	21.69	21.82	21.52
56	21.98	21.60	21.75	21.69	21.83	21.53
57	21.98	21.60	21.75	21.69	21.83	21.53
58	21.99	21.60	21.76	21.70	21.84	21.54
59	21.99	21.60	21.76	21.70	21.84	21.54
60	21.99	21.61	21.76	21.70	21.85	21.55
61	21.99	21.61	21.77	21.71	21.85	21.55
62	22.00	21.61	21.77	21.71	21.86	21.56
63	22.00	21.62	21.78	21.72	21.87	21.57
64	22.01	21.62	21.78	21.73	21.87	21.57
65	22.01	21.63	21.79	21.73	21.88	21.58
66	22.02	21.63	21.80	21.74	21.89	21.59
67	22.02	21.64	21.81	21.75	21.90	21.60
68	22.03	21.65	21.81	21.75	21.91	21.61
69	22.04	21.65	21.82	21.76	21.92	21.62
70	22.04	21.66	21.83	21.77	21.93	21.63
71	22.05	21.67	21.84	21.78	21.95	21.65
72	22.06	21.68	21.85	21.79	21.96	21.66
73	22.07	21.68	21.86	21.80	21.97	21.67
74	22.08	21.69	21.87	21.82	21.99	21.69
75	22.09	21.70	21.89	21.83	22.01	21.71
76	22.10	21.71	21.90	21.84	22.02	21.72
77	22.11	21.73	21.91	21.86	22.04	21.74
78	22.12	21.74	21.93	21.87	22.06	21.76
79	22.13	21.75	21.95	21.89	22.08	21.78
80	22.15	21.76	21.96	21.90	22.10	21.80
81	22.16	21.78	21.98	21.92	22.13	21.83
82	22.17	21.79	22.00	21.94	22.25	21.85
83	22.19	21.81	22.02	21.96	22.27	21.87
84	22.21	21.82	22.04	21.98	22.30	21.90

85	22.22	21.84	22.06	22.00	22.32	21.93
86	22.24	21.86	22.08	22.02	22.35	21.96
87	22.26	21.87	22.10	22.05	22.38	21.99
88	22.28	21.89	22.13	22.07	22.41	22.02
89	22.30	21.91	22.15	22.09	22.44	22.05
90	22.32	21.93	22.18	22.12	22.48	22.08
91	22.34	21.96	22.21	22.15	22.51	22.12
92	22.36	21.98	22.24	22.18	22.55	22.15
93	22.39	22.00	22.26	22.21	22.59	22.19
94	22.41	22.03	22.30	22.24	22.63	22.23
95	22.43	22.05	22.33	22.27	22.67	22.27
96	22.46	22.08	22.36	22.30	22.71	22.31
97	22.49	22.10	22.39	22.33	22.75	22.35
98	22.51	22.13	22.43	22.37	22.79	22.40
99	22.54	22.16	22.46	22.40	22.84	22.44
100	22.57	22.19	22.50	22.44	22.89	22.49
101	22.60	22.22	22.54	22.48	22.93	22.54
102	22.63	22.25	22.58	22.52	22.98	22.59
103	22.67	22.28	22.62	22.56	23.04	22.64
104	22.70	22.32	22.66	22.60	23.09	22.69
105	22.73	22.35	22.70	22.64	23.14	22.75
106	22.77	22.38	22.75	22.69	23.20	22.80
107	22.80	22.42	22.79	22.73	23.25	22.86
108	22.84	22.46	22.84	22.78	23.31	22.92
109	22.88	22.50	22.89	22.83	23.37	22.98
110	22.92	22.53	23.41	22.88	23.43	23.04
111	22.96	22.57	23.47	22.92	23.50	23.10
112	23.00	22.61	23.47	22.98	23.56	23.16
113	23.04	22.66	23.54	23.03	23.63	23.23
114	23.08	22.70	23.58	23.08	23.69	23.30
115	23.13	22.74	23.63	23.14	23.76	23.36
116	23.17	22.79	23.65	23.19	23.83	23.43
117	23.22	22.83	23.65	23.25	23.90	23.51
118	23.38	22.88	23.79	23.31	23.97	23.58
119	23.42	22.92	23.78	23.36	24.05	23.65
120	23.47	22.97	23.82	23.42	24.12	23.73
121	23.52	23.02	23.88	23.49	24.20	23.80
122	23.57	23.07	23.86	23.55	24.19	23.88
123	23.62	23.12	24.00	23.61	24.35	23.96
124	23.67	23.17	24.05	23.68	24.42	24.04
125	23.73	23.23	24.07	23.74	24.46	24.12
126	23.78	23.28	24.13	23.81	24.53	24.21
127	23.84	23.34	24.13	23.88	24.55	24.29
128	23.89	23.39	24.28	23.95	24.71	24.38
129	23.95	23.45	24.32	24.02	24.77	24.47
130	24.00	23.50	24.34	24.09	24.81	24.56

131	24.06	23.56	24.40	24.16	24.89	24.65
132	24.12	23.62	24.44	24.23	24.95	24.74
133	24.18	23.68	24.59	24.31	25.11	24.83
134	24.24	23.74	24.63	24.38	25.17	24.92
135	24.30	23.80	24.69	24.46	25.25	25.02
136	24.37	23.87	24.76	24.54	25.33	25.12
137	24.43	23.93	24.76	24.62	25.36	25.21
138	24.49	23.99	24.93	24.70	25.54	25.31
139	24.56	24.06	24.99	24.78	25.63	25.41
140	24.62	24.12	25.06	24.86	25.71	25.51
141	24.69	24.19	25.10	24.94	25.78	25.62
142	24.76	24.26	25.15	25.03	25.84	25.72
143	24.83	24.33	25.30	25.11	26.01	25.83
144	24.90	24.40	25.37	25.20	26.10	25.93
145	24.97	24.47	25.42	25.28	26.17	26.04
146	25.04	24.54	25.50	25.37	26.28	26.15
147	25.11	24.61	25.55	25.46	26.35	26.26
148	25.18	24.68	25.72	25.55	26.54	26.37
149	25.25	24.75	25.80	25.64	26.63	26.48
150	25.33	24.83	25.85	25.73	26.71	26.59
151	25.40	24.90	25.94	25.82	26.82	26.70
152	25.48	24.98	25.99	25.92	26.89	26.82
153	25.55	25.05	26.14	26.01	27.07	26.93
154	25.63	25.13	26.24	26.10	27.18	27.05
155	25.70	25.20	26.31	26.20	27.28	27.17
156	25.78	25.28	26.40	26.30	27.40	27.29
157	25.86	25.36	26.46	26.39	27.47	27.41
158	25.94	25.44	26.62	26.49	27.65	27.53
159	26.02	25.52	26.71	26.59	27.77	27.65
160	26.10	25.60	26.79	26.69	27.87	27.77
161	26.18	25.68	26.89	26.79	27.99	27.89
162	26.26	25.76	26.92	26.89	28.05	28.02
163	26.34	25.84	27.12	26.99	28.27	28.14
164	26.43	25.93	27.22	27.09	28.39	28.27
165	26.51	26.01	27.30	27.20	28.50	28.39
166	26.60	26.10	27.42	27.30	28.64	28.52
167	26.68	26.18	27.48	27.41	28.72	28.65
168	26.77	26.27	27.64	27.51	28.91	28.78
169	26.85	26.35	27.74	27.62	29.03	28.91
170	26.94	26.44	27.83	27.72	29.14	29.04
171	27.02	26.52	27.95	27.83	29.29	29.17
172	27.11	26.61	28.01	27.94	29.37	29.30
173	27.20	26.70	28.18	28.05	29.56	29.43
174	27.29	26.79	28.30	28.16	29.71	29.57
175	27.38	26.88	28.39	28.27	29.82	29.70
176	27.47	26.97	28.49	28.38	29.95	29.83

177	27.56	27.06	28.56	28.49	30.04	29.97
178	27.65	27.15	28.76	28.60	30.27	30.11
179	27.74	27.24	28.87	28.71	30.40	30.24
180	27.83	27.33	28.98	28.82	30.54	30.38
181	27.92	27.42	29.07	28.94	30.65	30.52
182	28.01	27.51	29.16	29.05	30.76	30.65
183	28.11	27.61	29.37	29.16	31.00	30.79
184	28.20	27.70	29.44	29.28	31.09	30.93
185	28.29	27.79	29.55	29.39	31.23	31.07
186	28.39	27.89	29.68	29.51	31.38	31.21
187	28.48	27.98	29.73	29.62	31.46	31.35
188	28.58	28.08	29.94	29.74	31.70	31.50
189	28.67	28.17	30.05	29.86	31.83	31.64
190	28.77	28.27	30.17	29.97	31.97	31.78
191	28.86	28.36	30.30	30.09	32.13	31.92
192	28.96	28.46	30.35	30.21	32.21	32.07
193	29.05	28.55	30.57	30.33	32.45	32.21
194	29.15	28.65	30.66	30.45	32.57	32.35
195	29.25	28.75	30.78	30.57	32.71	32.50
196	29.35	28.85	30.92	30.69	32.87	32.64
197	29.54	28.94	30.99	30.81	32.98	32.79
198	29.64	29.04	31.19	30.93	33.20	32.93
199	29.74	29.14	31.31	31.05	33.34	33.08
200	29.84	29.24	31.43	31.17	33.49	33.23
201	29.94	29.34	31.56	31.29	33.65	33.37
202	30.04	29.44	31.64	31.41	33.75	33.52
203	30.14	29.54	31.84	31.53	33.98	33.67
204	30.24	29.64	31.96	31.65	34.13	33.82
205	30.34	29.74	32.06	31.78	34.25	33.96
206	30.44	29.84	32.18	31.90	34.40	34.11
207	30.54	29.94	32.27	32.02	34.50	34.26
208	30.64	30.04	32.51	32.14	34.77	34.41
209	30.74	30.14	32.63	32.27	34.92	34.56
210	30.84	30.24	32.75	32.39	35.07	34.71
211	30.94	30.34	32.88	32.52	35.22	34.86
212	31.04	30.44	32.94	32.64	35.31	35.01
213	31.14	30.54	33.18	32.76	35.58	35.16
214	31.24	30.64	33.31	32.89	35.73	35.31
215	31.35	30.75	33.39	33.01	35.84	35.46
216	31.45	30.85	33.54	33.14	36.01	35.61
217	31.55	30.95	33.59	33.26	36.08	35.76
218	31.65	31.05	33.81	33.39	36.33	35.91
219	31.76	31.16	33.94	33.51	36.48	36.06
220	31.86	31.26	34.07	33.64	36.64	36.21
221	31.96	31.36	34.22	33.76	36.81	36.36
222	32.06	31.46	34.28	33.89	36.90	36.51

223	32.17	31.57	34.47	34.02	37.12	36.66
224	32.27	31.67	34.62	34.14	37.29	36.81
225	32.37	31.77	34.75	34.27	37.45	36.97
226	32.48	31.88	34.86	34.39	37.58	37.12
227	32.58	31.98	34.95	34.52	37.70	37.27
228	32.68	32.08	35.18	34.65	37.95	37.42
229	32.79	32.19	35.29	34.77	38.09	37.57
230	32.89	32.29	35.40	34.90	38.23	37.72
231	32.99	32.39	35.55	35.03	38.40	37.87
232	33.10	32.50	35.63	35.15	38.50	38.03
233	33.20	32.60	35.84	35.28	38.74	38.18
234	33.31	32.71	35.97	35.41	38.90	38.33
235	33.41	32.81	36.09	35.53	39.04	38.48
236	33.51	32.91	36.22	35.66	39.19	38.63
237	33.62	33.02	36.29	35.79	39.29	38.79
238	33.72	33.12	36.53	35.91	39.55	38.94
239	33.83	33.23	36.64	36.04	39.69	39.09
240	33.93	33.33	36.76	36.17	39.83	39.24
241	34.04	33.44	36.89	36.29	39.99	39.39
242	34.14	33.54	36.97	36.42	40.09	39.54
243	34.24	33.64	37.20	36.55	40.35	39.70
244	34.35	33.75	37.34	36.67	40.52	39.85
245	34.45	33.85	37.44	36.80	40.64	40.00
246	34.56	33.96	37.55	36.93	40.78	40.15
247	34.66	34.06	37.65	37.05	40.90	40.30
248	34.76	34.16	37.87	37.18	41.14	40.45
249	34.87	34.27	37.99	37.31	41.29	40.60
250	34.97	34.37	38.13	37.43	41.45	40.75
251	35.08	34.48	38.23	37.56	41.57	40.91
252	35.18	34.58	38.30	37.69	41.68	41.06
253	35.28	34.68	38.50	37.81	41.90	41.21
254	35.39	34.79	38.64	37.94	42.06	41.36
255	35.49	34.89	38.74	38.06	42.19	41.51
256	35.60	35.00	38.88	38.19	42.35	41.66
257	35.70	35.10	38.98	38.32	42.48	41.81
258	35.80	35.20	39.19	38.44	42.70	41.96
259	35.91	35.31	39.33	38.57	42.87	42.11
260	36.01	35.41	39.43	38.69	42.99	42.26
261	36.11	35.51	39.55	38.82	43.14	42.41
262	36.22	35.62	39.63	38.95	43.24	42.56
263	36.32	35.72	39.84	39.07	43.47	42.71
264	36.42	35.82	39.98	39.20	43.64	42.85
265	36.53	35.93	40.10	39.32	43.78	43.00
266	36.63	36.03	40.20	39.45	43.91	43.15
267	36.73	36.13	40.29	39.57	44.02	43.30
268	36.84	36.24	40.49	39.70	44.24	43.45

269	36.94	36.34	40.64	39.82	44.41	43.60
270	37.04	36.44	40.74	39.94	44.54	43.74
271	37.15	36.55	40.90	40.07	44.73	43.89
272	37.25	36.65	40.93	40.19	44.78	44.04
273	37.35	36.75	41.13	40.32	45.00	44.19
274	37.45	36.85	41.26	40.44	45.15	44.33
275	37.55	36.95	41.38	40.56	45.30	44.48
276	37.66	37.06	41.53	40.69	45.47	44.63
277	37.76	37.16	41.60	40.81	45.56	44.77
278	37.86	37.26	41.80	40.93	45.79	44.92
279	37.96	37.36	41.91	41.06	45.92	45.07
280	38.06	37.46	42.04	41.18	46.07	45.21
281	38.16	37.56	42.14	41.30	46.20	45.36
282	38.27	37.67	42.23	41.43	46.31	45.50
283	38.37	37.77	42.44	41.55	46.54	45.65
284	38.47	37.87	42.55	41.67	46.67	45.79
285	38.57	37.97	42.63	41.79	46.78	45.93
286	38.67	38.07	42.78	41.91	46.95	46.08
287	38.77	38.17	42.87	42.04	47.06	46.22
288	38.87	38.27	43.06	42.16	47.27	46.37
289	38.97	38.37	43.15	42.28	47.38	46.51
290	39.07	38.47	43.28	42.40	47.53	46.65
291	39.17	38.57	43.43	42.52	47.70	46.80
292	39.27	38.67	43.46	42.64	47.75	46.94
293	39.37	38.77	43.65	42.76	47.97	47.08
294	39.47	38.87	43.80	42.88	48.14	47.22
295	39.57	38.97	43.89	43.00	48.25	47.36
296	39.67	39.07	44.00	43.12	48.38	47.50
297	39.77	39.17	44.09	43.24	48.49	47.65
298	39.87	39.27	44.28	43.36	48.71	47.79
299	39.96	39.36	44.39	43.48	48.84	47.93
300	40.10	39.46	44.55	43.60	49.02	48.07

ANEXO XIV: Historial de temperaturas experimentales y simuladas durante el escaldado de cubos de loche y de papa de 3x3x3 cm en el nodo (10, 1, 1)

Tiempo (s)	Escaldado de loche a 90°C	Simulación a 90°C	Escaldado de papa a 90°C	Simulación a 90°C
0	21.50	21.50	21.20	21.20
1	21.50	21.50	21.20	21.20
2	21.50	21.50	21.20	21.20
3	21.50	21.50	21.20	21.20
4	21.50	21.50	21.20	21.20
5	21.50	21.50	21.20	21.20
6	21.50	21.50	21.20	21.20
7	21.50	21.50	21.20	21.20
8	21.50	21.50	21.20	21.20
9	21.50	21.50	21.20	21.20
10	21.50	21.50	21.20	21.20
11	21.50	21.50	21.20	21.20
12	21.50	21.50	21.20	21.20
13	21.50	21.50	21.20	21.20
14	21.51	21.51	21.20	21.20
15	21.51	21.51	21.21	21.21
16	21.52	21.52	21.21	21.21
17	21.52	21.52	21.21	21.21
18	21.53	21.53	21.22	21.22
19	21.54	21.54	21.22	21.22
20	21.55	21.55	21.23	21.23
21	21.57	21.57	21.24	21.24
22	21.59	21.59	21.25	21.25
23	21.61	21.61	21.26	21.26
24	21.64	21.64	21.28	21.28
25	21.67	21.67	21.30	21.30
26	21.70	21.70	21.32	21.32
27	21.73	21.73	21.34	21.34
28	21.77	21.77	21.37	21.37
29	21.82	21.82	21.39	21.39
30	21.86	21.86	21.42	21.42
31	21.91	21.91	21.46	21.46
32	21.97	21.97	21.50	21.50
33	22.02	22.02	21.53	21.53
34	22.08	22.08	21.58	21.58
35	22.15	22.15	21.62	21.62
36	22.22	22.22	21.67	21.67
37	22.29	22.29	21.72	21.72
38	22.36	22.36	21.78	21.78

39	22.44	22.44	21.83	21.83
40	22.52	22.52	21.89	21.89
41	22.60	22.60	21.95	21.95
42	22.69	22.69	22.02	22.02
43	22.78	22.78	22.08	22.08
44	22.87	22.87	22.15	22.15
45	22.96	22.96	22.23	22.23
46	23.06	23.06	22.30	22.30
47	23.16	23.16	22.38	22.38
48	23.26	23.26	22.45	22.45
49	23.36	23.36	22.53	22.53
50	23.47	23.47	22.62	22.62
51	23.58	23.58	22.70	22.70
52	23.69	23.69	22.79	22.79
53	23.80	23.80	22.88	22.88
54	23.83	23.91	22.97	22.97
55	23.95	24.03	23.06	23.06
56	24.07	24.15	23.15	23.15
57	24.18	24.27	23.25	23.25
58	24.30	24.39	23.35	23.35
59	24.42	24.51	23.45	23.45
60	24.54	24.63	23.55	23.55
61	24.66	24.76	23.65	23.65
62	24.79	24.89	23.75	23.75
63	24.92	25.02	23.86	23.86
64	25.05	25.15	23.96	23.96
65	25.18	25.28	24.07	24.07
66	25.31	25.41	24.18	24.18
67	25.45	25.55	24.29	24.29
68	25.58	25.68	24.40	24.40
69	25.72	25.82	24.51	24.51
70	25.86	25.96	24.63	24.63
71	25.99	26.09	24.74	24.74
72	26.13	26.23	24.86	24.86
73	26.28	26.38	24.97	24.97
74	26.39	26.52	25.09	25.09
75	26.53	26.66	25.21	25.21
76	26.67	26.81	25.33	25.33
77	26.81	26.95	25.45	25.45
78	26.96	27.10	25.57	25.57
79	27.08	27.25	25.70	25.70
80	27.22	27.39	25.82	25.82
81	27.37	27.54	25.94	25.94
82	27.52	27.69	26.07	26.07
83	27.68	27.85	26.20	26.20
84	27.83	28.00	26.32	26.32

85	27.98	28.15	26.45	26.45
86	28.13	28.30	26.58	26.58
87	28.29	28.46	26.71	26.71
88	28.60	28.61	26.84	26.84
89	28.80	28.77	26.97	26.97
90	29.10	28.93	27.10	27.10
91	29.26	29.09	27.24	27.24
92	29.41	29.24	27.37	27.37
93	29.57	29.40	27.50	27.50
94	29.73	29.56	27.64	27.64
95	29.89	29.72	27.78	27.78
96	30.05	29.88	27.91	27.91
97	30.25	30.05	28.05	28.05
98	30.41	30.21	28.19	28.19
99	30.57	30.37	28.32	28.32
100	30.74	30.54	28.46	28.46
101	30.90	30.70	28.60	28.60
102	31.06	30.86	28.74	28.74
103	31.23	31.03	28.88	28.88
104	31.40	31.20	29.02	29.02
105	31.56	31.36	29.17	29.17
106	31.73	31.53	29.31	29.31
107	31.90	31.70	29.45	29.45
108	32.06	31.86	29.59	29.59
109	32.23	32.03	29.74	29.74
110	32.40	32.20	29.88	29.88
111	32.57	32.37	30.03	30.03
112	32.74	32.54	30.17	30.17
113	33.01	32.71	30.32	30.32
114	33.18	32.88	30.46	30.46
115	33.35	33.05	30.61	30.61
116	33.52	33.22	30.66	30.76
117	33.69	33.39	30.80	30.90
118	33.87	33.57	30.95	31.05
119	34.04	33.74	31.10	31.20
120	34.21	33.91	31.25	31.35
121	34.38	34.08	31.40	31.50
122	34.56	34.26	31.55	31.65
123	34.73	34.43	31.70	31.80
124	34.90	34.60	31.85	31.95
125	35.08	34.78	32.00	32.10
126	35.25	34.95	32.15	32.25
127	35.42	35.12	32.30	32.40
128	35.60	35.30	32.45	32.55
129	35.77	35.47	32.60	32.70
130	35.95	35.65	32.75	32.85

131	36.12	35.82	32.91	33.01
132	36.30	36.00	33.06	33.16
133	36.47	36.17	33.21	33.31
134	36.65	36.35	33.26	33.46
135	36.82	36.52	33.42	33.62
136	37.00	36.70	33.57	33.77
137	37.17	36.87	33.72	33.92
138	37.35	37.05	33.88	34.08
139	37.52	37.22	34.03	34.23
140	37.70	37.40	34.18	34.38
141	37.87	37.57	34.34	34.54
142	38.05	37.75	34.49	34.69
143	38.22	37.92	34.65	34.85
144	38.40	38.10	34.80	35.00
145	38.57	38.27	34.96	35.16
146	38.75	38.45	35.11	35.31
147	38.92	38.62	35.27	35.47
148	39.10	38.80	35.42	35.62
149	39.27	38.97	35.58	35.78
150	39.45	39.15	35.73	35.93
151	39.63	39.33	35.89	36.09
152	39.90	39.50	36.04	36.24
153	40.07	39.67	36.20	36.40
154	40.25	39.85	36.36	36.56
155	40.42	40.02	36.41	36.71
156	40.60	40.20	36.57	36.87
157	40.77	40.37	36.72	37.02
158	40.95	40.55	36.88	37.18
159	41.12	40.72	37.03	37.33
160	41.30	40.90	37.19	37.49
161	41.47	41.07	37.35	37.65
162	41.64	41.24	37.50	37.80
163	41.82	41.42	37.66	37.96
164	41.99	41.59	37.81	38.11
165	42.16	41.76	37.97	38.27
166	42.34	41.94	38.12	38.42
167	42.51	42.11	38.28	38.58
168	42.68	42.28	38.43	38.73
169	42.85	42.45	38.59	38.89
170	43.02	42.62	38.75	39.05
171	43.20	42.80	38.90	39.20
172	43.37	42.97	39.06	39.36
173	43.54	43.14	39.21	39.51
174	43.71	43.31	39.37	39.67
175	43.88	43.48	39.52	39.82
176	44.05	43.65	39.68	39.98

177	44.22	43.82	39.83	40.13
178	44.39	43.99	39.99	40.29
179	44.56	44.16	40.14	40.44
180	44.73	44.33	40.19	40.59
181	44.90	44.50	40.35	40.75
182	45.07	44.67	40.50	40.90
183	45.23	44.83	40.66	41.06
184	45.40	45.00	40.81	41.21
185	45.57	45.17	40.96	41.36
186	45.74	45.34	41.12	41.52
187	45.90	45.50	41.27	41.67
188	46.07	45.67	41.42	41.82
189	46.24	45.84	41.58	41.98
190	46.40	46.00	41.73	42.13
191	46.57	46.17	41.88	42.28
192	46.73	46.33	42.04	42.44
193	46.90	46.50	42.19	42.59
194	47.06	46.66	42.34	42.74
195	47.23	46.83	42.49	42.89
196	47.39	46.99	42.64	43.04
197	47.55	47.15	42.79	43.19
198	47.72	47.32	42.95	43.35
199	47.88	47.48	43.10	43.50
200	48.04	47.64	43.25	43.65
201	48.20	47.80	43.40	43.80
202	48.36	47.96	43.55	43.95
203	48.53	48.13	43.70	44.10
204	48.69	48.29	43.85	44.25
205	48.85	48.45	44.00	44.40
206	49.01	48.61	44.05	44.55
207	49.17	48.77	44.20	44.70
208	49.32	48.92	44.34	44.84
209	49.48	49.08	44.49	44.99
210	49.64	49.24	44.64	45.14
211	49.80	49.40	44.79	45.29
212	49.96	49.56	44.94	45.44
213	50.11	49.71	45.08	45.58
214	50.27	49.87	45.23	45.73
215	50.43	50.03	45.38	45.88
216	50.58	50.18	45.53	46.03
217	50.74	50.34	45.67	46.17
218	50.89	50.49	45.82	46.32
219	51.05	50.65	45.96	46.46
220	51.20	50.80	46.11	46.61
221	51.35	50.95	46.25	46.75
222	51.51	51.11	46.40	46.90

223	51.66	51.26	46.54	47.04
224	51.81	51.41	46.69	47.19
225	51.96	51.56	46.83	47.33
226	52.11	51.71	46.98	47.48
227	52.26	51.86	47.12	47.62
228	52.41	52.01	47.26	47.76
229	52.56	52.16	47.40	47.90
230	52.71	52.31	47.55	48.05
231	52.96	52.46	47.69	48.19
232	53.11	52.61	47.83	48.33
233	53.26	52.76	47.97	48.47
234	53.41	52.91	48.11	48.61
235	53.55	53.05	48.25	48.75
236	53.70	53.20	48.39	48.89
237	53.85	53.35	48.53	49.03
238	53.99	53.49	48.67	49.17
239	54.14	53.64	48.81	49.31
240	54.28	53.78	48.95	49.45
241	54.43	53.93	49.19	49.59
242	54.57	54.07	49.33	49.73
243	54.71	54.21	49.47	49.87
244	54.86	54.36	49.61	50.01
245	55.00	54.50	49.74	50.14
246	55.14	54.64	49.88	50.28
247	55.28	54.78	50.02	50.42
248	55.42	54.92	50.15	50.55
249	55.56	55.06	50.29	50.69
250	55.70	55.20	50.43	50.83
251	55.84	55.34	50.56	50.96
252	55.98	55.48	50.70	51.10
253	56.12	55.62	50.83	51.23
254	56.26	55.76	50.97	51.37
255	56.50	55.90	51.10	51.50
256	56.63	56.03	51.23	51.63
257	56.77	56.17	51.37	51.77
258	56.91	56.31	51.50	51.90
259	57.04	56.44	51.63	52.03
260	57.18	56.58	51.76	52.16
261	57.31	56.71	51.90	52.30
262	57.45	56.85	52.03	52.43
263	57.58	56.98	52.16	52.56
264	57.71	57.11	52.29	52.69
265	57.85	57.25	52.42	52.82
266	57.98	57.38	52.55	52.95
267	58.11	57.51	52.68	53.08
268	58.24	57.64	52.81	53.21

269	58.38	57.78	53.04	53.34
270	58.51	57.91	53.16	53.46
271	58.64	58.04	53.29	53.59
272	58.77	58.17	53.42	53.72
273	58.90	58.30	53.55	53.85
274	59.02	58.42	53.68	53.98
275	59.15	58.55	53.80	54.10
276	59.28	58.68	53.93	54.23
277	59.41	58.81	54.05	54.35
278	59.53	58.93	54.18	54.48
279	59.66	59.06	54.30	54.60
280	59.79	59.19	54.43	54.73
281	59.91	59.31	54.55	54.85
282	60.04	59.44	54.68	54.98
283	60.16	59.56	54.80	55.10
284	60.29	59.69	54.93	55.23
285	60.41	59.81	55.05	55.35
286	60.53	59.93	55.17	55.47
287	60.66	60.06	55.29	55.59
288	60.78	60.18	55.42	55.72
289	60.90	60.30	55.54	55.84
290	61.02	60.42	55.66	55.96
291	61.14	60.54	55.78	56.08
292	61.26	60.66	55.90	56.20
293	61.38	60.78	56.02	56.32
294	61.50	60.90	56.14	56.44
295	61.62	61.02	56.26	56.56
296	61.74	61.14	56.38	56.68
297	61.86	61.26	56.50	56.80
298	61.98	61.38	56.61	56.91
299	62.10	61.50	56.73	57.03
300	62.21	61.61	56.85	57.15