



# Universidad Austral de Chile

Facultad de Ciencias Agrarias  
Escuela de Ingeniería en Alimentos

## **Determinación de la difusividad térmica en Pasta de Murta (*Ugni molinae Turcz*), en función de la temperatura**

Tesis presentada como parte de los  
requisitos para optar al grado de  
Licenciado en Ingeniería en  
Alimentos

**Juan Carlos Muñoz Vera**

Valdivia Chile 2002

*A mis padres que con su gran Amor y Fé siempre estuvieron apoyándome  
durante todo el transcurso de mi carrera*

*Gracias a mi profesor Kong Shun por su apoyo y consejos*

*A Hellen que con su amor, comprensión y paciencia le dio sentido  
a la elaboración del presente trabajo*

*A los chicos de Villa que compartimos juntos un gran tiempo de la vida universitaria*

*A mis Hermanas, Manita y Tutty que me acompañaron en la etapa culmine de mi  
carrera*

**PROFESOR PATROCINANTE**

Sr. Kong Shun Ah-Hen  
Ingeniero en Alimentos, (Dipl. Ing)  
Doctor en Ingeniería  
Instituto de Ciencia y Tecnología de los Alimentos



**PROFESORES INFORMANTES**

Sr. Erwin Carrasco Ruiz  
Ingeniero Civil Químico  
Instituto de Ciencia y Tecnología de los Alimentos



Sr. Elton F. Morales Blancas  
Ingeniero en Industrias Alimentarias, Mg/Sc.  
Instituto de ciencias y Tecnología de los Alimentos



## INDICE DE MATERIAS

<b>Capítulo</b>		<b>página</b>
1	INTRODUCCIÓN	1
2	REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA	3
2.1	Transferencia de calor	3
2.1.1	Mecanismos de transferencia de calor	3
2.1.1.1	Conducción	4
2.1.1.2	Convección	5
2.1.1.3	Radiación	5
2.1.2	Método de transferencia de calor en estado estacionario	6
2.1.3	Método de Transferencia de calor en estado no estacionario	6
2.2	Flujo de calor en estado no estacionario	7
2.3	Propiedades termofísicas	11
2.3.1	Conductividad térmica	13
2.3.2	Difusividad térmica	14
2.3.3	Calor específico	16
2.4	Características generales de la murta	16
3	MATERIAL Y MÉTODO	19
3.1	Lugar de ensayo	19
3.2	Materiales	19
3.2.1	Materia prima	19
3.2.2	Equipos e instrumentos	20
3.3	Metodología	20

3.3.1	Determinación de humedad	21
3.3.2	Determinación de densidad	22
3.3.3	Determinación de sólidos solubles	22
3.4	Procedimiento experimental	23
3.4.1	Estimación del efecto de convección en la medición	24
3.4.2	Equipo de medición	25
3.4.3	Medición y evaluación	27
4	PRESENTACIÓN Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS	30
4.1	Características de la materia prima	30
4.1.1	Humedad	31
4.1.2	Densidad	35
4.1.3	Sólidos solubles	37
4.2	Determinación de la difusividad térmica	38
4.2.1	Medición de la difusividad térmica en soluciones de sacarosa	39
4.2.2	Evaluación en pasta de murta en los diferentes tratamientos térmicos	43
4.2.3	Comportamiento de la difusividad térmica frente a la variación de la temperatura no conseguida	51
4.2.4	Evaluación de la difusividad térmica en función de la temperatura	57
4.2.5	Evaluación del comportamiento que experimenta la velocidad de transferencia de calor de la murta en los tratamientos térmicos	60
5	CONCLUSIONES	66
6	RESUMEN	69
	SUMMARY	71
7	BIBLIOGRAFÍA	72
8	ANEXOS	76

**INDICE DE CUADROS**

<b>Cuadro</b>		<b>página</b>
1	Valores de las variables $B_n$ y $J_1(B_n)$	10
2	Difusividad térmica de algunos frutos y vegetales	16
3	Diseño experimental para la determinación de la difusividad térmica en pasta de murta	24
4	Diseño experimental para la estimación de la difusividad térmica en soluciones de sacarosa	25
5	Contenido de humedad en murta fresca y congelada	31
6	Humedad promedio de las muestras en los tratamientos	32
7	Disminución del contenido de humedad para tres diferentes temperaturas de almacenamiento	34
8	Densidad promedio de las muestras en los tratamientos	35
9	Sólidos solubles promedio de las muestras en los tratamientos	37
10	Difusividad térmica promedio en soluciones de sacarosa	39
11	Propiedades termofísicas para soluciones de sacarosa	40
12	Comparación de valores de medición experimentales y de literatura para difusividad térmica en soluciones de sacarosa	40
13	Diferencias de temperatura iniciales y finales	43
14	Valores experimentales de difusividad térmica promedio en pasta de murta	50
15	Comparación de difusividad térmica efectiva de la pasta de murta con valores calculados a partir de modelos matemáticos	59

## INDICE DE FIGURAS

<b>Figura</b>		<b>página</b>
1	Flor y fruto de la murta ( <i>Ugni molinae</i> Turcz)	17
2	Murta ( <i>Ugni molinae</i> Turcz) como materia prima	19
3	Dimensiones del tubo de cobre utilizado para la experiencia	26
4	Equipo utilizado para la obtención del perfil térmico	27
5	Humedad promedio de las muestras utilizadas para cada tratamiento térmico	33
6	Disminución del contenido relativo de humedad en pasta de murta referida al lote 1	33
7	Densidad promedio de las muestras utilizadas para cada tratamiento térmico	36
8	Sólidos solubles promedio de las muestras para cada tratamiento térmico	37
9	Linealización de los perfiles térmicos correspondientes al tratamiento de 60 °C	44
10	Linealización de los perfiles térmicos correspondientes al tratamiento de 65 °C	45
11	Linealización de los perfiles térmicos correspondientes al tratamiento de 70 °C	45
12	Linealización de los perfiles térmicos correspondientes al tratamiento de 75 °C	46
13	Linealización de los perfiles térmicos correspondientes al tratamiento de 80 °C	46
14	Linealización de los perfiles térmicos correspondientes al tratamiento de 85 °C	47

15	Linealización de los perfiles térmicos correspondientes al tratamiento de 90 °C	47
16	Comportamiento de la difusividad térmica en función de la variación de la temperatura no conseguida a 60 °C	52
17	Comportamiento de la difusividad térmica en función de la variación de la temperatura no conseguida a 65 °C	53
18	Comportamiento de la difusividad térmica en función de la variación de la temperatura no conseguida a 70 °C	53
19	Comportamiento de la difusividad térmica en función de la variación de la temperatura no conseguida a 75 °C	54
20	Comportamiento de la difusividad térmica en función de la variación de la temperatura no conseguida a 80 °C	54
21	Comportamiento de la difusividad térmica en función de la variación de la temperatura no conseguida a 85 °C	55
22	Comportamiento de la difusividad térmica en función de la variación de la temperatura no conseguida a 90 °C	55
23	Variación de la difusividad térmica en función del tratamiento térmico en la pasta de murta	57
24	Variación de la difusividad térmica durante el tratamiento a 60 °C	61
25	Comportamiento de la difusividad térmica durante el tratamiento a 65 °C	61
26	Variación de la difusividad térmica durante el tratamiento a 70 °C	62
27	Comportamiento de la difusividad térmica durante el tratamiento a 75 °C	62
28	Variación de la difusividad térmica durante el tratamiento a 80 °C	63
29	Comportamiento de la difusividad térmica durante el tratamiento a 85 °C	63
30	Variación de la difusividad térmica durante el tratamiento a 90 °C	64
A-13.1	Perfil térmico registrado en el tratamiento a 60 °C	86
A-13.2	Perfil térmico registrado en el tratamiento a 65 °C	86

A-13.3	Perfil térmico registrado en el tratamiento a 70 °C	87
A-13.4	Perfil térmico registrado en el tratamiento a 75 °C	87
A-13.5	Perfil térmico registrado en el tratamiento a 80 °C	88
A-13.6	Perfil térmico registrado en el tratamiento a 85 °C	88
A-13.7	Perfil térmico registrado en el tratamiento a 90 °C	89

**INDICE DE ANEXOS**

<b>Anexo</b>		<b>página</b>
1	Calibración refractómetro digital	77
2	Contenido de humedad en pasta de murta en tres repeticiones	78
3	Densidad de pasta de murta en tres repeticiones	79
4	Contenido de sólidos solubles medidos como °Brix en pasta de murta	80
5	Valores de difusividad térmica en soluciones de sacarosa	81
6	Análisis de varianza para humedad	82
7	Análisis de varianza para densidad	82
8	Análisis de varianza para sólidos solubles	83
9	Análisis de varianza para las experiencias en soluciones de sacarosa	83
10	Análisis de varianza para todos los tratamientos térmicos en pasta de murta	84
11	Prueba rango Múltiple Tukey HSD para valores de difusividad térmica en pasta de murta	84
12	Valores de difusividad térmica para todas las repeticiones en pasta de murta	85
13	Perfiles térmicos iniciales para todos los tratamientos y repeticiones, con la demarcación de los gradientes inicial y final utilizados	86
14	Curva de relación difusividad térmica en función de la temperatura para agua	89
15	Propiedades termofísicas del agua	90

16	Variación promedio de la difusividad térmica de la pasta de murta en intervalos de 10 K, para los siete tratamientos térmicos	91
----	---	----

## NOMENCLATURA

Símbolo	Descripción	Unidad
$a_T$	Difusividad térmica	$m^2/s$
$F_o$	Número de Fourier	-----
$c_p$	Calor específico	J / Kg K
$T_m$	Temperatura del medio de calentamiento	$^{\circ}C$
$T_o$	Temperatura inicial de la murta en el centro térmico	$^{\circ}C$
$T$	Temperatura del centro térmico en el instante t	$^{\circ}C$
$r$	Radio del cilindro	m
$\dot{q}$	Densidad de flujo de calor	$W / m^2$
$\dot{Q}$	Flujo de calor	W
$\lambda$	Conductividad térmica	W/ m K
$\rho$	Densidad	$g / cm^3$

### Subíndice

m	Medio circundante
max	Máximo (referido a la fuerza impulsora)

## 1. INTRODUCCION

La transferencia de calor es una operación unitaria muy importante en la industria de alimentos. En prácticamente todos los procesos involucrando alimentos ocurre una entrada o una remoción de calor, que tiene como consecuencia la modificación de características físicas, químicas o de almacenamiento del alimento. En el almacenamiento, por ejemplo de frutas frescas, vegetales, carnes y productos lácteos, se remueve el calor bajando así la temperatura de estos productos con el objeto de aumentar el tiempo de vida útil. Para manejar sistemáticamente la transferencia de calor es necesario conocer las propiedades termofísicas de los alimentos, entre las cuales se tienen la capacidad calorífica, la entalpía, la conductividad y difusividad térmica, que son datos básicos utilizados en el diseño y simulación de procesos de transferencia de calor en la ingeniería de alimentos (enfriamiento, calentamiento, secado, congelamiento, etc.). Debido a la larga diversidad de alimentos con diferencias en composición, textura, variedad, y otros, se necesitan de técnicas rápidas y exactas para lograr medir estas propiedades termofísicas. En general, la composición, la densidad másica y la temperatura son los factores o condiciones de proceso que afectan principalmente estas propiedades térmicas.

El objetivo de este trabajo es hacer una contribución a la caracterización de la murta como materia prima para su procesamiento a escala industrial, donde la transferencia de calor es imprescindible, asimismo obtener el valor de la difusividad térmica para conocer como es el comportamiento de la propagación de calor en la murta. Puede ser útil también en optimizar los procesos de

elaboración de la misma, o en el diseño de procesos y equipos industriales apropiados para lograr un consumo reducido de energía.

## **Objetivos**

Basándose en los antecedentes expuestos el objetivo general es:

Conocer la velocidad de transferencia de calor en pasta de murta a través de la determinación de la difusividad térmica en función de la temperatura.

Los objetivos específicos son:

- Seleccionar el método apropiado, en literatura, para la medición de la difusividad térmica en pasta de murta.
- Comparar los resultados de medición obtenidos por el método seleccionado para un producto con valores existentes de los mismos en la literatura.
- Medir por el método seleccionado la difusividad térmica para una pasta de murta utilizando un medio de calentamiento a diferentes niveles de temperatura.
- Desarrollo de una correlación matemática para conocer la variación que experimenta la difusividad térmica de la murta en un rango de temperatura determinado.

## 2. REVISION BIBLIOGRAFICA

### 2.1 Transferencia de calor

Desde el punto de vista de la Termodinámica, un flujo de energía que toma lugar debido a una diferencia de temperatura es identificado como calor solamente si la energía transferida ocurre a través de un límite del sistema y no fue transportado por un flujo de masa (flujo convectivo). Sin embargo, es convencional en el tema de transferencia de calor denotar todos los flujos de energía que surgen debido a una diferencia de temperatura como transferencia de calor. Por esta razón, el tema de transferencia de calor sería más propiamente llamado transferencia de energía térmica. Según WATSON y HARPER (1987) se puede definir el calor como la energía que es transferida como resultado de una diferencia de temperatura. Por tanto, la transferencia de calor es un fenómeno de transferencia de energía; cualquier incremento del calor causará un movimiento más rápido de las moléculas de un producto, y la energía cinética de las moléculas se incrementa a medida que el calor es absorbido (FENNEMA *et al.*, 1975).

**2.1.1 Mecanismos de transferencia de calor.** El calor puede ser transferido en tres formas diferentes: conducción, convección y radiación. Estas tres formas son similares en que una diferencia de temperatura debe de existir para que se obtenga una transferencia de energía neta en la dirección de mayor a menor temperatura. Sin embargo, son diferentes ya que la forma física de los tres fenómenos y las leyes que los controlan difieren (Mc ADAMS, 1964).

**2.1.1.1 Conducción.** Corresponde a uno de los mecanismos más comunes de transmisión de calor. Si en un medio continuo existe un gradiente de temperatura, el calor puede fluir sin que se produzca un desplazamiento observable de la materia. Esta clase de flujo térmico se denomina conducción molecular o simplemente conducción. La conducción tiene lugar a escala molecular, y el mecanismo corresponde a un transporte de la cantidad de movimiento de las moléculas individuales a lo largo del gradiente de temperatura (Mc CABE *et. al.*, 1991; SINGH y HELDMAN, 1998). La conducción de calor es usualmente interpretada como un intercambio molecular de energía cinética. En este concepto, como las moléculas del material son calentadas, ellas se ponen en movimiento y a su vez impactan elásticamente a las moléculas vecinas, y así a través del espesor del material. Esta forma de transferencia de calor describe el flujo de calor de un alimento sólido durante el calentamiento o enfriamiento (HELDMAN, 1975).

El ejemplo más corriente de conducción se presenta en el flujo de calor a través de sólidos opacos, tales como los ladrillos de las paredes de un horno o la pared de un tubo metálico (Mc CABE *et. al.*, 1991). La ley de Fourier para la conducción unidireccional del calor establece que la velocidad instantánea del flujo térmico  $\Delta Q/\Delta t$  es igual al producto de tres factores: al área  $A$  de la sección considerada y normal al flujo de calor; al gradiente de temperatura  $-\Delta T/\Delta x$ , que representa la relación del incremento de temperatura al de longitud en la dirección del flujo, y a la conductividad térmica  $\lambda$  (en W/m K), que es una propiedad física del material. La expresión matemática de la ley de Fourier es:

$$\frac{\Delta Q}{\Delta t} = \dot{Q} = -\lambda A \frac{\Delta T}{\Delta x} \quad \text{Ecu. 2.1}$$

Esta expresión diferencial es general para la conducción unidireccional, siendo válida para los casos en que el gradiente de temperatura  $-\Delta T/\Delta x$  varía con el tiempo y con la posición del punto figurativo. En todos los casos en que se

presenta un flujo térmico por conducción, tiene que existir un gradiente de temperatura. Si la temperatura de un punto dado varía con el tiempo, la velocidad del flujo térmico variará también con el tiempo. Se dice entonces que la conducción de calor representa un estado no estacionario o *transiente* de transferencia de calor cuando la temperatura varía con la posición y con el tiempo (Mc ADAMS, 1964).

El signo negativo refleja el hecho físico de que el flujo de calor se produce de mayor a menor temperatura, de forma que el signo del gradiente es contrario al del flujo de calor. Al utilizar la ecuación de Fourier es preciso tener muy en cuenta que el área  $A$  es la de una superficie perpendicular al flujo de calor, y que la distancia  $x$  es la longitud del camino medido perpendicularmente al área  $A$  (SHARMA *et al.*, 2000).

**2.1.1.2 Convección.** Todo fluido que está en movimiento lleva asociada consigo una energía que hace que exista una transferencia de calor, por mezcla de una parte del fluido con otra que se encuentran a diferentes temperaturas, debido precisamente a este movimiento. El movimiento de líquidos o gases se produce por diferencia de densidades debido a la diferencia de temperaturas; esto hace que se presente un transporte de calor en forma natural. El uso de intercambiadores de calor resulta de gran importancia en el estudio del intercambio de calor entre dos fluidos separados por una pared; De modo que, uno de ellos cede calor al otro enfriándose mientras que el otro fluido se calienta. La convección de calor ocurre a través del movimiento de masa de los fluidos hacia y desde la pared (POTTER y HOTCHKISS, 1995). Dentro de la pared la energía es transferida por conducción.

En la medición de conductividades térmicas de gases y líquidos se refiere al uso frecuente de flujos de calor hacia abajo para evitar la transferencia por

convección (Mc CABE *et. al.*, 1991; IBARZ *et al.*, 1999) debido al movimiento de masa causado por diferencia de densidad.

**2.1.1.3 Radiación.** El transporte de energía por radiación se diferencia básicamente de los otros dos fenómenos de transporte de energía en que ni es proporcional a un gradiente de temperaturas, ni necesita de un medio natural para su propagación. El paso de un estado energético a otro lleva asociado una absorción o emisión de calor; un cuerpo absorbe y emite energía radiante en todas las direcciones. La energía irradiada es, según la ley de Stefan – Boltzmann, directamente proporcional a la temperatura del cuerpo elevado a cuatro (Mc CABE *et. al.*, 1991). Cuando la energía irradiada alcanza a otro cuerpo, parte de ella puede reflejarse y otra parte puede ser transmitida a través del cuerpo, diciéndose entonces que el cuerpo es diatérmico. La energía restante es absorbida y transformada en calor. Si dos cuerpos, uno más caliente que otro, se encierran en una cavidad, hay un intercambio continuo de energía entre ellos. El cuerpo más caliente emite más energía que absorbe; el más frío absorbe más que irradia. Aún después de alcanzarse el equilibrio térmico, continua el proceso, radiando y absorbiendo energía cada cuerpo. (Mc ADAMS, 1964).

**2.1.2 Transferencia de calor en estado no estacionario.** Una comprensión clara del mecanismo de transferencia de calor por conducción a través de sólidos homogéneos es esencial para la solución de problemas más complejos; ésto se refiere a que, en la mayoría de los problemas que se presentan en la práctica de ingeniería, se ha supuesto que la temperatura de cualquier punto del sólido permanezca constante con el tiempo. Se supone así una transferencia de calor en estado estacionario. Sin embargo, en la realidad en el flujo de calor desde un medio hacia una pared sólida y a través de ésta, se presentan casos en que la temperatura dentro del sólido, además de variar con la posición puede sufrir variaciones también con el tiempo. Tal es el caso de los

procesos de congelación y descongelación, en los que es deseable conocer el tiempo necesario para obtener cierta temperatura en un punto determinado de un sólido; o bien, se desea calcular la temperatura de dicho punto al cabo de cierto tiempo. Para poder calcular estos tiempos o temperaturas debe tenerse presente que el proceso se desarrolla en régimen no estacionario o *transiente* (Mc ADAMS, 1964; IBARZ *et al.*, 1999)

**2.1.3 Método de transferencia de calor en estado no estacionario.** Los métodos de transferencia de calor en estado no estacionario, para la medición de la conductividad térmica, hacen uso de una fuente lineal de calor o una o más fuentes planas de calor. En ambas categorías el procedimiento usual es aplicar un flujo de calor estable a la muestra, el cual debe estar inicialmente en equilibrio térmico. La ecuación gobernando el incremento de temperatura es expresada como una serie de términos exponenciales, los cuales pueden ser ignorados excepto los valores muy pequeños del tiempo variable. Así evitando el período inicial, la duración depende del material y de las dimensiones de éste, y con ello se puede usar una razonable y simple relación.

Las técnicas empleadas en estos métodos son menos complicadas que en los métodos de estado estacionario. Visto que la mayoría de los materiales de alimentos sujetos a procesamientos térmicos contienen ciertas cantidades de humedad, el problema de la migración de humedad es presentada cuando es usado un método de estado estacionario. Por tanto los métodos de transferencia de calor en estado *transiente* parecen ser lo más apropiado para el caso de los alimentos.

## 2.2 Flujo de calor en estado no estacionario

La temperatura que está dada en el alimento durante el procesamiento depende del tiempo de calentamiento o enfriamiento, como también de la posición en el alimento, de esta forma continuamente hay un cambio en la temperatura (FELLOWS, 1988). De esta manera, el equipo utilizado de forma general en el régimen no estacionario de transferencia de calor consiste en un baño de agua con calefacción o enfriamiento y preferentemente con agitación, en el cual se sumerge un cilindro infinito, aislado en sus extremos con tapas de teflón o de goma, que contiene la muestra por analizar (POULSEN, 1982; JIMENEZ y KASAHARA, 1991). Dos termocuplas ubicadas en el centro y en la superficie del tubo, respectivamente, permiten seguir la variación de temperatura con el tiempo, cuando se somete el cilindro con la muestra a calentamiento a razón constante, desde una condición de equilibrio hasta una temperatura deseada. Por cuanto la muestra adquiere la forma de un cilindro infinito, el calor se propaga sólo en dirección radial por conducción en estado estacionario. (JIMENEZ y KASAHARA, 1991).

La conducción de calor en estado no estacionario es la situación más ampliamente encontrada, la cual involucra la acumulación o pérdida de calor dentro del cuerpo y, con ello la distribución de la temperatura cambia con el tiempo. La ecuación diferencial básica, en coordenadas cartesianas, que gobierna la transferencia de calor en cuerpos isotrópicos corresponde a la ecuación de difusión de calor:

$$\frac{\Delta T}{\Delta t} = \frac{\lambda}{\rho c_p} \left[ \frac{\Delta}{\Delta x} \left( \frac{\Delta T}{\Delta x} \right) + \frac{\Delta}{\Delta y} \left( \frac{\Delta T}{\Delta y} \right) + \frac{\Delta}{\Delta z} \left( \frac{\Delta T}{\Delta z} \right) \right] + q \quad \text{Ecu. 2.2}$$

La ecuación puede ser simplificada suponiendo que la conductividad térmica  $\lambda$  es independiente de la temperatura. Para la transferencia de calor en una sola dirección, la ecuación se reduce a:

$$\frac{\Delta^2 T}{\Delta x^2} = \frac{B}{\lambda} + \frac{1}{a_T} \frac{\Delta T}{\Delta t} \quad \text{Ecu. 2.3}$$

La solución de esta ecuación (Ecu. 2.3) proporciona información sobre la distribución de la temperatura  $T(x, y, z)$  en función del tiempo. Esta expresión describe también una condición física importante, que es la conservación de la energía. El término  $\frac{\Delta}{\Delta x} \left( \frac{\Delta T}{\Delta x} \right)$ , por ejemplo, se relaciona con el flujo neto de calor por conducción en el volumen de control para la dirección de la coordenada  $x$ . Para obtener la solución, las condiciones límites y condiciones iniciales deben ser formuladas, preferiblemente de una forma en que se simplifiquen las mediciones y cálculos. Las condiciones límites describen el flujo de calor en la superficie del cuerpo y son simplificadas si la temperatura de la superficie se iguala instantáneamente a la temperatura del medio de calentamiento o enfriamiento. Estas condiciones se pueden omitir si se encuentra en contacto íntimo con una placa metálica. Las condiciones iniciales describen la distribución de la temperatura en el cuerpo cuando el experimento ha comenzado, y son más simples cuando la temperatura es igual a lo largo del cuerpo.

Varias son las técnicas matemáticas, las cuales pueden ser usadas para resolver la ecuación diferencial de conducción de calor para los tres cuerpos “elementales”: lámina infinita, cilindro infinito y esfera. Existen soluciones gráficas que están dadas, por ejemplo, por las cartas de Gurney-Lurie, (DRUSAS y SARAVACOS, 1985). Una de las ecuaciones más ampliamente usadas dando relación entre la temperatura, tiempo, difusividad térmica y geometría de los cuerpos es la desarrollada por Ball y Olson en 1957, citado por DRUSAS y SARAVACOS (1985):

$$t = f \log j \left[ \frac{T_m - T_0}{T_m - T} \right] \quad \text{Ecu. 2.4}$$

La ecuación antes descrita está referida a la función de primera clase de Bessel (LONCIN, 1991)

$$\frac{\Delta T}{\Delta T_o} = 2 \sum_{n=1}^{\infty} \frac{J_o \left( B_n \frac{r}{r_{max}} \right)}{B_n \cdot J_1(B_n)} \cdot e^{-B_n^2 \cdot Fo} \quad \text{Ecu. 2.5}$$

donde para un cilindro infinito, donde la transferencia de calor se realiza en forma radial, la relación  $(r / r_{max}) = 0$ , con lo cual se utilizan los valores dados en el cuadro 2.

CUADRO 1 Valores de las variables  $B_n$  y  $J_1(B_n)$

Valores de $B_n$ para $J_0(B_n) = 0$		$J_1(B_n)$
$B_1$	2,4048	0,5191
$B_2$	5,5201	-0,3404
$B_3$	8,6537	0,2715
$B_4$	11,7915	-0,2324
$B_5$	14,9309	0,2065

FUENTE: LONCIN, 1991

Entonces la resolución de la ecuación 2.6 con los valores del CUADRO 2, para un cilindro infinito se describe con la siguiente ecuación:

$$\frac{\Delta T}{\Delta T_{max}} = 1,6e^{-5,78Fo} - 1,06e^{-30,47Fo} + 0,85e^{-74,9Fo} - 0,73e^{-139Fo} + \dots$$

Ecu. 2.6

Cuando  $Fo$  (número de Fourier) es superior aproximadamente a 0,1, solamente es importante el primer término de la serie en la ecuación 2,7, de forma que se

pueden despreciar los demás términos (Mc CABE *et. al.*, 1991). Entonces reordenando de otra manera puede ser escrita como:

$$t = 0,398 \frac{r^2}{a_T} \log \left( 1,6 \frac{T_m - T_o}{T - T_o} \right) \quad \text{Ecu. 2.7}$$

Donde

$r$	radio interno del cilindro
$T_m$	Temperatura del medio externo
$T_o$	Temperatura inicial en el centro
$T$	Temperatura del centro en el tiempo $t$

La geometría utilizada para los cuerpos del equipo de medición involucra generalmente a la esfera y al cilindro infinito, siendo éstos entre las formas más simples para operar debido a que se puede controlar más fácilmente la transferencia de calor del baño a estos cuerpos que en el caso de una plancha infinita. El cilindro infinito ha sido seleccionado para el presente trabajo por permitir la inserción de termocuplas paralelas al eje del cilindro con temperatura constante. Escogiendo una gran longitud con respecto al radio (una longitud mayor a seis veces el radio) y aislando los extremos del cilindro se logra una buena aproximación del cilindro infinito. Un aparato similar fue desarrollado por Dickerson en 1965 (POULSEN, 1982).

### 2.3 Propiedades Termofísicas

Las propiedades térmicas de los alimentos son de considerable importancia en la ingeniería para los procesadores de alimentos, dado que ellas gobiernan los cambios de temperatura en procesos que involucran la transferencia de calor, procesos tales como, calentamiento, enfriamiento, secado y congelamiento (JIMENEZ y KASAHARA, 1991; PELEG, 1983; SINGH y HELDMAN 1998).

Junto con otras características físicas como la densidad, viscosidad, forma y tamaño, ellos son de gran importancia en el diseño de equipos y perfiles de proceso. Se incluyen aquí el calor específico, conductividad térmica, difusividad térmica, emisividad y conductancia de superficie (PELEG, 1983). Estas propiedades son dependientes de la temperatura, composición química del producto y estructura física (URBICAIN y LOZANO, 1997).

El conocimiento de las propiedades de los alimentos es requerido para predecir, diseñar y optimizar muchos procesos que involucran la transferencia de calor, como por ejemplo el congelamiento, el descongelamiento, la cocción y el secado. Estas propiedades, tales como la conductividad térmica,  $\lambda$ , el calor específico,  $c_p$ , y la difusividad térmica,  $a_T$ , definida por la relación  $a_T = \frac{\lambda}{c_p \rho}$ ,

donde  $\rho$  es la densidad, pueden ser determinada por dos vías:

(1) por medición directa o

(2) determinando la composición del alimento y usando una ecuación de predicción y expresando las propiedades térmicas en función de la composición proximal. Este último es usualmente factible sólo para materiales con un máximo de 3 componentes dominantes (NESVADBA, 1982).

La aplicación de métodos numéricos usando computadores es cada vez más útil para la evaluación de procesos que involucran la transferencia de calor en alimentos. Tales aplicaciones a menudo están limitadas por la disponibilidad de datos de las propiedades térmicas, especialmente valores de conductividad y difusividad térmica (ZIEGLER, 1985).

La lenta penetración de calor durante el calentamiento o enfriamiento de pastas puede causar cambios indeseables en la calidad, particularmente si el producto es calentado o enfriado en grandes recipientes. Por consiguiente es importante que la conductividad térmica o la difusividad térmica de estos productos sea conocida con razonable exactitud (DRUSAS y SARAVACOS, 1985). En la

literatura se encuentran pocos datos de difusividad térmica de alimentos, encontrándose la determinación de estas propiedades en pastas de tomate, donde a 35 °Brix se obtuvo una difusividad térmica de  $1,42 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$  (DRUSAS y SARAVACOS, 1985). Se han realizado también estudios en pastas de pescado con una humedad de 82 %, encontrando un valor de difusividad térmica de  $1,42 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$  (JIMENEZ y KASAHARA, 1991). Ambas investigaciones fueron realizadas con metodologías que involucran la transferencia de calor en estado no estacionario.

La conductividad y la difusividad térmica son afectadas tanto por la composición y la densidad del alimento, como por la temperatura, mientras que el calor específico es afectado principalmente por la composición y la temperatura. Por esto es generalmente más difícil determinar la conductividad o la difusividad térmica que el calor específico (CHOI y OKOS, 1986).

Los datos de conductividad térmica de alimentos como una función del contenido de humedad es una de las primeras propiedades requeridas para modelar procesos involucrando transferencia de masa y energía. Ejemplos típicos son, los procesos de secado, re-hidratación, almacenamiento, etc. (LOZANO *et. al.*, 1979).

**2.3.1 Conductividad térmica.** La conductividad térmica de un producto es una medida de la velocidad con la que el calor se transmite a través de un espesor de unidad de ese material cuando existe un gradiente de temperatura y está expresada en  $\text{W /m K}$  (SINGH y HEDLMAN, 1998). Esta propiedad del alimento depende mucho de la porosidad, la estructura y los constituyentes químicos; está principalmente asociada con las propiedades del aire, de la grasa y del agua en los alimentos. La conductividad térmica de la grasa es más baja que la del agua, al igual que la conductividad térmica del aire; altos niveles de grasa o aire atrapado disminuiría consecuentemente la conductividad térmica de un

alimento. Esto tiene un gran impacto en las tasas de calentamiento y enfriamiento, como también en la eficiencia de los procesos (PELEG, 1983).

La conductividad térmica de líquidos puede incrementarse con la presión, pero decrece con un incremento de la concentración de solutos (PELEG, 1983). Para medir esta propiedad en sólidos se han desarrollado numerosas técnicas experimentales muchas de las cuales son válidas para rangos de temperatura y productos alimenticios específicos, las que se pueden agrupar en las de flujo de calor en régimen estacionario y no estacionario. A su vez, la variación de la conductividad térmica experimentada en diferentes alimentos se refiere a las diferencias en su composición; además estas diferencias parecen ser también originadas por la procedencia de los diferentes productos (JIMENEZ y KASAHARA, 1991).

Los métodos para la determinación de la conductividad térmica de materiales biológicos pueden ser divididos en dos grandes categorías: una que requiere de la transferencia de calor en estado estacionario, y aquellos donde predomina la transferencia de calor en estado no estacionario. Estos métodos pueden ser absolutos o comparativos. Uno de los métodos característicos de la transferencia de calor en estado estacionario corresponde al método de placas aisladas calentadas, *Guarded Hot Plate*. Este método se basa en la conducción del flujo de calor a través de dos placas, una placa caliente, donde se ajusta la fuente de calor (para este caso una resistencia eléctrica) y una placa fría. Las placas se colocan en ambos lados de la muestra, para lo cual el flujo de calor que sale de la fuente de calor (placa caliente), atraviese la muestra que tiene un espesor conocido y continúa hacia la placa fría, donde a través de termocuplas se registra la variación de temperatura que experimenta esta placa en función del tiempo. En el método de estado estacionario, la conductividad térmica ( $\lambda$ ) de una muestra de espesor conocido ( $\Delta x$ ) puede ser calculada a partir de la

medición de la densidad de flujo de calor ( $\dot{Q}$ ), si el gradiente de temperatura ( $\Delta T/\Delta x$ ) es conocido:  $\dot{Q} = \lambda (\Delta T/\Delta x)$  en  $W/m^2$  (ZIEGLER, 1985).

Modelos matemáticos han sido desarrollado por muchos investigadores para predecir las propiedades térmicas de alimentos (CHOI y OKOS, 1986); sin embargo, su aplicación se limita para algún rango de temperatura y composición de los alimentos. Cuando las propiedades térmicas son necesitadas para varias condiciones de procesos el camino más eficiente y práctico es obtener éstas por modelos experimentales basados en las condiciones de proceso.

**2.3.2 Difusividad térmica.** Esta propiedad es una medida de la cantidad de calor difundida a través de un material en calentamiento o enfriamiento en un tiempo determinado y está definida como el cociente de la conductividad térmica por el producto de la densidad y el calor específico (MOHSENIN, 1980). Cuando la transferencia de calor ocurre por conducción más que por convección, la difusividad térmica resulta importante. La difusividad térmica está relacionada con la conductividad térmica, densidad y calor específico del producto y determinan la tasa de propagación de calor a través del alimento (MOHSENIN, 1980; FELLOWS, 1988). Los valores de la difusividad térmica para alimentos se encuentran en el rango de  $1$  a  $2 \times 10^{-7} m^2/s$  y es directamente proporcional a la temperatura (PELEG, 1983). Según su importancia y necesidad, diferentes autores han determinado la difusividad térmica en algunos alimentos, los cuales pueden orientar a un rango para la difusividad térmica en pasta de murta, los valores encontrados en literatura se presenta en el CUADRO 2.

**2.3.3 Calor específico.** Según definición, se refiere al calor específico como la cantidad de energía requerida para aumentar en un grado la temperatura de

una unidad de masa (MOHSEIN, 1980). En el proceso de calentamiento y enfriamiento no estacionario sin cambio de fase, el calor específico de un material estable establece la capacidad de absorber o remover calor, según sea el caso.

**CUADRO 2 Difusividad térmica de algunos frutos y vegetales**

Producto	Contenido de agua %	Temperatura °C	Difusividad Térmica (m <sup>2</sup> /s)
Manzana	85	0 – 30	1,37 x 10 <sup>-7</sup>
Pasta de manzana	37	65	1,12 x 10 <sup>-7</sup>
	80	5	1,22 x 10 <sup>-7</sup>
	80	65	1,40 x 10 <sup>-7</sup>
Plátano	76	5	1,18 x 10 <sup>-7</sup>
	76	65	1,42 x 10 <sup>-7</sup>
Uva	72	-----	1,09 x 10 <sup>-7</sup>
	88	-----	1,37 x 10 <sup>-7</sup>
Limón	-----	40	1,37 x 10 <sup>-7</sup>
Durazno	-----	27	1,37 x 10 <sup>-7</sup>
Puré de Papas	78	65	1,45 x 10 <sup>-7</sup>
Frambuesa	92	5	1,27 x 10 <sup>-7</sup>
Remolacha	-----	60	1,26 x 10 <sup>-7</sup>
Pasta de tomate	-----	26	1,48 x 10 <sup>-7</sup>
Agua	100	30	1,48 x 10 <sup>-7</sup>

**FUENTE: SINGH y HELDMAN, 1998.**

#### 2.4 Características generales de la murta

La murta es una especie nativa de Chile, y pertenece a la familia de las Myrtaceae. La planta de la murta, *Ugni molinae* Turcz, presenta un crecimiento

arbustivo abundante, en forma silvestre en el sur de Chile (entre la VII y la XI Región), especialmente en la cordillera de la costa y parte de la Pre-Cordillera andina. Se le encuentra formando murtales solos o asociados a otros vegetales arbustivos o arbóreos.

Produce un pequeño fruto globoso, rojizo, de sabor y aroma agradable; de ahí que esta planta haya despertado gran interés como alternativa frutícola debido a las características de aroma y sabor de su fruto. El fruto presenta un diámetro polar promedio de entre 8 - 9 mm y un diámetro ecuatorial promedio de 10 mm. Este fruto es utilizado en la fabricación casera de mermeladas, jarabes, compotas para postres y licores; siendo en la actualidad comercializada en pequeña escala, para el consumo local, efectuándose las cosechas entre los meses de marzo y mayo, la época de madurez.

<p><b>Características generales</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Arbusto denso con fina textura, De crecimiento lento mediano, Con hojas ovaladas, verdes oscuras y brillantes, Flores blancas rosadas de muchos estambres.</li> <li>- Fruto: berries rosáceas comestibles.</li> <li>- Condiciones de crecimiento: áreas costeras con sol, preferentemente húmedas, en suelo bien drenados y ácidos</li> </ul>	
--	--

**FIGURA 1 FLOR Y FRUTO DE LA MURTA (*Ugni molinae* Turcz)**

Se ha estimado de alto interés estudiar esta especie, para buscar a futuro una posible forma de industrialización, aprovechando su natural adaptación a los suelos pobres del sector costero, pudiendo ser una alternativa de producción en terrenos no cultivables por cuanto protege al suelo de la erosión, a la vez que otorgaría considerables ingresos (ALEA y RAMÍREZ, 1993).

### 3. MATERIALY METODO

#### 3.1 Lugar de ensayo

Las experiencias se realizaron en el laboratorio de procesamiento del Instituto de Ciencia y Tecnología de los Alimentos.

#### 3.2 Materiales

El desarrollo del trabajo experimental requirió de cierta cantidad de recursos y materiales específicos. A continuación se entregan detalles de ellos.

**3.2.1 Materia prima.** De acuerdo a la investigación realizada se procedió a seleccionar la materia prima; obteniendo una fruta tanto de tamaño como coloración homogénea (rojiza), descartando la fruta dañada y decolorada.

La murta seleccionada se colocó en bolsas con un contenido aproximadamente de 1,3 kg. Como materia prima se utilizó:

- Murta, de procedencia de Punucapa, Valdivia.
- Sacarosa, en forma de soluciones de 60 y 70 °Brix.



**FIGURA 2** Murta (*Ugni molinae* Turcz) como materia prima

### 3.2.2 Equipos e Instrumentos.

- Para la determinación de la difusividad térmica
  - Cilindros de cobre de dimensiones, L x D: 200 mm x 32 mm
  - Baño de agua termoregulable, con termostato y termómetros digitales, serie EC-50 programable
  - Procesador de Alimentos, Somela T - 338
  - Registrador de temperatura de 12 canales, Digi -Sense ®, COLE-PALMER modelo 92800-15
  - Computador, EPSON, modelo Q 201A
  - Termocuplas Kapton® tipo T, rango -250 a 404 °C, COLE-PARMER
  - Termómetro de mercurio Brannan, de -20 a 110 °C, precisión de  $\pm 1$  °C
  - Materiales aislantes (corcho, teflón, cinta aisladora)
  
- Para la determinación de la humedad de la pasta
  - Estufa a 102 °C, Gallenkamp
  - Balanza analítica digital, CHYO, JK-200
  - Cápsulas de aluminio, aprox. 100 cm<sup>3</sup>
  
- Para la determinación de sólidos solubles de la pasta
  - Refractómetro electrónico digital, Bellingham
  - Filtros de género (muselina)
  
- Para la determinación de la densidad de la pasta
  - Balanza analítica digital, CHYO, JK - 200
  - Matraz aforado de 100 cm<sup>3</sup>, clase A, PIREX

### 3.3 Metodología

La siguiente investigación tiene como propósito determinar la difusividad térmica en pasta de murta de un lote de una misma fecha de compra y

procedencia, para lo cual la murta se seleccionó tomando en cuenta tanto el calibre como la coloración homogénea. La materia prima inicial de murta se dividió en 7 lotes de igual tamaño, y se utilizó un lote para cada tratamiento. Los diferentes lotes de murta fueron almacenados en un congelador antes de la determinación de la difusividad térmica. Con el objeto de controlar las posibles variaciones en la materia prima durante el almacenamiento se realizaron análisis de la humedad, densidad y sólidos solubles en cada lote de la pasta de murta.

Para todas las experiencias se caracterizó la pasta de murta a través de la humedad, la densidad y el contenido de sólidos solubles. Se aplicaron análisis estadísticos (ANDEVA), con lo cual se observan las posibles fluctuaciones en los promedios de cada uno de estos parámetros. Se observó la posible existencia de diferencias significativas en cada uno de estos parámetros, dado que la materia prima para cada tratamiento tuvo, por razón de organización de tiempo, que permanecer congelada hasta el análisis en los diferentes tratamientos térmicos. Esto hace que estas muestras tuvieran diferentes tiempo de almacenamiento hasta el análisis en sí. Los análisis realizados para la caracterización de la pasta de murta corresponden a 21 muestras, correspondiendo a 7 lotes por 3 repeticiones.

Las muestras de murta almacenadas en congelación a - 15 °C permanecieron, previo a la determinación de humedad, densidad y sólidos solubles, a temperatura ambiente durante un tiempo aproximado de 4 horas para obtener una descongelación de la muestra. La descongelación también se realiza previo a cada tratamiento térmico.

**3.3.1 Determinación de Humedad.** Debido a la imposibilidad de contar con estufas al vacío y trabajar a temperaturas del orden de 65 °C (norma A.O.A.C. 1995), se determinó el contenido de humedad de cada lote de pasta de murta

utilizado por un método tradicional, para lo cual se pesaron alrededor de 5 g de pasta de murta, los cuales se colocaron en cápsulas de aluminio de aprox. 100 cm<sup>3</sup>, con previo agregado de arena especialmente tratada para el análisis. Las cápsulas permanecieron por 3 horas a 102 °C en una estufa. Las cápsulas se pesaron posteriormente a un enfriamiento por media hora en un desecador. Estas se colocaron nuevamente en la estufa por 1 hora más y se controló el peso después del enfriamiento nuevamente por media hora en el desecador. Este procedimiento fue repetido por lo menos dos veces más hasta encontrar un peso constante. Cabe destacar que las cápsulas alcanzan un peso constante después de las tres primeras horas de secado en la estufa. Las mediciones se realizaron en triplicado y se obtuvo un promedio de éstas.

**3.3.2 Determinación de densidad.** La densidad fue determinada por diferencia de volumen en un matraz aforado de 100 cm<sup>3</sup>, en el cual se agregó una cantidad conocida de pasta y luego se aforó el matraz con agua destilada a 20 °C ± 1 °C. Se determinó el volumen de agua agregado a partir de la diferencia de peso y, tomando la densidad del agua a esta temperatura igual a 0,99 g/cm<sup>3</sup> (LIDE, 1998), se dedujo el volumen de la pasta. Se calculó luego la densidad de la pasta utilizada para cada experiencia o tratamiento térmico; se realiza la determinación de la densidad en triplicado para controlar la repetibilidad de las mediciones.

**3.3.3 Determinación de sólidos solubles.** Los sólidos solubles de las diferentes muestras se determinaron por refractometría según el método de A.O.A.C. 932,14C (AOAC,1995). Precavidamente la calibración del refractómetro fue verificada con soluciones patrón de sacarosa a diferentes concentraciones (ANEXO 1). Se procedió a medir el contenido de los sólidos solubles en °Brix en las diferentes muestras con el refractómetro digital, en el cual se depositó una gota del jugo exprimido y filtrado de la pasta de murta. El jugo se obtuvo utilizando un trozo de muselina, en el cual se colocó una

cantidad de pasta de murta y se prensó, obteniendo un filtrado libre de partículas mayores.

### **3.4 Procedimiento experimental**

Considerando que la murta es un fruto de temporada y su elaboración, en el ámbito industrial, resultaría de más provechosa en estado de producto congelado, se utilizó murta congelada para los experimentos. La totalidad de la murta fue separada en 7 lotes de aproximadamente 1,3 kg, una para cada tratamiento térmico y almacenados en bolsas marca “Ziploc” en un congelador a -15 °C. Los tratamientos fueron realizados sucesivamente para niveles de temperatura entre 60 °C y 90 °C.

La murta se sometió a un tratamiento térmico previo de escaldado a 90 °C por 1 min, utilizando para ello agua destilada. La murta escaldada se drenó y se preparó la pasta moliendo la murta en una trituradora. El proceso de escaldado se utiliza principalmente para la inactivación térmica de enzimas que pudieran deteriorar la pasta de murta durante su almacenamiento congelado como además cumplió la función importante de hidratar y ablandar la cáscara de la fruta lo que hace más fácil el proceso de trituración y mezcla.

De la totalidad de la pasta de murta preparada, una parte de cada lote fue destinada a la caracterización de la materia prima, para este caso tal como se mencionó: humedad, densidad y sólidos solubles.

En el CUADRO 3 se muestra el diseño experimental con los diferentes tratamientos térmicos aplicados y los parámetros considerados en el presente estudio. Ésto corresponde al lote total de murta, separado en 7 sub - lotes, correspondientes a 7 temperaturas con 10 repeticiones.

**CUADRO 3 Diseño experimental para la determinación de la difusividad térmica en pasta de murta**

Producto	Muestras	Tratamiento Térmico ( $T_m$ )	Repeticiones	Parámetro a evaluar
Murta de procedencia Punucapa, Valdivia	Lote 1	60 °C	10	Difusividad térmica
	Lote 2	65 °C	10	
	Lote 3	70 °C	10	
	Lote 4	75 °C	10	
	Lote 5	80 °C	10	
	Lote 6	85 °C	10	
	Lote 7	90 °C	10	

Para la determinación de la difusividad térmica, los análisis correspondieron a 70 muestras (1 variedad de murta x 7 temperaturas x 10 repeticiones  $\equiv$  70 análisis).

Previo a cada experiencia se calibraron las termocuplas a utilizar en agua destilada a 0 °C ó 100 °C según la guía de instrucción del instrumento de registro de temperatura (registrator de temperatura de 12 canales, Digi-Sense, modelo 92800-15, COLE PALMER), además las temperaturas fueron registradas en intervalos de tiempo de 4 segundos.

**3.4.1 Estimación del efecto de convección en la medición.** Debido a la particularidad que presentan algunos productos en la velocidad de transferencia de calor, se comprobó el grado de convección que afecta principalmente a los líquidos. Esta estimación se realiza con una ecuación que presenta la singularidad de ser válida sólo para productos donde la transferencia de calor se realiza principalmente por conducción.

Como forma de comparación y validación del método utilizado, se probó la medición con soluciones de sacarosa a diferentes tratamientos térmicos y concentraciones, a fin de comparar los valores encontrados con los reportados en la literatura. Se estudió la metodología en 6 experiencias con soluciones de sacarosa a concentraciones de 60 °Brix y 70 °Brix para tratamientos térmicos de 50 °C, 60 °C y 70 °C a fin de evaluar la repetibilidad del método.

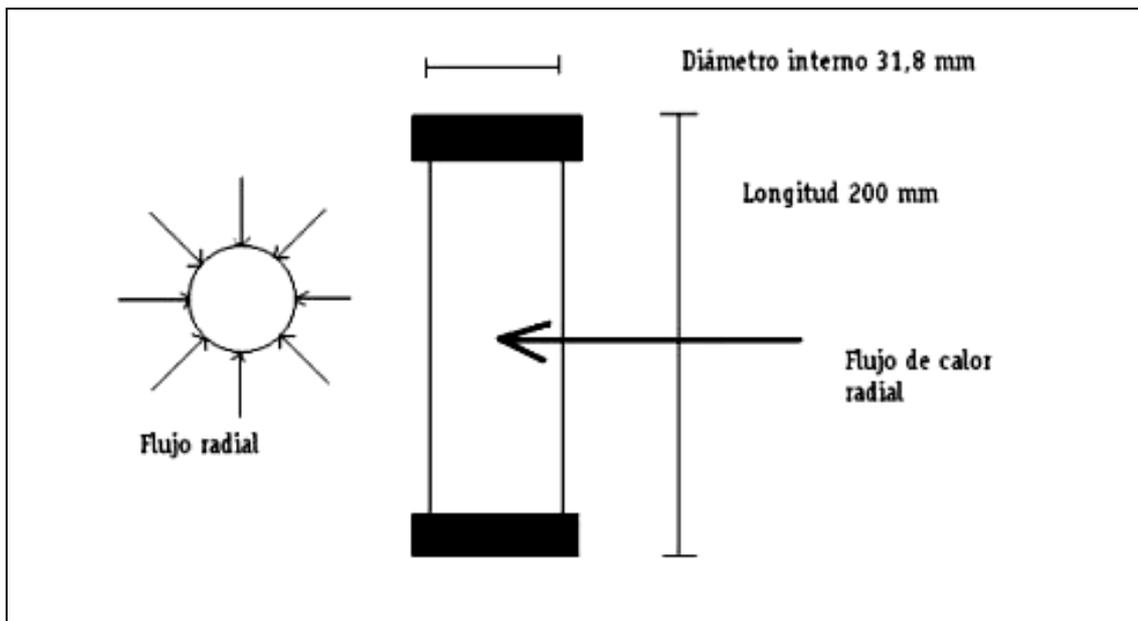
Los análisis se realizaron en triplicado y en el cuadro 4 se muestra el diseño experimental de 2 muestras, equivalente a 2 concentraciones, y 3 tratamientos térmicos, en un arreglo factorial de 2 x 3 para la determinación de la difusividad térmica. Los análisis correspondieron a un total de 18 muestras (2 muestras de soluciones de sacarosa x 3 temperaturas x 3 repeticiones = 18 análisis)

**CUADRO 4 Diseño experimental para la estimación de la difusividad térmica en soluciones de sacarosa**

Soluciones de sacarosa	Tratamiento térmico ( $T_m$ )	Repeticiones	Parámetro
60 °Brix	50 °C	4	Difusividad térmica
	60 °C		
	70 °C		
70 °Brix	50 °C	4	
	60 °C		
	70 °C		

**3.4.2 Equipo de medición.** La difusividad térmica se determinó con el método de transferencia de calor en estado no estacionario, método desarrollado por Dickerson (1965) y modificado por POULSEN (1982). Este método se basa en el uso de un cilindro de cobre de característica infinita; para asegurar que se cumplan los requerimientos específicos, los extremos del tubo se sellan con tapones aislantes de goma de manera que la transferencia de calor ocurra

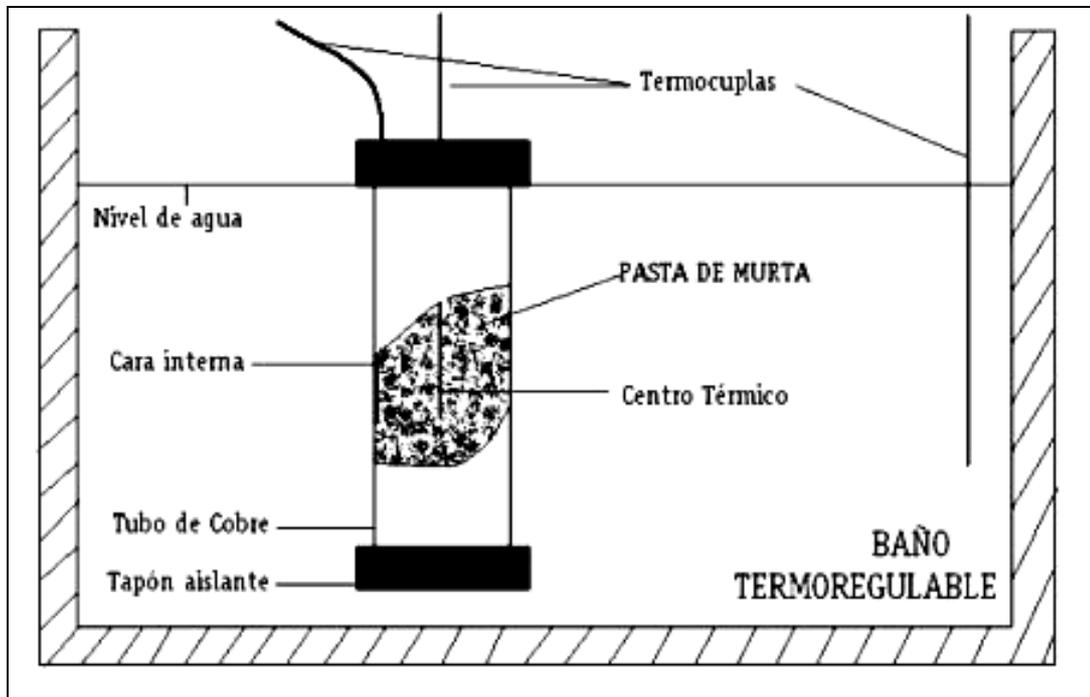
unidireccionalmente de forma radial. se supuso para este caso que la transferencia de calor en dirección axial despreciable frente a la en dirección radial (FIGURA 3).



**FIGURA 3 Dimensiones del tubo de cobre utilizado para la experiencia**

Para la medición con la pasta de murta el cilindro se rellenó con la muestra de pasta, y se colocaron dos termocuplas al cilindro con el objeto de registrar las temperaturas del centro térmico, como también de la cara interna del cilindro. Se colocaron termocuplas al medio de calentamiento, consistiendo en agua de un baño termoregurable con convección natural para registrar la variación de temperatura que experimenta éste durante la experiencia (FIGURA 4).

Para la obtención de los perfiles térmicos en pasta de murta se estudiaron 7 tratamientos térmicos entre 60 °C y 90 °C a intervalos de 5 K, con 10 repeticiones para cada uno, y con ello se realizó un seguimiento de la difusividad térmica con respecto a la temperatura.



**FIGURA 4** Equipo utilizado para la obtención del perfil térmico

**3.4.3 Medición y evaluación.** La experiencia consistió en la determinación del perfil térmico, desde una temperatura inicial de la pasta en el centro del cilindro hasta la temperatura del medio de calentamiento. Las temperaturas fueron registradas a través de dos termocuplas, y almacenadas en un *data logger* y un procesador de datos.

Para la evaluación se utilizó la siguiente ecuación descrita por DICKERSON en 1952 (POULSEN, 1982):

$$t = 0,398 \frac{r^2}{a_T} \log \left( 1,6 \frac{T_m - T_0}{T_m - T} \right) \quad \text{Ecu. 3.1}$$

Donde:

$a_T$ : corresponde a la difusividad térmica en  $m^2/s$

$r$  : correspondiente a la distancia recorrida por el flujo de calor, equivalente al radio del cilindro en m

$t$  : tiempo en s

$T_m$ : temperatura del medio de calentamiento, en  $^{\circ}C$

$T_o$ : temperatura inicial en el centro térmico de la muestra, en  $^{\circ}C$

$T$  : temperatura del centro térmico de la muestra en el instante  $t$ , en  $^{\circ}C$

Reordenando la ecuación 3.1, queda la ecuación de una recta

$$\log\left(1,6 \frac{T_m - T_o}{T_m - T}\right) = \frac{1}{0,398} \frac{a_T}{r^2} t \quad \text{Ecu. 3.2}$$

donde  $\left(\frac{T_m - T_o}{T_m - T}\right)$  se conoce con el nombre de variación de temperatura no conseguida; definida como, la fracción de la variación total posible de temperatura que queda sin conseguir en un determinado instante. La representación semilogarítmica corresponde en este caso a una línea recta sin intercepto. Esta relación se encuentra en función del tiempo  $t$ , y  $m$  es la pendiente de la línea recta correspondiente a:

$$m = \frac{1}{0,398} \cdot \frac{a_T}{r^2} \quad \text{Ecu. 3.3}$$

Seguido al ordenamiento y gráfica de los valores, se encuentra la pendiente de la recta de calentamiento, donde la pendiente se iguala al factor de la ecuación (3.3), la que está en función de la distancia recorrida y difusividad térmica.

despejando  $a_T$  de la ecuación 3.3 la expresión que permite encontrar la difusividad termica queda como sigue:

$$a_T = 0,398 m r^2; m^2/s \quad \text{Ecu. 3.4}$$

Posterior a las experiencias, se aplican análisis estadísticos (ANDEVA) a los siete tratamientos para detectar diferencias significativas entre los tratamientos. Es analizada también la difusividad térmica en función de la temperatura variable durante el tratamiento.

## 4. PRESENTACION Y DISCUSION DE RESULTADOS

### 4.1 Características de la Materia Prima

Uno de los parámetros que es de gran importancia en la transferencia de calor en los alimentos es el agua, por tanto este parámetro fue medido en la murta fresca. Para conocer como se presenta este parámetro bajo congelación se hizo un experimento de almacenamiento con murta congelada a  $-15$  y  $-25$  °C (almacenada durante 24 horas), entonces para obtener una mayor repetibilidad de los datos se realizaron 8 repeticiones, encontrando un contenido de agua promedio de 77,8 % con una desviación estándar de 0,33 %, según el CUADRO 5, la murta al permanecer en congelación experimenta una baja en la humedad, que presenta un promedio de 75,87 % a  $-15$  °C y 75,27 % a  $-25$  °C. Análisis estadísticos detectaron diferencia significativa entre la humedad del producto fresco y congelado, sin embargo, la temperatura de congelación no afectó el grado de secado de la murta. Se muestra que el proceso de secado afecta la humedad en un 2,5 y 3,3 % para las temperaturas de congelación de  $-15$  °C y  $-25$  °C respectivamente, con respecto a la humedad de la murta fresca.

Con el objetivo de seguir el comportamiento que experimenta la disminución de la humedad al permanecer en congelación, se midió este parámetro para cada lote, durante toda la investigación. Además se midieron los sólidos solubles y densidad para conocer además el rango de variación que ellas experimentan bajo congelación. Estos análisis se realizaron paralelamente a la obtención del perfil térmico de todas las muestras para cada temperatura de calentamiento. Los lotes fueron analizados uno cada semana, analizando el lote 1 en la semana 1.

**CUADRO 5** Contenido de humedad en murta fresca y congelada

Repetición	HUMEDAD DE LA MURTA		
	Murta fresca %	Murta congelada (-15 °C) %	Murta congelada (- 25 °C) %
1	77,97	76,28	73,30
2	77,28	76,57	76,21
3	77,84	75,09	76,91
4	78,29	76,59	76,68
5	77,62	76,46	75,23
6	78,14	74,94	73,33
7	77,68	76,06	77,57
8	77,56	74,98	72,91
<b>Promedio</b>	<b>77,80 %</b>	<b>75,87%</b>	<b>75,27%</b>
<b>Desv. Est</b>	<b>0,33 %</b>	<b>0,74 %</b>	<b>1,85 %</b>

**4.1.1 Humedad.** La humedad registrada para cada experiencia resultó de un leve descenso desde un promedio máximo de 83,5 % y a un mínimo de 81,1 % (CUADRO 6). Esto puede explicarse, dado que la materia prima para cada tratamiento, fue congelada y descongelada una vez que se realizaba la experiencia, por tanto, la última muestra o lote utilizado de materia prima debiese experimentar el valor más bajo de humedad (la muestra fue la que permaneció el mayor tiempo bajo congelación). El tiempo máximo de permanencia fue de 6 semanas.

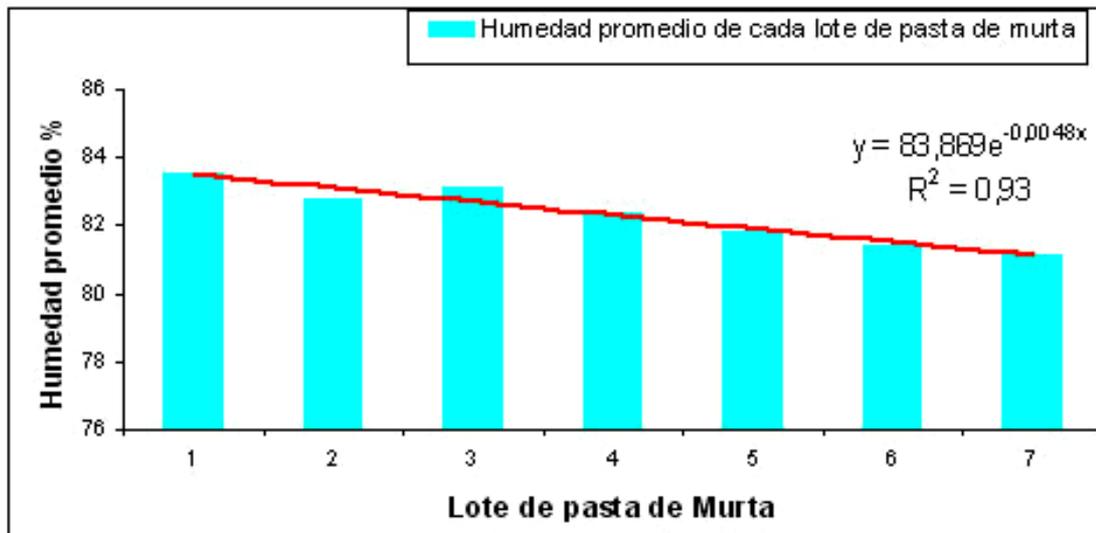
En el CUADRO 6 se han tabulado los valores de humedad promedio para cada tratamiento. Todos los valores determinados para humedad se encuentran en triplicado en ANEXO 2.

CUADRO 6 Humedad promedio de las muestras en los tratamientos

Muestra para el tratamiento Nº	Humedad de la pasta	
	Promedio %	Desviación estándar %
1	83,5	± 0,3
2	82,7	± 0,5
3	83,1	± 0,5
4	82,3	± 0,9
5	81,8	± 0,3
6	81,4	± 0,3
7	81,1	± 0,3

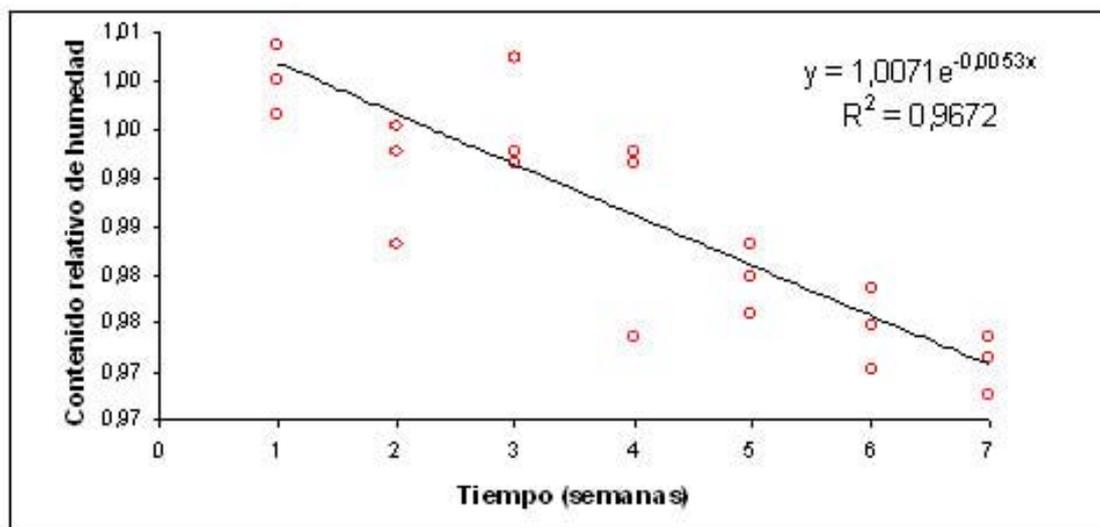
En la FIGURA 5 se observa la leve disminución experimentada por la humedad de las muestras utilizadas en los diferentes tratamientos térmicos; por una parte, esto posiblemente se debió a un efecto de secado dado por la permanencia en el congelador como también a la diversidad de la materia prima; Además es probable que dentro de la misma materia prima exista variación en el grado de madurez y también una diferencia en el contenido de agua. Al realizar un análisis de varianza se observó que existe diferencia estadísticamente significativa entre los valores promedio de humedad de los diferentes tratamientos térmicos.

Para efecto de estudio la disminución de la humedad, que correspondió a un 2% de diferencia entre el promedio mayor y el menor, se asumió como una variación natural del producto, con lo cual, para efecto de caracterización, la humedad promedio de las muestras presentó un valor de para la pasta de murta de 82,3 % con una desviación estándar de  $\pm 1,2$  %. Esto es comparable a lo determinado por SEPÚLVEDA (1994) el cual muestra un contenido de humedad de  $81,5 \pm 0,1$  %. Los datos del análisis estadístico se presentan en el ANEXO 6.



**FIGURA 5** Humedad promedio de las muestras utilizadas para cada tratamiento térmico

Se analizó el comportamiento que experimenta la disminución de la humedad, tomando el contenido de humedad para el primer lote como referencia; para lo cual todos los contenidos relativos de humedad correspondientes a cada lote fueron calculados; para este caso del lote se obtiene un factor igual a 1.



**FIGURA 6** Disminución del contenido relativo de humedad en pasta de murta referida al lote 1

Al analizar la disminución experimentada por la murta durante el almacenamiento, se observa que la baja en la humedad sigue una tendencia en forma exponencial, según la ecuación 4.1, donde después de 7 semanas de almacenamiento la humedad relativa baja a 0,97 y después de 16 semanas de almacenamiento a 0,93.

$$Y = 1,0071e^{-0,0053X}$$

Ecu 4.1

**CUADRO 7 Disminución del contenido de humedad para tres diferentes temperaturas de almacenamiento**

Tiempo de almacenamiento (semanas)	Temperatura de almacenamiento					
	-35 °C		-25 °C		-15 °C	
	Contenido de Humedad					
	Absoluta, g/100 g murta	relativ o	Absoluta g/100 g murta	relativ o	Absoluta g/100 g murta	relativ o
0	79,8 ± 0,5	1,00	77,5 ± 0,6	1,00	73,2 ± 0,4	1,00
8	75,8 ± 0,7	0,95	73,2 ± 0,9	0,94	71,0 ± 1,4	0,97
16	73,4 ± 0,9	0,92	70,3 ± 0,6	0,91	68,0 ± 1,1	0,93

**Fuente: SEPULVEDA, 1994.**

En la literatura SEPÚLVEDA (1994) presentó valores de contenido de humedad en periodos de almacenamiento de 8 y 16 semanas (CUADRO 7). Al analizar estos valores y referirnos al contenido relativo de humedad con respecto a la fecha inicial, se encuentra una alta semejanza con los datos para la murta estudiada; dado que para 8 y 16 semanas de almacenamiento se encontró una humedad relativa de 0,97 y 0,93 respectivamente, lo cual valida la ecuación y demuestra que la relación de disminución, es similar a la disminución observada por SEPULVEDA (1994) para temperaturas de almacenamiento de -15 °C. Se muestra la disminución del contenido de humedad como propia de la murta a esta temperatura de almacenamiento. El descenso fue insignificante en relación

con el contenido de humedad; se observa una reproducibilidad, tanto de la obtención de valores de humedad como de la disminución de ésta, en esta investigación como para SEPULVEDA (1984).

**4.1.2 Densidad.** Análisis estadísticos mostraron que no existe diferencia significativa entre los valores determinados a las muestras de pasta de murta, correspondientes a los diferentes lotes utilizados en cada tratamiento térmico. Por consiguiente se asume la fluctuación en la densidad como una variación propia de productos naturales, encontrando un rango de variación de un máximo de 1,067 g/ml y un mínimo de 1,060 g/ml, los cuales se presentan en el CUADRO 8.

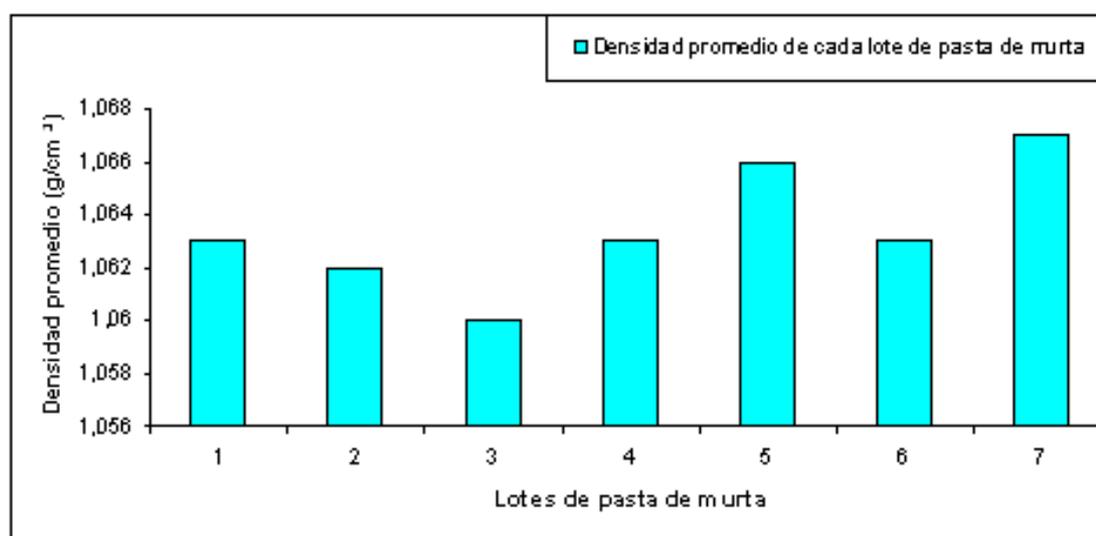
Las repeticiones de las densidades de todos los tratamientos se observan en el ANEXO 3.

**CUADRO 8 Densidad promedio de las muestras en los tratamientos**

Muestra para el tratamiento	Densidad de la pasta a $20 \pm 1$ °C	
	Promedio g / cm <sup>3</sup>	Desviación estándar g/cm <sup>3</sup>
1	1,063	$\pm 0,0042$
2	1,062	$\pm 0,0044$
3	1,060	$\pm 0,0018$
4	1,063	$\pm 0,0021$
5	1,066	$\pm 0,0018$
6	1,063	$\pm 0,0016$
7	1,067	$\pm 0,0015$

Para efecto de estudio de la siguiente investigación, se encuentra una densidad promedio, como forma de caracterización de la pasta de murta, de 1,063 g/ cm<sup>3</sup>

con una desviación estándar de  $\pm 0,003 \text{ g / cm}^3$ . Los datos del análisis estadístico se presentan en el **ANEXO 7**.

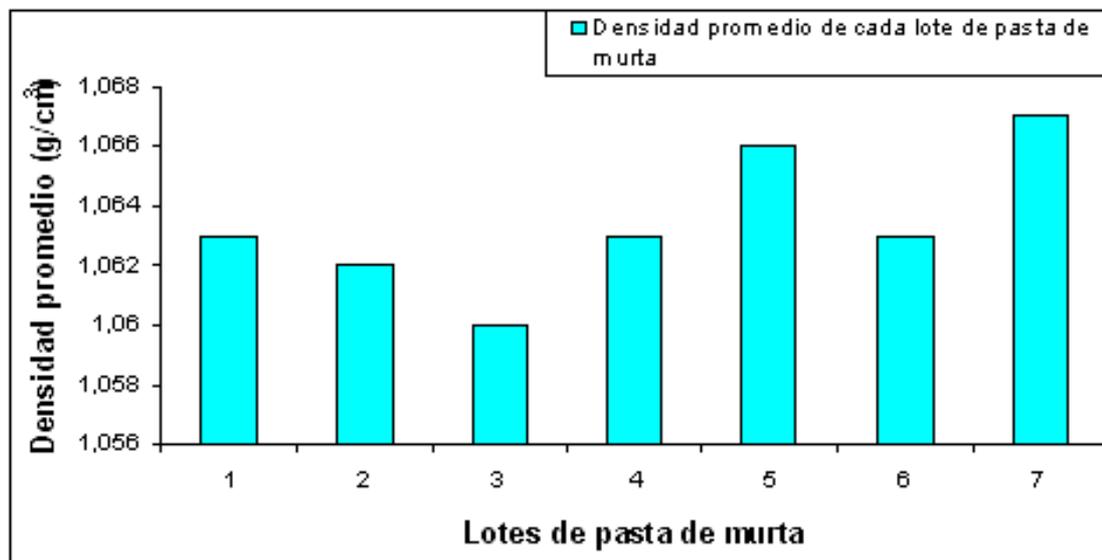


**FIGURA 7** Densidad promedio de las muestras utilizadas para cada tratamiento térmico.

**4.1.3 Sólidos solubles.** Al igual que para la determinación de la densidad los análisis estadísticos mostraron que no existe diferencia significativa, con un grado de confianza del 95 %, entre los valores determinados a las muestras de pasta de murta, correspondientes a los diferentes lotes de pasta de murta utilizados en cada tratamiento térmico. Por consiguiente se asume la fluctuación de los sólidos solubles (medidos como °Brix) como una variación propia de productos naturales, encontrando un rango de variación de un máximo de 15,8 °Brix y un mínimo de 14,6 °Brix, los cuales se presentan en el CUADRO 9. Las repeticiones de los sólidos solubles, en °Brix, de todos los tratamientos se observan en el ANEXO 4.

**CUADRO 9 Sólidos solubles promedio de las muestras en los tratamientos**

Muestra para el tratamiento N°	Sólidos solubles en la pasta	
	Promedio ° Brix	Desviación estándar ° Brix
1	14,6	± 0,00
2	14,9	± 0,06
3	14,9	± 0,06
4	15,2	± 0,06
5	15,4	± 0,00
6	15,5	± 0,06
7	15,8	± 0,06



**FIGURA 8 Sólidos solubles promedio de las muestras para cada tratamiento térmico**

Finalmente para caracterizar la pasta de murta se encuentra un valor promedio correspondiente a 15,2 °Brix con una variación de  $\pm 0,6$  °Brix. Los valores encontrados son superiores a los determinados por SEPULVEDA (1994), los que se encuentran en un rango de  $10 \pm 0,52$  °Brix; con esto se demuestra que las características de producto natural, tal como la murta puede variar bastante al tener diferente procedencia, como también de diferente estado de madurez. Los datos del análisis estadístico se presentan en el ANEXO 8.

#### **4.2 Determinación de la difusividad térmica**

La difusividad térmica es una propiedad termofísica de una sustancia, la cual entrega informaciones acerca de la propagación de calor en dicha sustancia. En la elaboración de productos alimenticios, como también en el diseño de equipos para el procesamiento de alimentos puede resultar de gran utilidad. En la literatura técnica existen para alimentos datos cuantitativos de esta característica, determinada por métodos teóricos con ecuaciones basados en la composición proximal del alimento o por métodos experimentales. En este trabajo se propuso determinar experimentalmente la difusividad térmica de pasta de murta, para esto se registraron y se estudiaron los perfiles de temperatura durante la transferencia de calor a través de la pasta de murta ubicada en un cilindro infinito para un rango de temperatura exterior entre 60 °C y 90 °C.

Para la determinación de la difusividad térmica en la murta, se utilizó un método experimental basado en la transferencia de calor en estado no estacionario o *transiente* y se ocupó un equipo descrito por DICKERSON en 1965 y modificado por POULSEN (1982). La medición lleva mayor precisión si la transferencia de calor se da principalmente por conducción. Visto que para el método es posible la ocurrencia de transferencia de calor también por convección, se hizo una medición control con soluciones de sacarosa para observar el grado de desviación debido a la convección.

**4.2.1 Medición de la difusividad térmica en soluciones de sacarosa.** Como forma de cuantificar el posible efecto de convección producido en la pasta de murta al ser sometida al calentamiento, se midió esta propiedad a diferentes concentraciones y temperaturas de soluciones de sacarosa.

A partir de las experiencias realizadas en los diferentes tratamientos térmicos, y a diferentes concentraciones, se muestran los promedios de la difusividad térmica, (CUADRO 10) y a través de éste se observa una dependencia de la difusividad térmica con la temperatura, mostrando una relación que, al aumentar la temperatura del tratamiento aumenta la difusividad térmica de las soluciones de sacarosa, lo cual indica que a mayor temperatura de exposición de la solución menor es el tiempo para alcanzar la temperatura deseada.

Los valores de todas las repeticiones en las soluciones de sacarosa se presentan en el ANEXO 5.

**CUADRO 10 Difusividad térmica promedio en soluciones de sacarosa**

Concentración °Brix	Tratamiento Térmico $T_m$ ° C	Temperatura inicial de medición $T_o$ ° C,	Difusividad Térmica $10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$	Desviación estándar $10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$
60	50	$20 \pm 1$	2,04	$\pm 0,13$
	60		2,18	$\pm 0,22$
	70		2,25	$\pm 0,08$
70	50	$20 \pm 1$	1,83	$\pm 0,04$
	60		2,12	$\pm 0,06$
	70		2,16	$\pm 0,21$

En relación con la concentración en las soluciones, se observó una relación inversa entre el valor de la difusividad térmica y la concentración en ellas (CUADRO 10), mostrando que soluciones con mayor contenido de agua presentan una velocidad de transferencia de calor más alta; esto es dado que

en soluciones de bajas concentraciones, el agua es uno de los principales componentes y por ende el principal medio de transferencia de energía.

TSCHUBIK y MASLOW (1973) tabularon las propiedades termofísicas de la sacarosa en concentraciones de 60 °Brix (CUADRO 11), con la cual encontraron que la difusividad térmica se encontraba entre los rangos de 1,17 a  $1,19 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$ .

**CUADRO 11 Propiedades termofísicas para soluciones de sacarosa**

Concentración °Brix	Temperatura °C	Propiedades termofísicas		
		$\lambda$ (W/m K)	$C_p$ (J/Kg K)	$\rho$ (g/ml)
60	50	0,433	2906	1,2705
	60	0,440	2951	1,2646
	70	0,447	2996	1,2584

**FUENTE: TSCHUBIK y MASLOW, 1973**

Sobre la base de lo reportado por TSCHUBIK y MASLOW (1973), se calculó la difusividad térmica según la relación que asocia las propiedades termofísicas:

$$a_T = \frac{\lambda}{c_p \rho} .$$

**CUADRO 12 Comparación de valores de medición experimentales y de literatura para difusividad térmica en soluciones de sacarosa**

Concentración ° Brix	Temperatura exterior, °C	Difusividad térmica, $\text{m}^2/\text{s}$		Relación de aumento, 1-(a / b)
		TSCHUBIK y MASLOW	Presente trabajo	
60	50	$1,17 \times 10^{-7}$ (a)	$2,04 \times 10^{-7}$ (b)	43 %
	60	$1,18 \times 10^{-7}$ (a)	$2,18 \times 10^{-7}$ (b)	46 %
	70	$1,19 \times 10^{-7}$ (a)	$2,25 \times 10^{-7}$ (b)	47 %

Con respecto a los valores obtenidos para la difusividad térmica en las soluciones de sacarosa, se manifiesta claramente un notorio aumento en los valores promedio, con respecto a los valores determinados en literatura. (CUADRO 12) Llegando, por ejemplo, a un 43 % de aumento en la experiencia a 50 °C, con una concentración de 60 °Brix.

El aumento encontrado muestra cuan importante es la transferencia de calor por convección en soluciones donde el agua no se encuentra en forma de agua ligada, por esto en las experiencias realizadas en pasta de murta, muestran tanto un efecto de conducción como el de convección en la transmisión del calor.

El modelo utilizado, desarrollado en 1965 por Dickerson (POULSEN, 1982), corresponde a un método con el cual se determina la difusividad térmica en productos donde la transferencia de calor se realiza por conducción. Para el caso particular de trabajar con soluciones de sacarosa, la transferencia de calor se realiza principalmente por conducción pero también existe un efecto de convección el cual crea un incremento en el movimiento de las partículas aumentando significativamente la propagación del calor dentro del cilindro que contiene las soluciones de sacarosa.

La evaluación del método, mediante soluciones de sacarosa, muestra resultados no muy cercanos a los presentados por TSCHUBIK y MASLOW (1973), el cual posiblemente sólo estimó el efecto de conducción en soluciones de sacarosa obviando el efecto de convección. Hay que destacar que los resultados arrojados en la presente investigación muestran que existe una repetibilidad en los diferentes valores encontrados de difusividad térmica en cada tratamiento térmico. Por tanto, como el método nos entrega valores cercanos entre repeticiones (ANEXO 5), es posible asumirlo como válido para la

evaluación en pasta de murta, dado que se puede encontrar también una repetibilidad en los valores de una difusividad térmica efectiva para la pasta. Además, el método para la determinación de la difusividad es válido para productos donde la transferencia de calor se realiza principalmente por conducción, que para el caso de la presente investigación corresponde a pasta de murta.

Este método, según literatura, es usado principalmente para la determinación de la velocidad de transferencia de calor en pastas de alimentos. Existen trabajos de investigación sobre pasta de tomate. En uno de estos trabajos se utilizó dicha pasta a 35 °Brix y una humedad de 65,7 %. Para la evaluación se utilizó el modelo de dickerson, y con la ecuación (3.2), descrita anteriormente se determinó un valor de difusividad el cual fue de  $1,42 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$  para 35 °Brix (DRUSAS Y SARAVACOS, 1985).

Al realizar un análisis de varianza (ANDEVA) se observa que existe diferencia estadísticamente significativa entre los valores de difusividad térmica de las diferentes concentraciones y temperaturas de calentamiento, con un rango de confianza del 95 %; ésto se explica que existe una dependencia de la difusividad térmica con la temperatura, dado que como se observa en los valores del CUADRO 10, la difusividad térmica es mayor en soluciones de sacarosa con un contenido de sólidos menor (60 °Brix), lo que muestra una relación inversa entre la concentración y la difusividad térmica.

El incremento experimentado en el valor de la difusividad térmica, al aumentar la temperatura del medio de calentamiento, se justifica debido que el alto contenido de humedad conlleva a una aceleración en la propagación de calor, al ser el agua el principal medio de transferencia de energía (JIMENEZ y KASAHARA, 1991). Los datos del análisis estadístico se presentan en el ANEXO 9.

**4.2.2 Evaluación en pasta de murta en los diferentes tratamientos térmicos.** Posterior al descongelamiento de las muestras de murta, por alrededor de cuatro horas y debido a que las temperaturas iniciales de las siete experiencias no lograron ser iguales, se procedió a graficar cada curva desde una diferencia de temperatura inicial, como también hasta una final. Esto es para que las repeticiones entre tratamientos puedan ser comparables. Ésta diferencia se refiere a: una temperatura inicial de calentamiento en el centro térmico en relación con la temperatura del medio de calentamiento para el mismo instante. En el CUADRO 13 se detallan los gradientes de temperatura, iniciales y finales, para todos los tratamientos como también se observan sus respectivos perfiles térmicos obtenidos durante las experiencias (ANEXO 13).

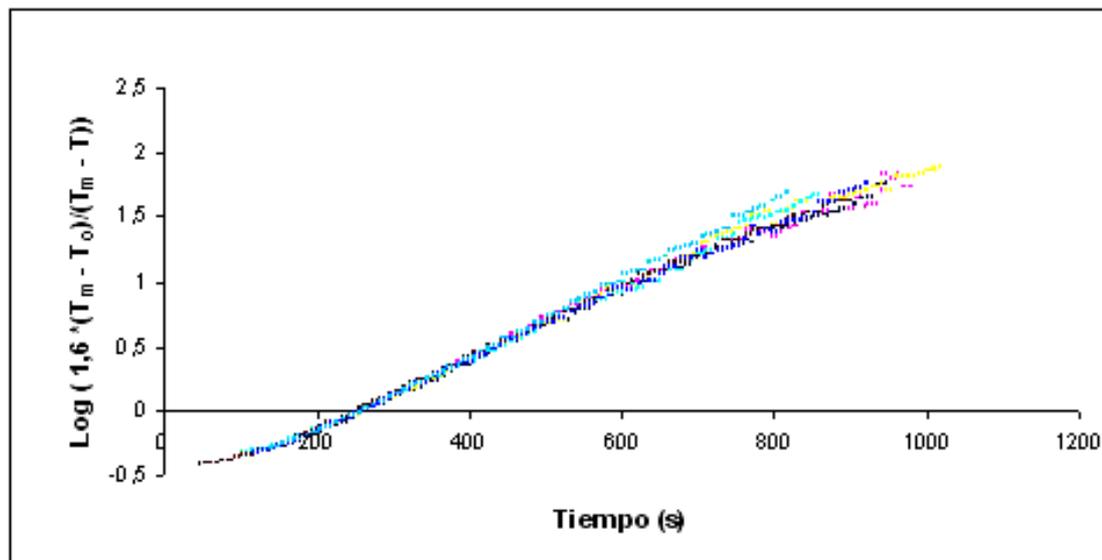
**CUADRO 13 Diferencias de temperatura iniciales y finales**

Tratamiento Térmico, $T_m$ (°C)	Diferencia de temperatura inicial, K	Diferencia de temperatura Final, K	Figura de todas las repeticiones (anexo 13)
60	36	5	A-13.1
65	48	5	A-13.2
70	50	5	A-13.3
75	55	5	A-13.4
80	55	5	A-13.5
85	63	5	A-13.6
90	63	5	A-13.7

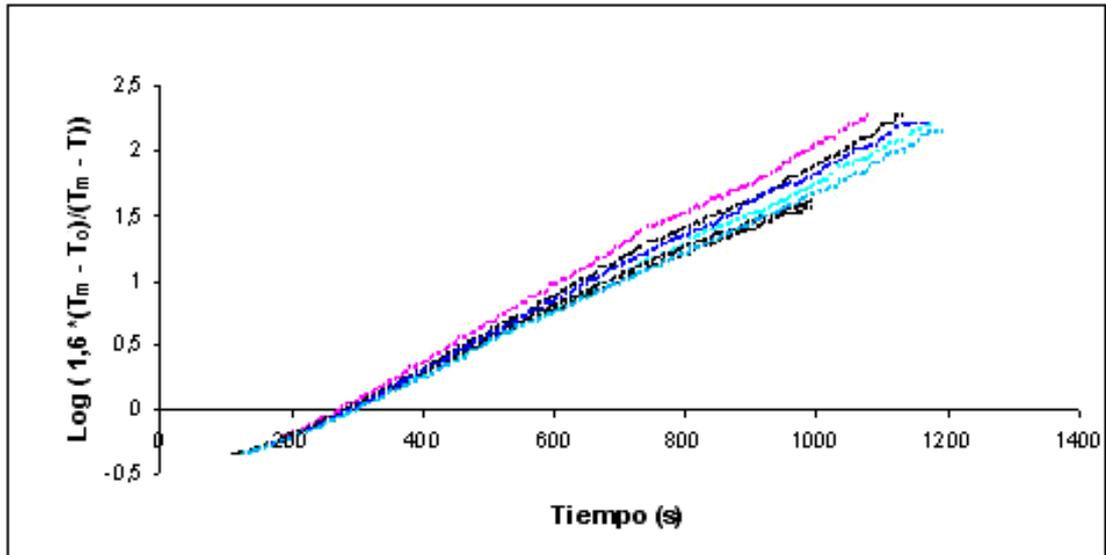
Una vez obtenidos todos los perfiles térmicos de cada repetición y tratamiento (ver ANEXO 13), éstos se linealizaron utilizando la ecuación 3.2 descrita en el capítulo anterior, correspondiente a una recta, utilizando para ello un gráfico semilogarítmico.

A continuación utilizando el método seleccionado para la evaluación y determinación de la difusividad térmica, se evalúan las repeticiones de cada tratamiento térmico.

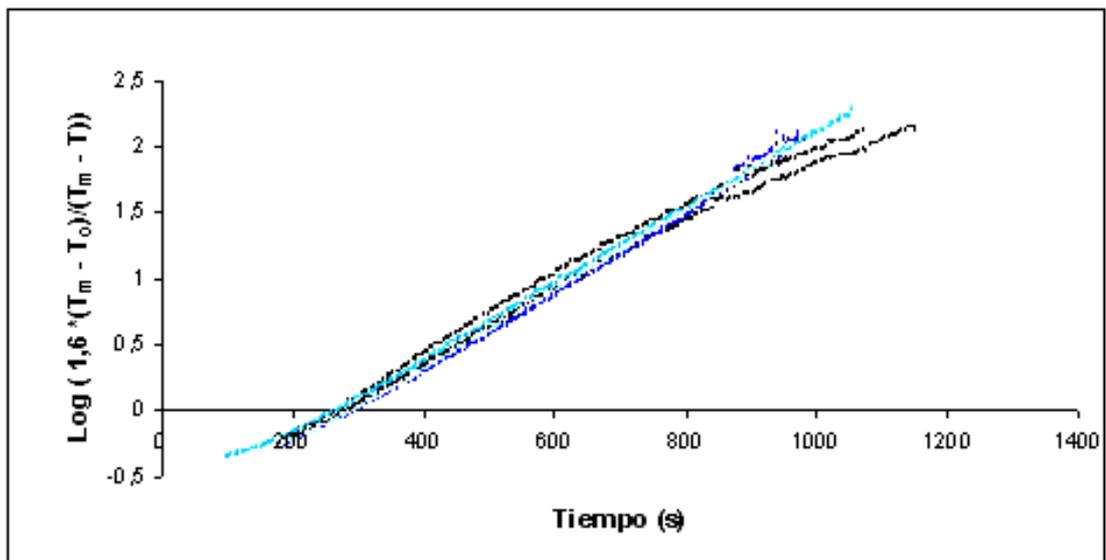
**Difusividad térmica en el tratamiento a 60 °C.** El tratamiento a 60 °C, mostró un promedio de  $1,15 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$ , con un mínimo de  $1,10 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$  y un máximo de  $1,26 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$  (ANEXO 12). Este promedio resultó ser el más bajo de todos los tratamientos como se esperaba, además se ve que a menor temperatura de trabajo también es menor la velocidad de transferencia de calor. En la FIGURA 9 se grafican las repeticiones del tratamiento, mostrando una buena correlación entre ellas.



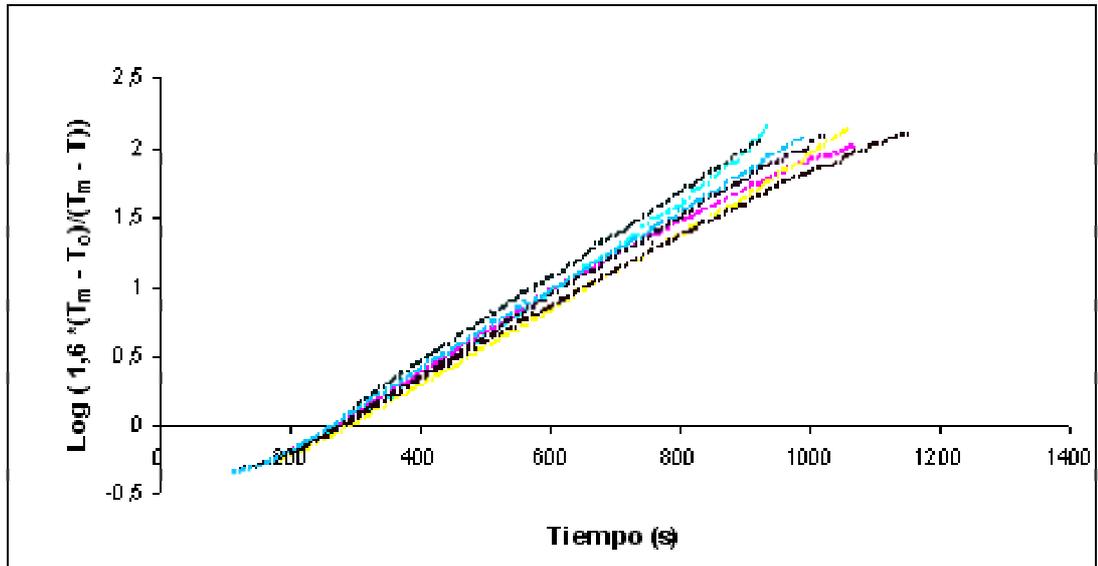
**FIGURA 9** Linealización de los perfiles térmicos correspondientes al tratamiento de 60 °C



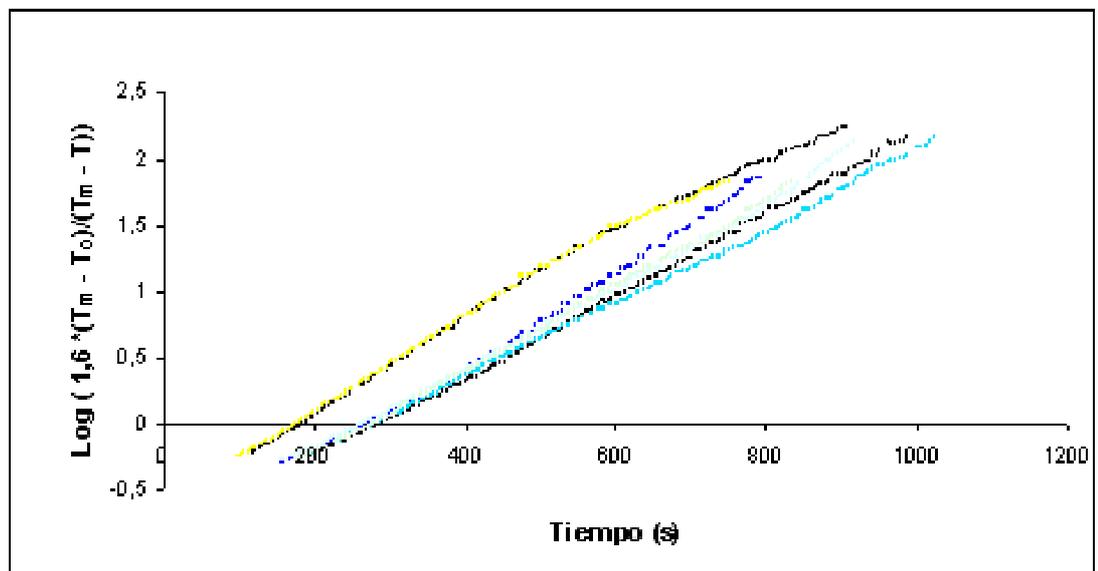
**FIGURA 10** Linealización de los perfiles térmicos correspondientes al tratamiento de 65 °C



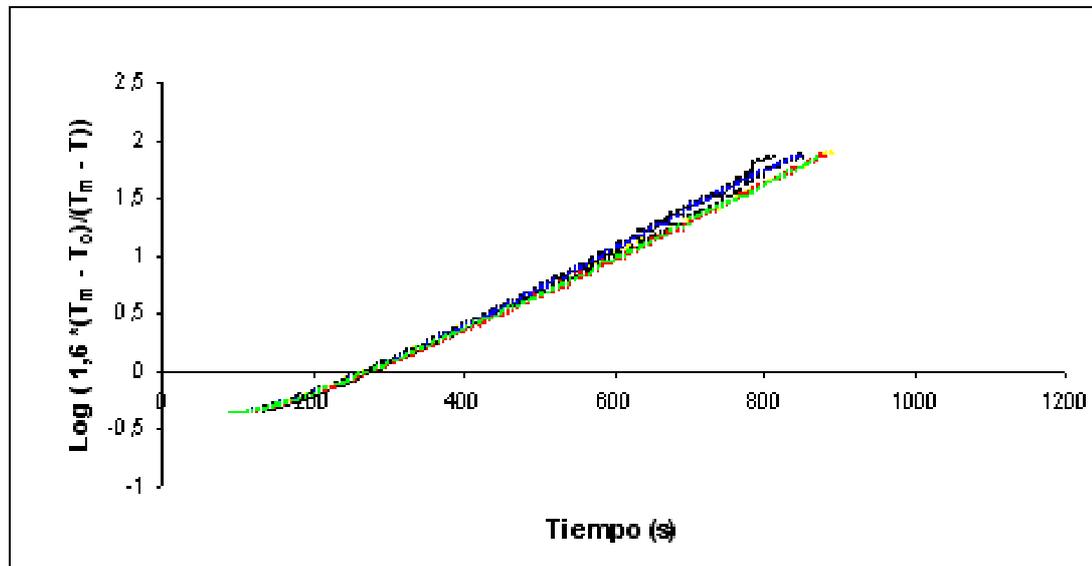
**FIGURA 11** Linealización de los perfiles térmicos correspondientes al tratamiento de 70 °C



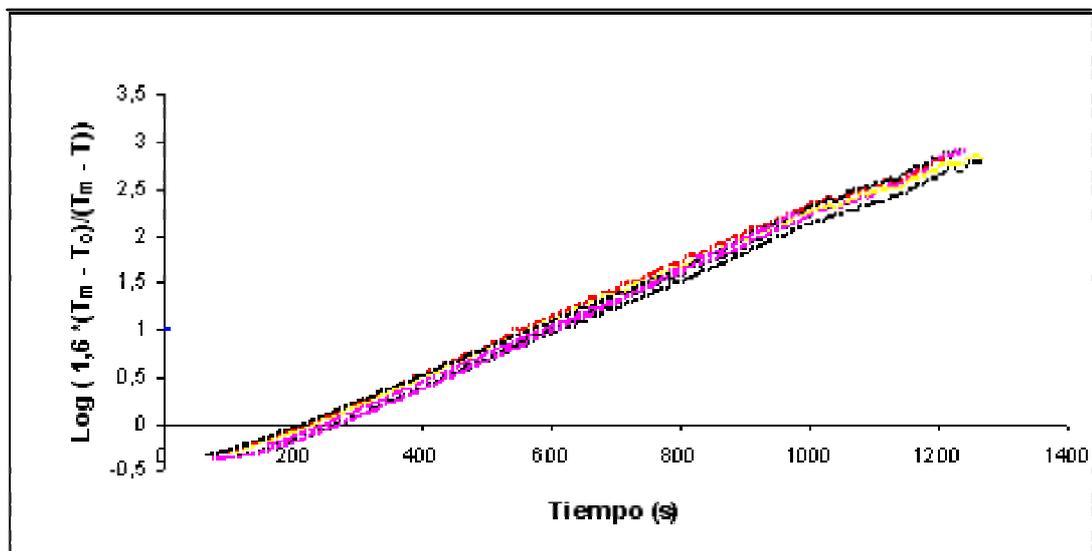
**FIGURA 12** Linealización de los perfiles térmicos correspondientes al tratamiento de 75 °C



**FIGURA 13** Linealización de los perfiles térmicos correspondientes al tratamiento de 80 °C



**FIGURA 14** Linealización de los perfiles térmicos correspondientes al tratamiento de 85 °C



**FIGURA 15** Linealización de los perfiles térmicos correspondientes al tratamiento de 90 °C

**Difusividad térmica en el tratamiento a 65 °C.** El tratamiento a 65 °C, frente a 8 repeticiones, al igual que a 60 °C, mostró un promedio de  $1,15 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$ , con un mínimo de  $1,10 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$  y un máximo de  $1,22 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$  (ANEXO 12). Este promedio resultó ser uno de los más bajos de todos los tratamientos, igual promedio a 60 °C, dado que las temperaturas de trabajo fueron las menores. En la FIGURA 10 se grafican las repeticiones registradas del tratamiento.

**Difusividad térmica en el tratamiento a 70 °C.** El tratamiento a 70 °C, frente a 6 repeticiones, mostró un promedio de  $1,23 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$ , con un mínimo de  $1,10 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$  y un máximo de  $1,31 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$  (ANEXO 12). Es importante resaltar que comienza a incrementarse la velocidad de transferencia de calor, en la pasta de murta, frente a las temperaturas anteriores. En la FIGURA 11 se grafican las repeticiones del tratamiento, mostrando una buena correlación entre ellas.

**Difusividad térmica en el tratamiento a 75 °C.** El tratamiento a 75 °C, correspondiente a 8 repeticiones, mostró un promedio de  $1,25 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$ , con un mínimo de  $1,18 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$  y un máximo de  $1,35 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$  (ANEXO 12). El promedio del tratamiento a 75 °C fue alrededor de un 1,5 % mayor que el promedio del tratamiento a 70 °C, mostrando un aumento de la velocidad de transferencia de calor en la pasta de murta (FIGURA 12).

**Difusividad térmica en el tratamiento a 80 °C.** El tratamiento a 80 °C, refiriéndonos a 8 repeticiones, arrojó un promedio de  $1,34 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$ , con un mínimo de  $1,22 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$  y un máximo de  $1,40 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$  (ANEXO 12). Este promedio resultó, al igual como se esperaba, el tercer promedio más alto (correspondiendo al tercer tratamiento más alto). En la FIGURA 13 se grafican las repeticiones de este tratamiento. Aunque algunas curvas no se superponen, debido a diferentes temperaturas iniciales,

tienen, sin embargo, pendientes casi iguales como se observa claramente en el ANEXO 12.

**Difusividad térmica en el tratamiento a 85 °C.** El tratamiento a 85 °C, para el cual se trabajó con 8 repeticiones, registró un promedio de  $1,35 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$ , con un mínimo de  $1,26 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$  y un máximo de  $1,42 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$  (ANEXO 12). Al igual que la relación 70 - 75 °C, se observa una diferencia de alrededor de un 1 % entre los promedios de difusividad térmica de los tratamientos de 80 y 85 °C, siendo los promedios más altos por debajo del tratamiento a 90 °C. Es importante mencionar que el aumento en la difusividad térmica no presenta un incremento notorio como lo descrito en las temperaturas anteriores, ver FIGURA 14.

**Difusividad térmica en el tratamiento a 90 °C.** Este tratamiento, a 90 °C, registro un promedio de  $1,35 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$ , con un mínimo de  $1,28 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$  y un máximo de  $1,40 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$  (ANEXO 12). Este promedio de difusividad térmica presentó una gran similitud a lo observado a temperaturas de 80 y 85 °C, lo cual muestra que la velocidad de transferencia de calor permanece constante, sin presentar un aumento notorio frente a las temperaturas anteriores. En la FIGURA 15 se muestran las repeticiones y la tendencia de ellas.

En el CUADRO 14 se presentan todos los valores promedio de la difusividad térmica de los tratamientos térmicos. Se observa claramente una dependencia de la difusividad térmica con la temperatura, mostrando un aumento de la difusividad térmica a medida que el tratamiento térmico fue mayor.

Según la prueba de Tukey, con un nivel de confianza del 95 %, se detectaron diferencias significativas en el valor de difusividad térmica entre los diferentes tratamientos (ANEXO 11). Esto corresponde al resultado de tres grupos bien definidos.

**CUADRO 14 Valores experimentales de difusividad térmica promedio en pasta de murta**

<b>Tratamiento</b>	Temperatura exterior ° C promedio	Temperatura Centro inicial $T_0$ ° C	Difusividad térmica Promedio $m^2/s$	Desviación Estándar $\times 10^{-7} m^2/s$
1	$60 \pm 0,3$	$21,0 \pm 2,0$	$1,15 \times 10^{-7}$	$\pm 0,06$
2	$65 \pm 0,4$	$16,1 \pm 1,3$	$1,15 \times 10^{-7}$	$\pm 0,05$
3	$70 \pm 0,2$	$16,8 \pm 2,5$	$1,23 \times 10^{-7}$	$\pm 0,08$
4	$75 \pm 0,5$	$16,9 \pm 1,8$	$1,26 \times 10^{-7}$	$\pm 0,07$
5	$80 \pm 0,5$	$20,2 \pm 1,9$	$1,34 \times 10^{-7}$	$\pm 0,06$
6	$85 \pm 0,4$	$20,1 \pm 0,9$	$1,35 \times 10^{-7}$	$\pm 0,06$
7	$90 \pm 0,2$	$20,1 \pm 2,1$	$1,35 \times 10^{-7}$	$\pm 0,05$

Al realizar análisis estadísticos (ANDEVA) se observa que existe diferencia estadísticamente significativa entre los valores de difusividad térmica de los diferentes tratamientos térmicos con un porcentaje de confianza del 95 %. Según la prueba de Tukey HSD (con un nivel de confianza del 95 %), se detectaron diferencias entre los valores de difusividad térmica, encontrando tres grupos bien definidos los que correspondieron a las temperaturas de 60 - 65 °C; 70 - 75 °C y 80 - 90 °C (ANEXO 11). Con ello se determina que existe diferencia estadísticamente significativa de los tratamientos a 60 y 65 °C frente a los tratamientos de 70, 75, 80, 85 y 90 °C. Esto se ve claramente dado que los promedios expresados muestran, en los tratamientos de 60 y 65, un rango  $1,1 \times 10^{-7} m^2/s$  a diferencia que los otros tratamientos bordean el rango de 1,2 a  $1,3 \times 10^{-7} m^2/s$ .

Se encontró diferencia estadísticamente significativa de los tratamientos a 70 y 75 °C frente a los tratamientos de 80, 85 y 90 °C. Al igual que en el caso anterior estos tratamientos presentan una rango de alrededor de  $1,2 \times 10^{-7} m^2/s$

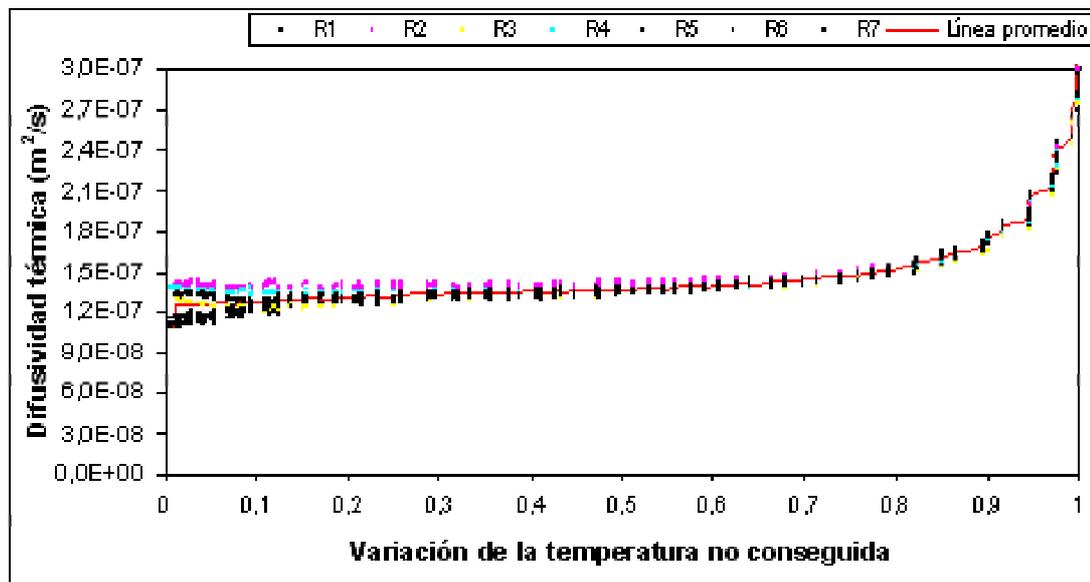
a diferencia de los tratamientos más drásticos que los promedios se encuentra en el orden de  $1,3 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$ .

No se encontró diferencia estadísticamente significativa entre los tratamientos a 80, 85 y 90 °C, dado que todos se encuentran en el mismo rango. Se puede observar que la variación o aumento existente en la difusividad térmica es clara a medida que la temperatura tiene un aumento de 10 K, por tanto existirían 3 grupos o rangos de temperaturas bien definidos. El grado de aumento, experimentado por la pasta de murta en la difusividad térmica, corresponde a alrededor de  $1 \times 10^{-8} \text{ m}^2/\text{s}$ . Finalizada esta relación, difusividad térmica frente a la variación de la temperatura no conseguida, se cuantificó el incremento de la difusividad térmica de calor a medida que aumentaba la temperatura de trabajo (temperatura exterior).

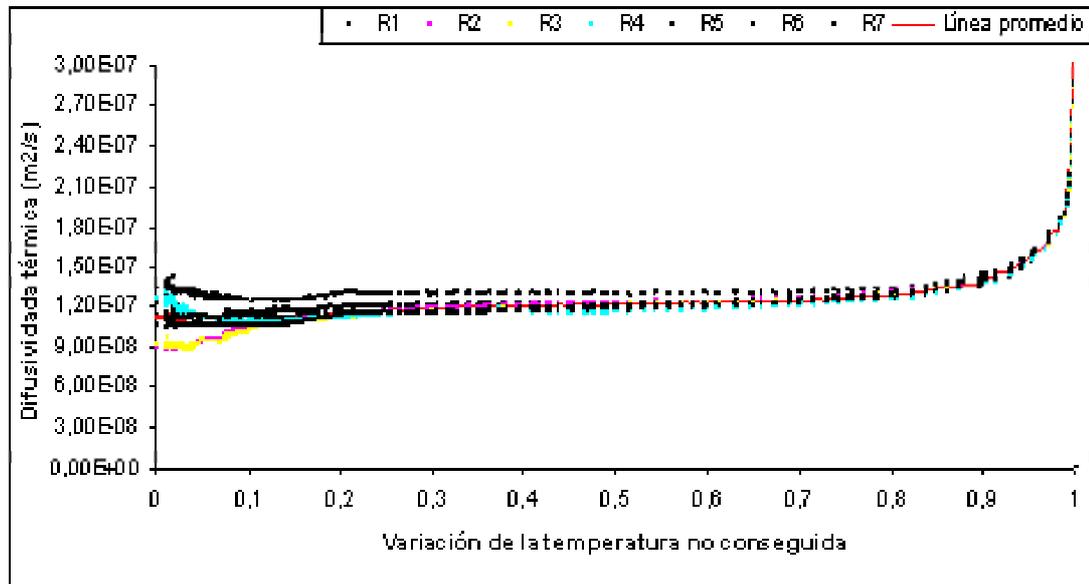
Los análisis estadísticos realizados a todas las repeticiones muestran que los valores de difusividad térmica siguen una distribución normal, sin embargo, algunos de estos valores se encontraron fuera del rango por lo que fueron descartados para no alterar la tendencia de los datos, debido a posibles fuentes de errores tal como la acumulación de aire cerca de la termocupla. Esto ocurre posiblemente debido a que el cilindro no se llenó con la muestra de manera óptima lo que produjo un ingreso de aire aumentando el efecto de convección y del calor latente (SAKIYAMA *et al.*, 1999) y con ello alteró la rapidez de la propagación del calor. Los valores de difusividad térmica de las repeticiones que no fueron incluidas se encuentran destacadas en el ANEXO13.

**4.2.3 Comportamiento de la difusividad térmica frente a la variación de la temperatura no conseguida.** Como forma de analizar la difusividad térmica en cada tratamiento, se observó el comportamiento que experimenta ésta frente a la variación de la temperatura no conseguida.

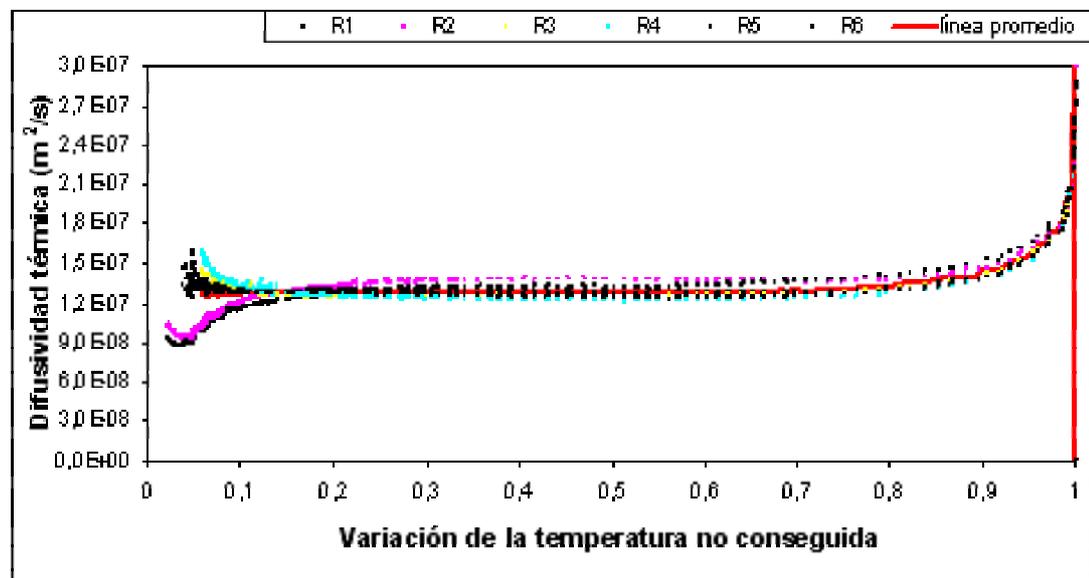
En las siguientes figuras (FIGURAS 16, 17, 18, 19, 20, 21, 22 y 23) se muestra como varía el valor de la difusividad térmica a medida que va aumentando el tiempo de exposición a la temperatura del tratamiento. Mediante este análisis de valores de difusividad térmica, podemos encontrar el rango de fluctuación que experimenta la pasta de murta al estar sometida a diferentes tratamientos térmicos.



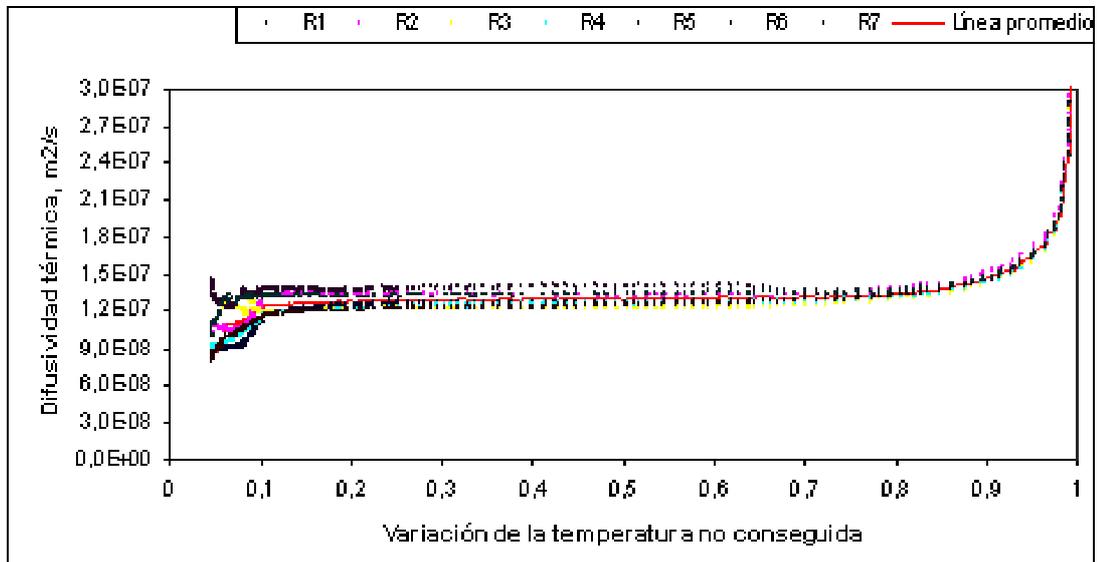
**FIGURA 16** Comportamiento de la difusividad térmica en función de la variación de la temperatura no conseguida a 60 °C



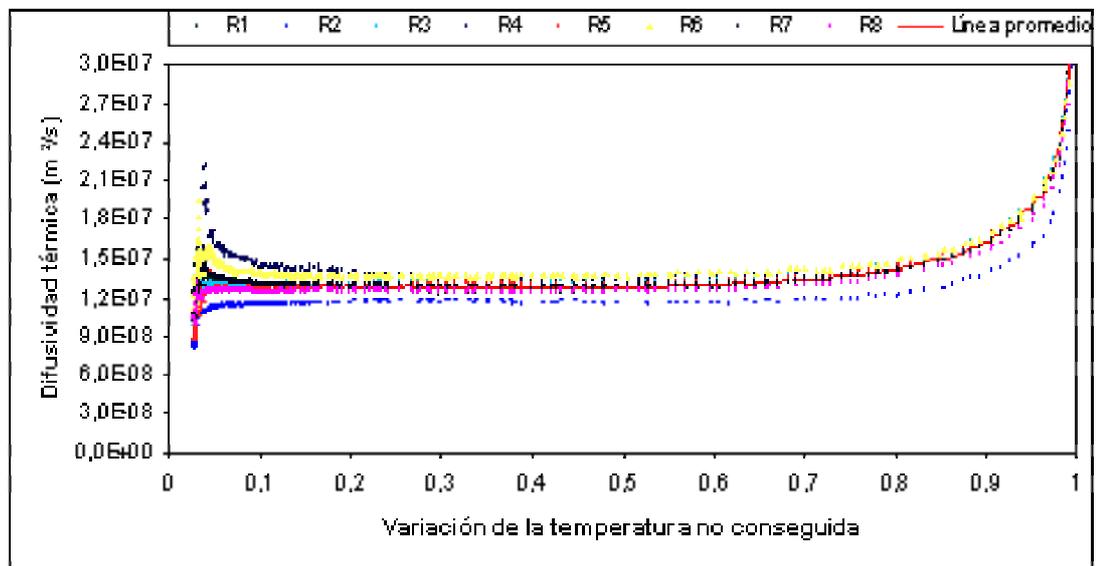
**FIGURA 17** Comportamiento de la difusividad térmica en función de la variación de la temperatura no conseguida a 65 °C



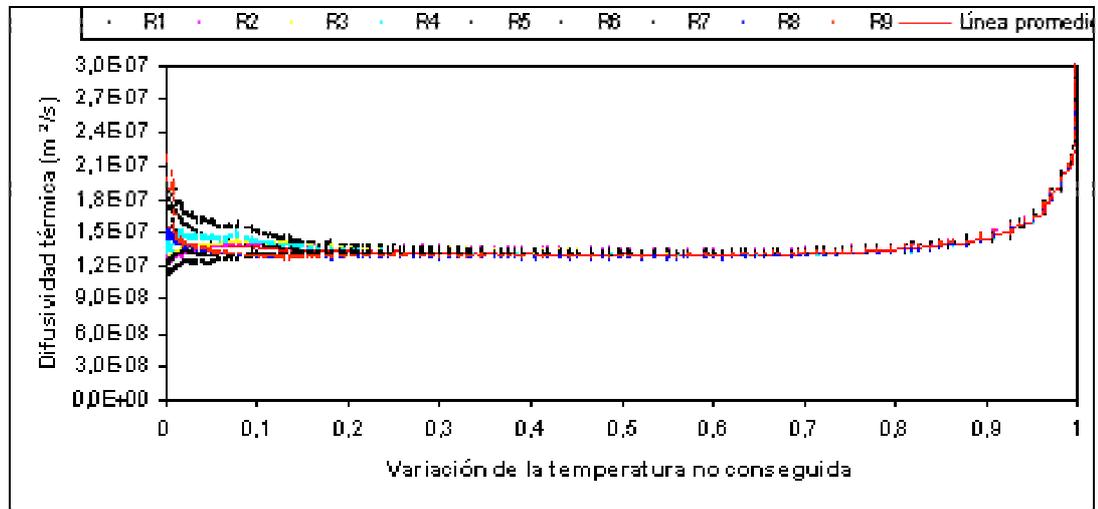
**FIGURA 18** Comportamiento de la difusividad térmica en función de la variación de la temperatura no conseguida a 70 °C



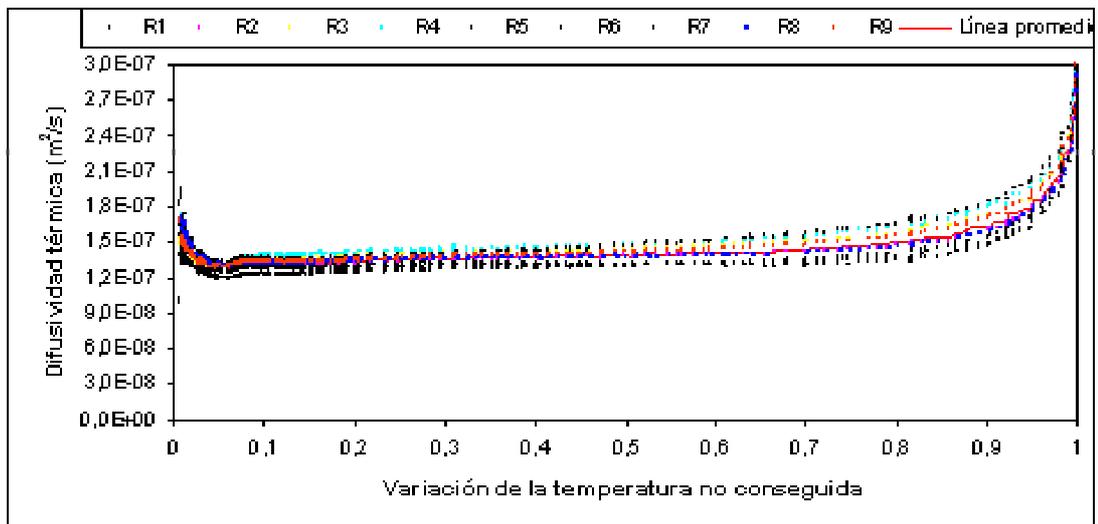
**FIGURA 19** Comportamiento de la difusividad térmica en función de la variación de la temperatura no conseguida a 75 °C



**FIGURA 20** Comportamiento de la difusividad térmica en función de la variación de la temperatura no conseguida a 80 °C



**FIGURA 21** Comportamiento de la difusividad térmica en función de la variación de la temperatura no conseguida a 85 °C



**FIGURA 22** Comportamiento de la difusividad térmica en función de la variación de la temperatura no conseguida a 90 °C

El rango, tomado como referencia, es el tramo constante que corresponde de 0,2 a 0,8 en la variación de la temperatura no conseguida. Se descartan los tramos iniciales y finales dado que, en el primer tramo (inicio del tratamiento correspondiente de 1 a 0,8) se registra la mayor fuerza impulsora, logrando un rápido calentamiento de la pasta y por ende se observa una gran variación en el valor de la difusividad térmica. El tramo final (correspondiente de 0,2 a 0) corresponde a la etapa final del tratamiento donde la fuerza impulsora disminuye al mínimo, acercándose a la temperatura de calentamiento y logrando una gran variabilidad en los valores de difusividad.

En las FIGURAS 16, 17, 18 se observa que el rango de variación que experimenta la difusividad térmica de la pasta de murta (para los tratamientos a 60, 65 y 70 °C, respectivamente) presentando un valor promedio que se encuentra entre  $1,10 \times 10^{-7}$  a  $1,30 \times 10^{-7}$  m<sup>2</sup>/s. (Tomando en cuenta la zona constante de la grafica). La FIGURA 19 muestra el rango de variación que experimenta la difusividad térmica, presentando un valor promedio que se encuentra entre  $1,20 \times 10^{-7}$  a  $1,35 \times 10^{-7}$  m<sup>2</sup>/s.

En las FIGURAS 20 y 21 se observan los rangos de variación que experimenta la difusividad térmica, para cada experiencia (80 y 85 °C, respectivamente) presentando un valor promedio que se encuentra entre un rango de  $1,25 \times 10^{-7}$  a  $1,40 \times 10^{-7}$  m<sup>2</sup>/s; igual rango para el tratamiento a 85 °C. La difusividad promedio se presenta entre  $1,25 \times 10^{-7}$  a  $1,45 \times 10^{-7}$  m<sup>2</sup>/s, para el tratamiento a 90 °C (FIGURA 22).

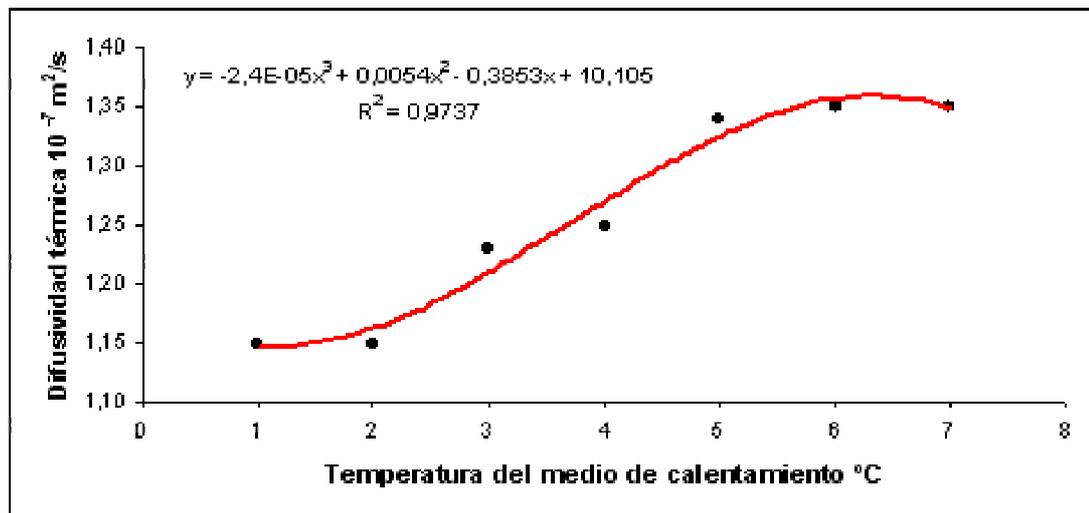
Con esta forma de análisis, se logró encontrar la variación en la difusividad térmica que experimenta la pasta de murta y el rango donde se encuentra el valor promedio de dicha propiedad.

#### 4.2.4 Evaluación de la difusividad térmica en función de la temperatura.

La difusividad térmica determinada por el método seleccionado, nos muestra una dependencia frente a la temperatura del medio de calentamiento con una temperatura inicial de la pasta de  $18,7 \pm 2$  °C (FIGURA 23), la cual está referida a los valores de cada repetición que se describen en el ANEXO 12 y posteriormente se extraen los promedios (CUADRO 14).

En la FIGURA 23, se observa una buena correlación de los promedios de cada tratamiento térmico, además de, tal como se comprobó en el análisis estadístico, los valores promedio obtenidos van aumentando en un rango de 10 K.

Como se ha visto, en el rango de temperaturas de 60 a 90 °C, hay un aumento en la difusividad térmica en la pasta de murta, con la particularidad que se presenta una velocidad de transferencia de calor casi constante en los tratamientos de 60 y 65 °C, un claro aumento hasta llegar a los 80 °C y valores casi constantes entre las temperaturas de 80 a 90 °C.



**FIGURA 23 Variación de la difusividad térmica en función de la temperatura del medio de calentamiento para una pasta de murta de 82,3 % humedad**

Para efectos prácticos de trabajo en pasta de murta, es importante rescatar que la transferencia de calor no presenta diferencia en rapidez de calentamiento de 80 a 90 °C, con lo cual para tratamientos de escaldado de la fruta, se puede recomendar trabajar a temperaturas de 80 °C, considerando que se presentaría el mismo efecto con temperaturas más altas y se evitaría un daño innecesario a la fruta; sin mencionar una optimización y reducción de energía en los equipos (al trabajar a menor temperatura).

El comportamiento de la velocidad de transferencia de calor, presenta una tendencia similar a lo registrado en literatura para el caso del agua, dado que la pasta de murta registró un promedio de humedad cercano a 82,3 %.

Finalmente se encuentra una correlación matemática que muestra el comportamiento de la difusividad térmica frente a la temperatura, en el rango de 60 a 90 °C, obteniendo una ecuación polinómica de tercer orden, correspondiendo a:

$$a_T = aT^3 + bT^2 + cT + d$$

Esta relación es válida para el intervalo  $0,2 < \theta < 0,8$

Donde a :  $-2,4 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s } ^\circ\text{C}^3$

b :  $0,0054 \text{ m}^2/\text{s } ^\circ\text{C}^2$

c :  $-0,3853 \text{ m}^2/\text{s } ^\circ\text{C}$

d :  $10,105 \text{ m}^2/\text{s}$ .

T : corresponde a la temperatura del medio de calentamiento, en °C.

Algunos autores proporcionan fórmulas o modelos matemáticos para determinar propiedades termofísicas en alimentos, uno de estos trabajos corresponde en 1983 a MILES *et al.*, citado en (JOWITT *et al.*, 1983), el cual determina la difusividad térmica de alimentos en función de la difusividad térmica del agua a

una temperatura determinada y la fracción de agua del alimento, esta relación corresponde a la ecuación 4.2.

$$a_T = 0,088 \cdot 10^{-6} + (a_{T_{agua}} - 0,088 \cdot 10^{-6}) \cdot X_{agua} \quad \text{Ecc 4.2}$$

Los valores de difusividad térmica correspondientes al rango de temperatura de 60 a 90 °C para la pasta de murta se encuentran en e CUADRO 15.

CHOI y OKOS (1986) entregan un modelo matemático basado en el cálculo de la difusividad térmica de cada componente del alimento (% humedad, % proteínas, % lípidos, % carbohidratos, % fibra y % ceniza), obteniendo una difusividad térmica del alimento equivalente a la suma de las difusividades térmicas de los componentes. Basados en los valores reportados por SCHMIDT-HEBBEL (1985) para la murta, se estimó un proximal de la pasta de murta referida a la humedad correspondiente a esta para utilizar el modelo de CHOI y OKOS. Los valores estimados de difusividad térmica para la pasta de murta se presentan en el CUADRO 15

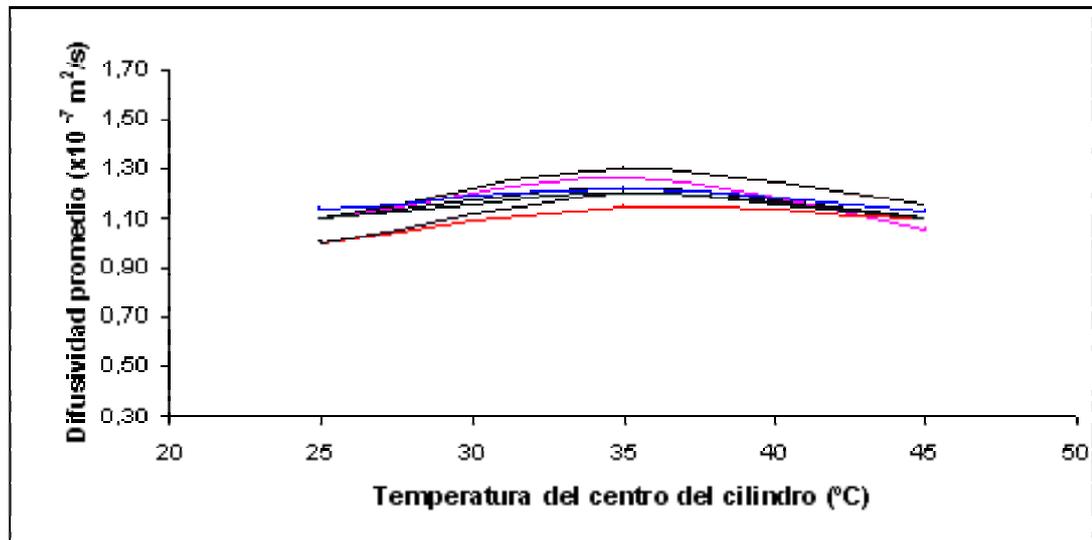
**CUADRO 15 Comparación de difusividad térmica efectiva de la pasta de murta con valores calculados matemáticamente**

		Difusividad térmica de la pasta de murta, m <sup>2</sup> /s				
Temperatura (°C)	Humedad %	Experimental (A) 10 <sup>-7</sup>	Miles (B) 10 <sup>-7</sup>	% aumento	CHOI y OKOS (C) 10 <sup>-7</sup>	% aumento
60	83,5	1,15	1,46	27	1,392	21
65	82,7	1,15	1,48	29	1,393	21
70	83,1	1,23	1,19	21	1,396	14
75	82,3	1,25	1,50	20	1,392	11
80	81,8	1,34	1,51	13	1,388	4
85	81,4	1,35	1,52	13	1,392	3
90	81,1	1,35	1,53	13	1,387	3

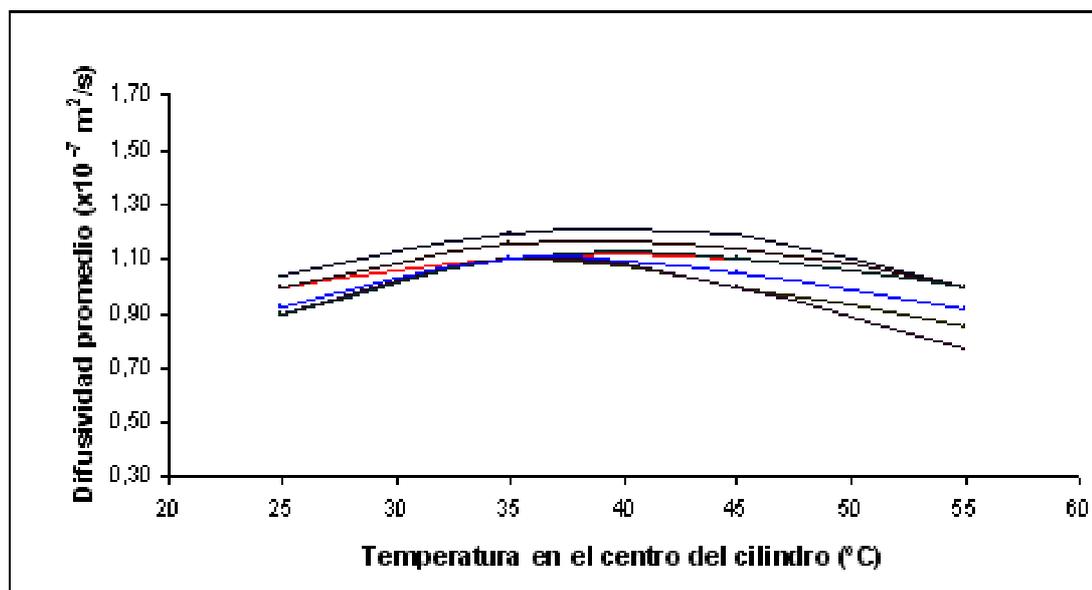
Según el CUADRO 15 los modelos matemáticos presentan un aumento en el valor de la difusividad térmica, llegando para MILES *et al.*,(1983) y CHOI y

OKOS (1986) a un 29 y 21 % de aumento respectivamente; es importante destacar que los valores determinados por el modelo de MILES *et al.*, presentan un comportamiento similar al del agua como también la presente investigación, es decir, una dependencia de la difusividad térmica con la temperatura, a diferencia de CHOI y OKOS (1986) que muestra una difusividad térmica constante frente a la temperatura. Hay que tener presente que los modelos matemáticos asumen el alimento como un producto homogéneo, por tanto la diferencia encontrada posiblemente puede deberse que para el caso de la pasta de murta, ésta presenta una gran cantidad de semillas, las cuales podrían incidir en la menor propagación del calor, aumentando la resistencia a este.

**4.2.5 Evaluación del comportamiento que experimenta la difusividad térmica de la murta en las experiencias,** Las experiencias realizadas a diferentes temperaturas de trabajo reflejan un comportamiento diferente a medida que va siendo más drástico el tratamiento térmico, Esto es, se determinó la difusividad térmica de la murta utilizando la ecuación 3,2 pero con la diferencia que se realizó para intervalos de temperatura de 10 K, El análisis realizado muestra la variación que experimenta la difusividad térmica desde una temperatura inicial hasta alcanzar la temperatura exterior de calentamiento,



**FIGURA 24** Variación de la Difusividad térmica durante el tratamiento a 60°C



**FIGURA 25** Comportamiento de la Difusividad térmica en el tratamiento a 65°C

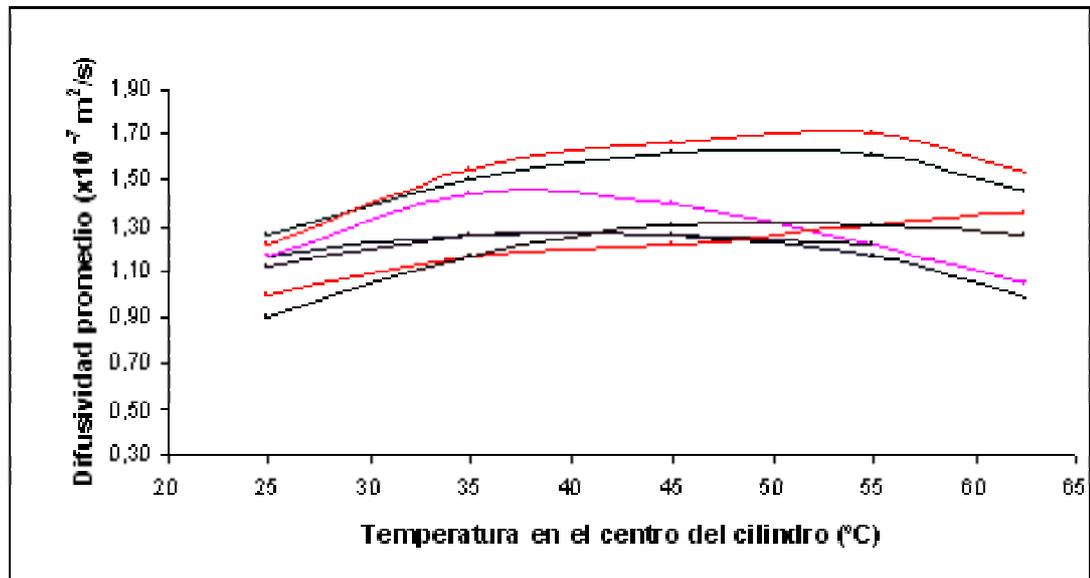


FIGURA 26 Variación de la Difusividad térmica en el tratamiento a 70°C

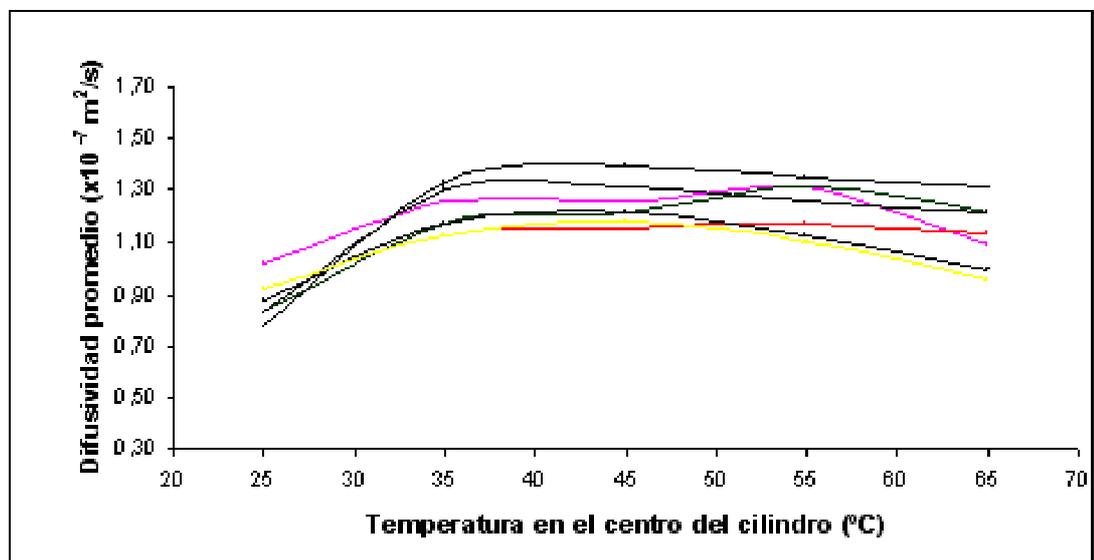


FIGURA 27 Comportamiento de la Difusividad térmica durante el tratamiento a 75 °C

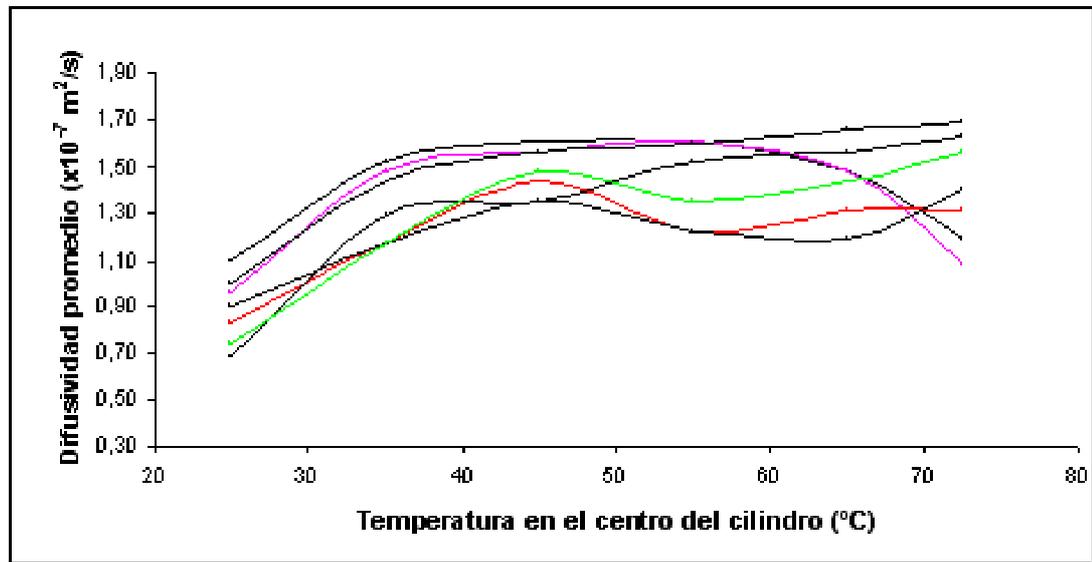


FIGURA 28 Variación de la Difusividad térmica en el tratamiento a 80°C

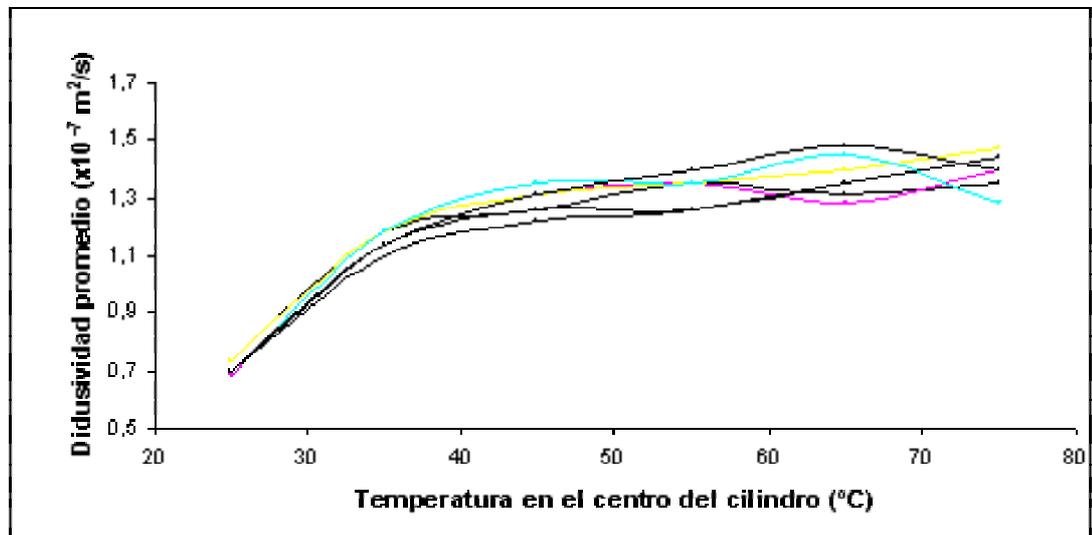
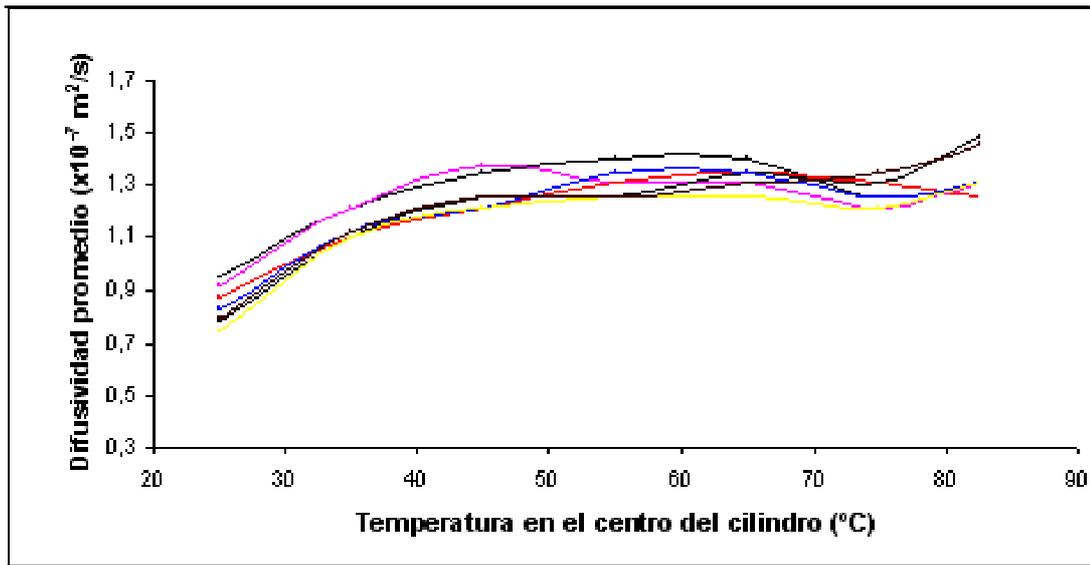


FIGURA 29 Comportamiento de la Difusividad térmica durante el tratamiento a 85 °C



**FIGURA 30 Variación de la Difusividad térmica durante el tratamiento a 90 °C**

Como se aprecia a continuación, los tratamientos más bajos (60, 65 y 70 °C) experimentaron un descenso de la difusividad térmica a medida que la pasta de murta alcanzaba la temperatura de trabajo (FIGURAS 24, 25 y 26), ésto puede deberse a que la fuerza impulsora ( $\Delta T$ ) decrece en gran medida cuando se acerca a la temperatura límite,

Un caso particular es lo que ocurre en los tratamientos de 75 y 80 °C (FIGURAS 27 y 28), donde se aprecia que al inicio de la experiencia, presenta un aumento más drástico en la difusividad térmica (mayor fuerza impulsora) que los tratamientos más bajos, La difusividad térmica de la pasta no presenta una disminución en su valor al aproximarse a la temperatura de trabajo, encontrándose una tendencia a permanecer constante,

Los tratamientos a temperaturas más elevadas, 85 y 90 °C, presentaron un alza notoria en el valor difusividad térmica, en el inicio de la experiencia (FIGURAS 29 y 30), mostrando un leve aumento durante toda la experiencia, Los valores

promedio de la difusividad térmica en la pasta de murta para cada intervalo esta tabulado en el ANEXO 16.

Las curvas presentaron un alza del valor difusividad en las proximidades de alcanzar la temperatura del medio de calentamiento (temperatura de trabajo), Esto puede deberse a que:

La pasta de murta comienza a experimentar un cambio en su consistencia debido, posiblemente, a una modificación en su estructura (posible ruptura molecular); si se asume una ruptura molecular puede que presente características similares al agua (ANEXO 14) y por ende un incremento en la propagación del calor, Hay que tener claro que la pasta de murta presenta un contenido de agua promedio de  $82,3 \pm 1,2$  % y lo más probable es que presente un comportamiento similar al agua,

La fuerza impulsora ( $T_m - T_o$ ), juega un rol importante en lo referido al desarrollo del experimento, dado que en las experiencias que presentaron una temperatura mayor, presentaban una mayor fuerza impulsora, se observo un aumento más pronunciado en el principio del tratamiento, como también refleja una tendencia al aumento cuando se acerca a la temperatura de trabajo, Además se observa que a medida que el tratamiento se hace más drástico disminuye la resistencia a la transferencia del calor, a diferencia de los tratamientos a temperaturas más baja donde la resistencia a la transferencia del calor es mayor.

## 5. CONCLUSIONES

La determinación de la difusividad térmica en la pasta de murta sometida a diferentes tratamientos térmicos, demostró la dependencia de ésta con la temperatura. La tendencia de la difusividad térmica en la pasta es muy similar a la presentada para el agua, esto se cumple dado que la pasta tiene un alto contenido de ella. Modelos matemáticos también demuestran la dependencia con la temperatura.

Los valores obtenidos de difusividad térmica para la pasta, se encuentran en el rango dado especificado para frutas y vegetales, como también presenta una importante similitud con frutos que presentan un promedio de humedad y características semejantes, especialmente en pastas de otros frutos (CUADRO 1).

Es importante destacar que la pasta de murta, supuestamente va experimentando una alteración en su estructura, a medida que el tratamiento térmico es más drástico, posiblemente con esto la tendencia que experimenta la velocidad de transferencia de calor va en aumento, lo cual es muy semejante a la curva presentada para agua.

Se encuentra que la pasta de murta presenta una difusividad térmica promedio de:

Rango de 60 a 70 °C, un valor de  $1,15 \pm 0,06 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$ ; rango de 70 a 80 °C, un valor de  $1,24 \pm 0,07 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$ ; rango de 80 a 90 °C, un valor promedio de  $1,34 \pm 0,06 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$ . Es importante destacar que el aumento de la difusividad térmica cada 10 K es del orden de  $1 \times 10^{-8} \text{ m}^2/\text{s}$ .

Como se presenta en la siguiente investigación hay un aumento de la difusividad térmica en la pasta de murta, con la particularidad que se presenta una velocidad de transferencia de calor casi constante en los tratamientos de 60 y 65 °C, un claro aumento hasta llegar a los 80 °C y una zona casi constante entre las temperaturas de 80 a 90 °C. El aumento más importante se manifiesta entre 65 y 80 °C y es aquí donde se ve claramente como la transferencia de calor se realiza con mayor rapidez a medida que la temperatura de exposición de la pasta de murta es mayor.

Para efectos prácticos de trabajo en pasta de murta, es importante rescatar que la velocidad de la transferencia de calor no presenta diferencia en la rapidez de calentamiento en un medio a temperatura entre 80 a 90 °C, con lo cual para tratamientos de escaldado de la fruta, se puede recomendar trabajar, por ejemplo, a temperaturas de 80 °C en lugar de 90 °C, considerando que se presentaría el mismo efecto para temperaturas más altas y se evitaría un daño innecesario a la fruta; sin mencionar una optimización y reducción de energía en los equipos.

Finalmente se encuentra una relación matemática con la cual se puede interpolar un valor de difusividad térmica para un rango de trabajo en un medio de calentamiento entre 60 y 90 °C, con una temperatura promedio inicial de la pasta de  $18,7 \pm 2$  °C. Esta correlación matemática corresponde a una ecuación polinómica de tercer orden, dada de la siguiente forma:

$$a_T = -2,4 \cdot 10^{-5} T^3 + 0,0054 T^2 - 0,3853 T + 10,105$$

siendo  $a_T$  = difusividad térmica ( $m^2/s$ ), y  $60 \text{ °C} \leq T \leq 90 \text{ °C}$ . La ecuación es válida para una variación de la temperatura no conseguida de  $0,2 < \theta < 0,8$

La ecuación polinómica presenta un coeficiente de correlación  $R^2 = 0,9737$

Los análisis realizados para caracterizar la materia fueron la determinación de humedad, densidad y sólidos solubles. Para el caso de humedad, se encontró un contenido promedio de 82,3 % y una desviación estándar de  $\pm 1,2$  %.

En la medición de la concentración de sólidos solubles (medidos en °Brix), se observó una relación inversa en relación con el contenido de humedad de la muestra. los análisis estadísticos mostraron que no hay una diferencia significativa entre las mediciones correspondientes a cada muestra, por tanto la variación existente en la murta se asume como natural y propia de ella. Como forma de caracterización de la pasta de murta se presenta un valor promedio de  $15,2 \pm 0,6$  °Brix.

En relación con la densidad, se encontró un valor promedio para caracterizar la pasta de murta que corresponde a 1,063 g/ml con una desviación estándar de  $\pm 0,003$  g/ml. Los análisis estadísticos mostraron que no existe diferencia significativa entre los promedios de las muestras de la murta utilizada, de procedencia de punucapa (Valdivia).

## 6. RESUMEN

La presente investigación tuvo como fin, mediante procedimientos experimentales, la determinación de la difusividad térmica en pasta de murta (*Ugni molinae* Turcz) en un rango de temperatura de 60 a 90 °C y su dependencia con la temperatura. Para ello se construyó, basándose en diseños presentados en bibliografía, los equipos para medir la difusividad térmica. La metodología corresponde a la utilizada en 1965 por Dickerson y modificada por POULSEN (1982).

Mediante la metodología se encontró que la pasta de murta presenta una difusividad térmica promedio, para una humedad de 82,3 % de:

$1,15 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$  en el rango de 60 a 70 °C,  $1,24 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$  en el rango de 70 a 80 °C y de  $1,35 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$  en el rango de 80 a 90 °C. Modelos matemáticos reafirman la dependencia de la difusividad térmica con la temperatura.

Finalmente se encuentra una relación matemática con la cual se puede interpolar un valor de difusividad térmica para un rango de trabajo de entre 60 y 90 °C. Esta correlación matemática corresponde a una ecuación polinómica de tercer orden, dada de la siguiente forma:

$$\alpha_T = -2,4 \times 10^{-5} T^3 + 0,0054 T^2 - 0,3853 T + 10,105$$

$$\alpha_T = \text{Difusividad térmica (m}^2/\text{s)}$$

donde la temperatura T debe encontrarse en el rango de 60 a 90 °C.

La ecuación polinómica presento una correlación con un  $R^2 = 0,9737$ . Para caracterizar la materia prima utilizada se determinó la humedad encontrando un valor promedio de 82,3 con una desviación estándar de  $\pm 1,2 \%$ . Los parámetros de densidad y sólidos solubles no presentaron

diferencia estadísticamente significativa, lo cual indica que la variación que presentan correspondería a una variación propia de productos naturales, como el caso de la murta. Se encuentra en esta investigación valores de densidad con un valor promedio de  $1,063 \pm 0,003$  g/ml; Sólidos solubles (medidos como °Brix) con un promedio de 15,2 y una desviación estándar de  $\pm 0,6$  °Brix.

Para la presente investigación se utilizó una variedad de murta de procedencia de Punucapa (Valdivia).

## SUMMARY

The aim of this investigation was to determine experimentally the thermal diffusivity of murta puree (*Ugni molinae* Turcz) in a range of temperature between 60 and 90 °C and investigate its dependence on temperature. To achieve this an apparatus was constructed according to design obtained from literature. The methodology corresponds the one used by Dickerson and modified by POULSEN (1982).

By means of the methodology it was found that the puree of murta with a water content of 82,3 % has an average thermal diffusivity of:  $1,15 \pm 0,06 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$  in the temperature range of 60 to 70 °C,  $1,24 \pm 0,07 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$  in the temperature range of 70 to 80 °C, and  $1,35 \pm 0,06 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$  in the temperature range of 80 to 90 °C.

Finally a mathematical relationship to calculate thermal diffusivity in a range of temperature between 60 and 90 °C was found. This mathematical correlation corresponds to a polynomial equation of third order, as follows:

$$a_T = -2,4 \cdot 10^{-5} T^3 + 0,0054 T^2 - 0,3853 T + 10,105$$

whereby  $a_T$  = thermal diffusivity ( $\text{m}^2/\text{s}$ ), and  $60 \text{ °C} \leq T \leq 90 \text{ °C}$ . and a relative temperature variation between  $0,2 < \theta < 0,8$

The polynomial equation presents a correlation coefficient of  $R^2 = 0,9737$

For the present investigation a variety of murta from Punucapa, Valdivia was used. To characterize the raw material used, water content was determined and an average value of 82,3 % with a standard deviation  $\pm 1,2\%$  was found.

The parameters of density and soluble solids did not present any statistically significant difference which indicates that the variation shown would correspond to a variation characteristic of natural products, as in the case of murta. Values of density were on average  $1,063 \pm 0,003 \text{ g/cm}^3$ , and soluble solids on average  $15,2 \pm 0,6 \text{ °Brix}$ .

## 7. BIBLIOGRAFIA

- ALEA, P.; RAMIREZ C., 1993. Análisis y Composición de Aceite en Semilla de Murta (*Ugni molinae*). Alimentos. 18: 11 -14.
- A.O.A.C., 1995. ASSOCIATION OF OFFICIAL ANALYTICAL CHEMISTS. Oficial Methods of Analysis. Ed. Arlington. USA. 37: 2
- CHOI, Y.; OKOS, M., 1986. Effect of temperature and composition on the thermal properties of foods In: LE MAGUER, M.,1986. Food Engineering and Process Applications. Elsevier Applied Science Publisher. London. 613p.
- DRUSAS, A. E., and SARAVACOS G.D., 1985. Thermal Conductivity of Tomato Paste. J. Food Eng. 4: 157 -168.
- FELLOWS, P., 1988. Processing Technology, Principles and Practice. Ellis Horwood series in Food and Technology. Pag 41-61.
- FENNEMA O., KAREL, M., LUND, D.1981.Principles of Food Science. Vol II. Physical of Food Preservation. Marcel Dekker, inc. N.Y. 474p.
- IBARZ, A.; BARBOSA – CANOVAS, G. 1999. Operaciones unitarias en la Ingeniería de Alimentos. Technomic Publihing Company, INC. Pennsylvania, USA. 880p.

- JIMENEZ G. Y KASAHARA I., 1991. Propiedades Termofísicas de la Pulpa de Merluza en Función del Contenido de Humedad. Alimentos 16, Nº 3: 15 - 22.
- LIDE, D. 1998. Handbook of Chemistry and Physics. CRC PRESS LLC. Capitulo 6, Pag. 4.
- LONCIN, M. 1991. Génie Industriel Alimentaire. Aspects Fondamentaux. Masson. Pag 50 - 51, 276 – 277
- LOZANO, J.; URBICAIN, M.; ROTSTEIN, E., 1979. Thermal conductivity of apples As a function of moisture content. J. Food Sci. 44: 198-199.
- Mc ADAMS, W., 1964. Transmisión de calor. Mc Graw-Hill Book Company, INC. 557p.
- Mc CABE, W.; SMITH, R.; HARRIOT, P. 1991. Operaciones básicas de Ingeniería Química. Mc Graw-Hill, Inc. Madrid. España. 1112p.
- MILES, C.; VAN BEEK, G.; VEERKAMP C. 1983. Calculation of thermophysical properties of foods. In: JOWITT, R.; ESCHER, F.; HALLSTRON, B.; MEFFERT, H.; SPIESS, W.; VOS, G. 1983. Physical properties of foods. Applied Science Publishing. New York. USA. **Pag 284**
- MOHSENIN, N., 1980. Thermal Properties of Food and Agricultural materials. Gordon and Breach Science publishers, INC. N.Y. USA. 407 p.
- NESVADBA, P., 1982. Methods for the Measurements of Thermal Conductivity and Diffusivity of Foodstuffs. J. Food Eng. 1: 93 -113.

- PELEG, M., 1983. Physical Properties of Food. AVI Publishing Company, INC. Westport, Connecticut. Pag 13 –16
- POULSEN, P., K., 1982. Thermal Diffusivity of Foods Measured by Simple Equipment. J. Food Eng. 1: 115 -122.
- POTTER, N. y HOTCHKISS, J., 1995. Food Science, 5<sup>Th</sup> edition. International Thomson Publishing. N.Y. pag 146.
- SAKIYAMA, T.; AKATSU, M.; MIYAWAKI, O.;YANO, t., 1999. Effective Thermal Diffusivity of Foods Gels, Impregnated with Air Bubbles., J. Food Sci. 48: 677-680
- SEPULVEDA, C., 1994. Evaluación del comportamiento Físico – químico del fruto de Murtilla (*Ugni molinae* Turcz) sometido a distintas temperaturas de congelación y tiempos de almacenaje. U. de Concepción. Chillan, Chile. 104 p.
- SHARMA, S.; MULVANEY, S.; RIZVI, S., 2000. Food Process Engineering. Theory and Laboratory Experiments. a John Wiley and Sons, INC., Publication. Canada. 342p.
- SCHMIDT-HEBBEL, H.; PENNACCHIOTTI, I., 1985. Tabla de Composición Química de Alimentos Chilenos. Facultad de Ciencias químicas y Farmaceuticas. U. de Chile. Santiago. 60 p.
- SINGH, P.; HELDMAN, D., 1998. Introducción a la Ingeniería de los Alimentos. Editorial Acribia, S.A. Zaragoza. España. 544p.

- TSCHUBIK, I. A., MASLOW, A.M., 1973. Warmephysikalische Konstanten von Lebensmitteln und Halbfabrikaten. VEB Fachbuchverlag Leipzig.176p.
- URBICAIN, M.; LOZANO, J., 1997. Thermal and Reological Properties of Foodstuffs. In: VALENTAS, R.; ROTSTEIN, E.; SINGH, P., 1997. Handbook of Food Engineering Practice. Boca Raton. New York. USA. 720p.
- WATSON, E., HARPER, J. 1987. Elements of Food Engineering. Publishers by van Nostrand Reinhold company. N.Y. 308p.
- ZIEGLER, G.; RIZVI, S., 1985. Thermal Conductivity of Liquid Foods by the Thermal Comparator Method. J. Food Sc. 50: 1458 -1461.

## **ANEXOS**

## ANEXO 1

### Calibración del refractómetro digital

Previo a la lectura, en el refractómetro, de la pasta de murta se verificó la calibración del refractómetro digital; para esto se prepararon soluciones patrón de Sacarosa a distintas concentraciones.

Posteriormente se leyó la concentración de Sacarosa en el refractómetro digital y los resultados se muestran a continuación. Las soluciones de Sacarosa se midieron a  $20 \pm 1$  °C.

Solución patrón de Sacarosa (%)	Lectura con el Refractómetro			
	R <sub>1</sub>	R <sub>2</sub>	R <sub>3</sub>	Promedio
2	2,1	2,0	2,0	2,0
4	4,1	4,0	3,9	4,0
6	6,0	6,0	6,0	6,0
8	8,1	8,0	8,0	8,0

**R = Repeticiones**

## ANEXO 2

### Contenido de humedad en pasta de murta en tres repeticiones

TRATAMIENTO	Repetición	HUMEDAD (%)	Promedio
1 (60 °C)	1	83,8	83,5 %
	2	83,2	
	3	83,5	
2 (65 °C)	1	82,1	82,7 %
	2	83,1	
	3	82,9	
3 (70 °C)	1	82,9	83,1 %
	2	83,7	
	3	82,8	
4 (75 °C)	1	82,8	82,3 %
	2	81,3	
	3	82,9	
5 (80 °C)	1	81,5	81,8 %
	2	81,8	
	3	82,1	
6 (85 °C)	1	81,0	81,4 %
	2	81,7	
	3	81,4	
7 (90 °C)	1	81,3	81,1 %
	2	80,8	
	3	81,1	

**ANEXO 3****Densidad de pasta de murta en tres repeticiones**

TRATAMIENTO	Repetición	DENSIDAD (g/cc)	Promedio (g/cc)
1 (60 °C)	1	1,063	1,063
	2	1,060	
	3	1,068	
2 (65 °C)	1	1,058	1,062
	2	1,067	
	3	1,061	
3 (70 °C)	1	1,063	1,060
	2	1,061	
	3	1,058	
4 (75 °C)	1	1,062	1,063
	2	1,065	
	3	1,061	
5 (80 °C)	1	1,067	1,066
	2	1,066	
	3	1,064	
6 (85 °C)	1	1,064	1,063
	2	1,061	
	3	1,065	
7 (90 °C)	1	1,066	1,067
	2	1,067	
	3	1,069	

**ANEXO 4****Contenido de Sólidos solubles medidos como °BRIX en pasta de murta**

TRATAMIENTO	Repetición	°BRIX	Promedio
1 (60 °C)	1	14,6	14,6
	2	14,6	
	3	14,6	
2 (65 °C)	1	14,9	14,9
	2	14,9	
	3	15,0	
3 (70 °C)	1	14,8	14,9
	2	14,9	
	3	14,9	
4 (75 °C)	1	15,1	15,2
	2	15,2	
	3	15,2	
5 (80 °C)	1	15,4	15,4
	2	15,4	
	3	15,4	
6 (85 °C)	1	15,6	15,5
	2	15,5	
	3	15,5	
7 (90 °C)	1	15,7	15,8
	2	15,8	
	3	15,8	

### ANEXO 5

#### Valores de difusividad térmica para las soluciones de sacarosa

Tratamiento		Repetición	Difusividad Térmica (m <sup>2</sup> /s)	Difusividad Promedio (m <sup>2</sup> /s)
Concentración	Temperatura			
60 °Brix	50 °C	1	2,05 x 10 <sup>-7</sup>	2,03 x 10 <sup>-7</sup>
		2	2,05 x 10 <sup>-7</sup>	
		3	2,00 x 10 <sup>-7</sup>	
		4	2,10 x 10 <sup>-7</sup>	
	60 °C	1	2,18 x 10 <sup>-7</sup>	2,18 x 10 <sup>-7</sup>
		2	2,27 x 10 <sup>-7</sup>	
		3	2,14 x 10 <sup>-7</sup>	
		4	2,14 x 10 <sup>-7</sup>	
	70 °C	1	2,48 x 10 <sup>-7</sup>	2,56 x 10 <sup>-7</sup>
		2	2,65 x 10 <sup>-7</sup>	
		3	2,79 x 10 <sup>-7</sup>	
		4	2,31 x 10 <sup>-7</sup>	
70 °Brix	50 °C	1	1,96 x 10 <sup>-7</sup>	1,83 x 10 <sup>-7</sup>
		2	1,92 x 10 <sup>-7</sup>	
		3	1,70 x 10 <sup>-7</sup>	
		4	1,74 x 10 <sup>-7</sup>	
	60 °C	1	2,27 x 10 <sup>-7</sup>	2,12 x 10 <sup>-7</sup>
		2	2,31 x 10 <sup>-7</sup>	
		3	2,05 x 10 <sup>-7</sup>	
		4	1,83 x 10 <sup>-7</sup>	
	70 °C	1	2,27 x 10 <sup>-7</sup>	2,16 x 10 <sup>-7</sup>
		2	2,10 x 10 <sup>-7</sup>	
		3	2,18 x 10 <sup>-7</sup>	
		4	2,10 x 10 <sup>-7</sup>	

## ANEXO 6

### Análisis de varianza para Humedad

Fuente de variación	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrado medio	Calculo de F	Valor P
Entre fechas	15,1248	6	2,5208	10,8	0,0001
Dentro de las fechas	3,26853	14	0,23347		

Valor de  $P < 0,05$  existe diferencia estadísticamente significativa con un nivel de confianza de 95 %

## ANEXO 7

### Análisis de varianza para Densidad

Fuente de variación	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrado medio	Calculo de F	Valor P
Entre fechas	87,3867	6	14,5644	1,96	0,1458
Dentro de las fechas	105,68	14	7,5486		

Valor de  $P < 0,05$  existe diferencia estadísticamente significativa con un nivel de confianza de 95 %

## ANEXO 8

### Análisis de varianza para sólidos solubles

Fuente de variación	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrado medio	Calculo de F	Valor P
Entre fechas	87,387	6	14,564	1,93	0,146
Dentro de las fechas	105,68	14	7,5486		

Valor de  $P < 0,05$  existe diferencia estadísticamente significativa con un nivel de confianza de 95 %

## ANEXO 9

### Análisis de varianza para las experiencias en soluciones de sacarosa

Fuente de variación	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrado medio	Calculo de F	Valor P
Entre Tratamientos	1,1248	5	0,22496	11,12	0,0001
Dentro de Los tratamientos	0,3641	18	0,02023		

Valor de  $P < 0,05$  existe diferencia estadísticamente significativa con un nivel de confianza de 95 %

### ANEXO 10

#### Análisis de varianza para todos los tratamientos térmicos en pasta de murta

Fuente de variación	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrado medio	Calculo de F	Valor P
Entre fechas	0,38233	6	0,06372	18,31	0,00
Dentro de las fechas	0,16706	48	0,00348		

Valor de  $P < 0,05$  existe diferencia estadísticamente significativa con un nivel de confianza de 95 %

### ANEXO 11

#### Prueba rango Múltiple Tukey HSD para valores de difusividad térmica en pasta de murta

Método: 95 % Tukey HSD			Grupos homogéneos
Tratamiento, $T_m$ (°C)	repeticiones	Difusividad térmica Promedio, $m^2/s$	
60	7	$1,15 \times 10^{-7}$	X
65	7	$1,15 \times 10^{-7}$	X
70	6	$1,23 \times 10^{-7}$	X
75	8	$1,26 \times 10^{-7}$	X
80	8	$1,34 \times 10^{-7}$	X
85	9	$1,35 \times 10^{-7}$	X
90	9	$1,35 \times 10^{-7}$	X

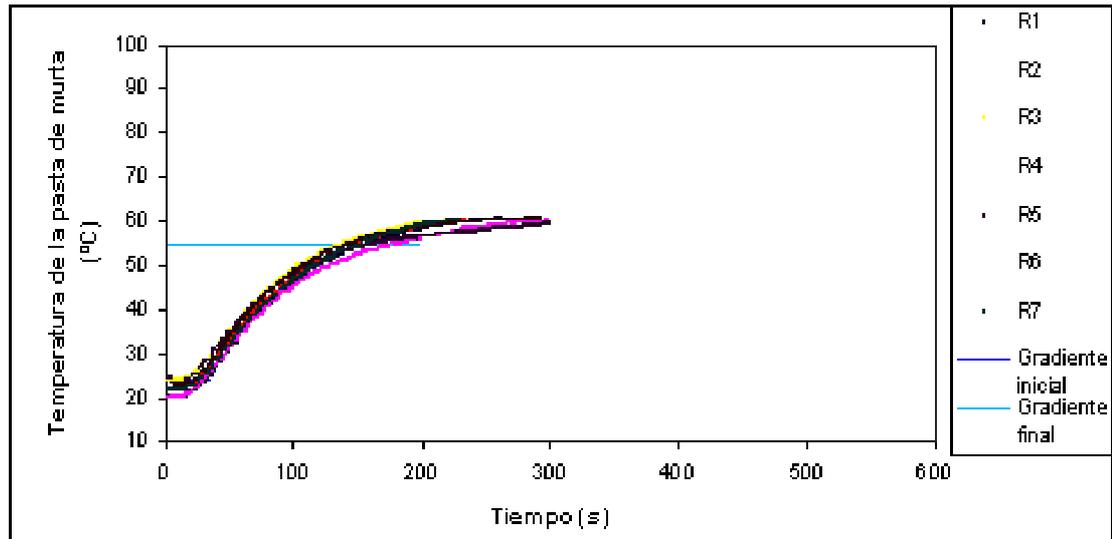
## ANEXO 12

**Valores de difusividad térmica para todas las repeticiones en pasta de murta**

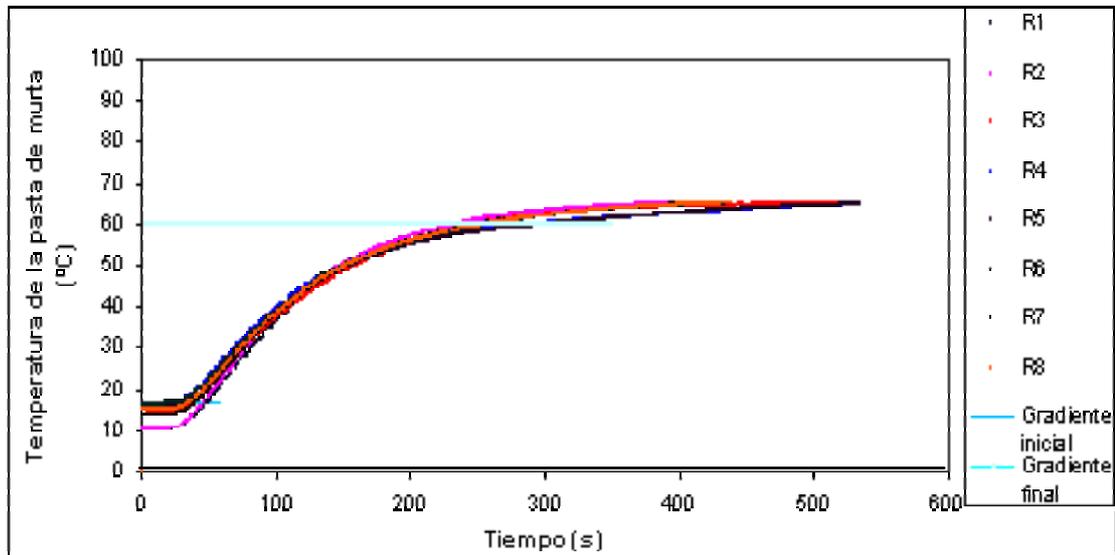
Repetición	DIFUSIVIDAD TÉRMICA x 10 <sup>-7</sup> (m <sup>2</sup> /s)						
	Tratamiento ( °C )						
	60	65	70	75	80	85	90
1	1,13	1,18	1,10	1,22	1,40	1,31	1,31
2	1,10	1,22	1,18	1,31	1,31	1,31	1,26
3	1,13	1,10	1,26	1,18	1,36	1,40	1,40
4	1,18	1,13	1,31	1,22	1,31	1,36	1,40
5	1,26	1,04	1,22	1,22	1,22	1,40	1,35
6	1,13	1,13	1,31	1,35	1,35	1,31	1,40
7	1,13	<u>1,35</u>	<u>1,61</u>	1,22	1,40	1,26	1,31
8	<u>1,35</u>	1,14	<u>1,70</u>	<u>1,04</u>	1,40	1,40	1,32
9	<u>1,31</u>	1,12	<u>1,74</u>	1,35	<u>1,52</u>	1,42	<u>1,22</u>
10	<u>1,48</u>	<u>1,44</u>	<u>1,78</u>	<u>1,00</u>	<u>1,61</u>	<u>1,48</u>	1,40

## ANEXO 13

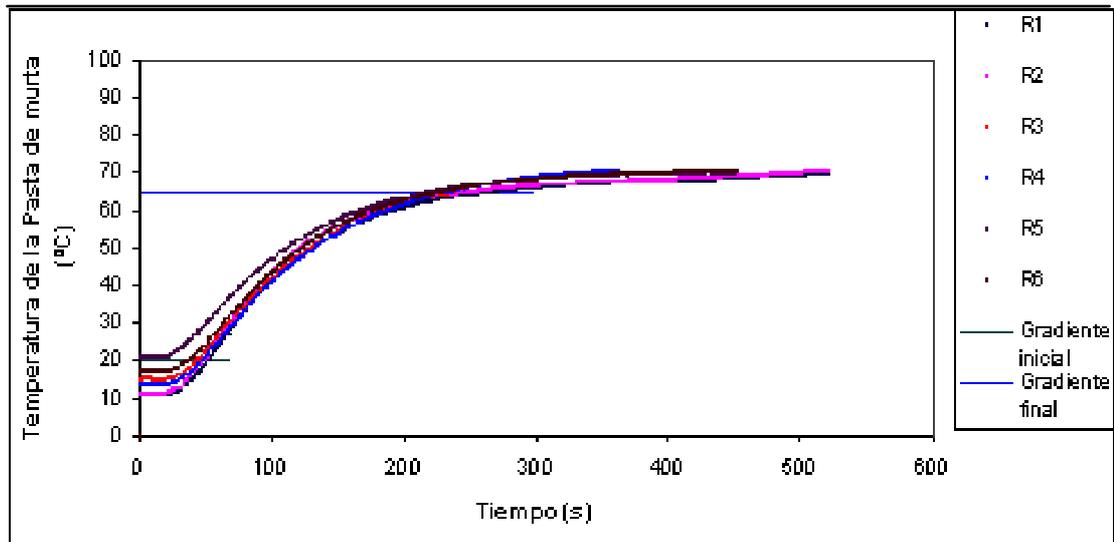
Perfiles térmicos iniciales para todos los tratamientos y repeticiones, con la demarcación de los gradientes inicial y final utilizados



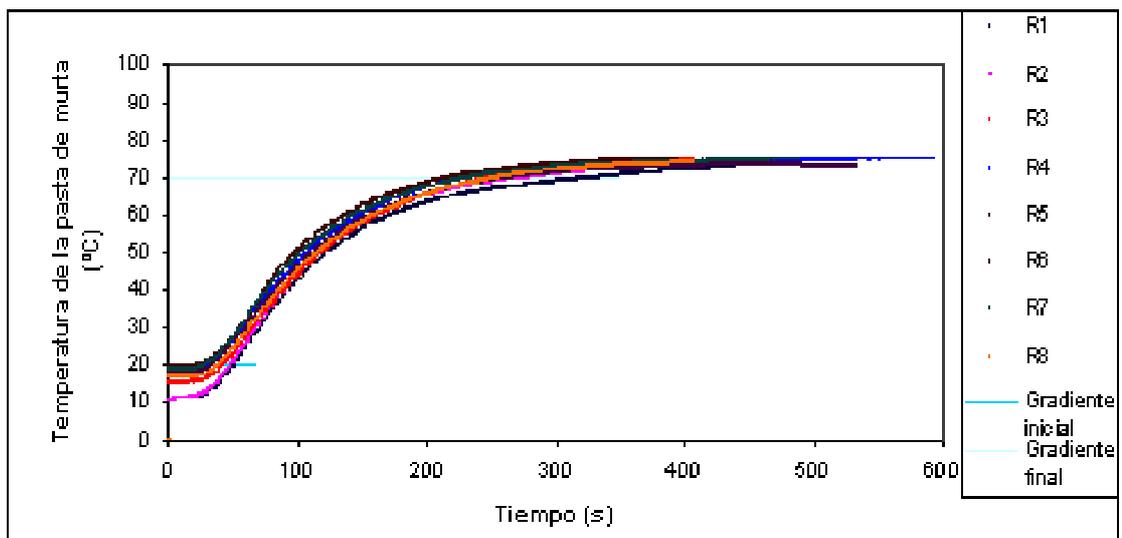
A-13.1 Perfil térmico registrado en el tratamiento a 60 °C



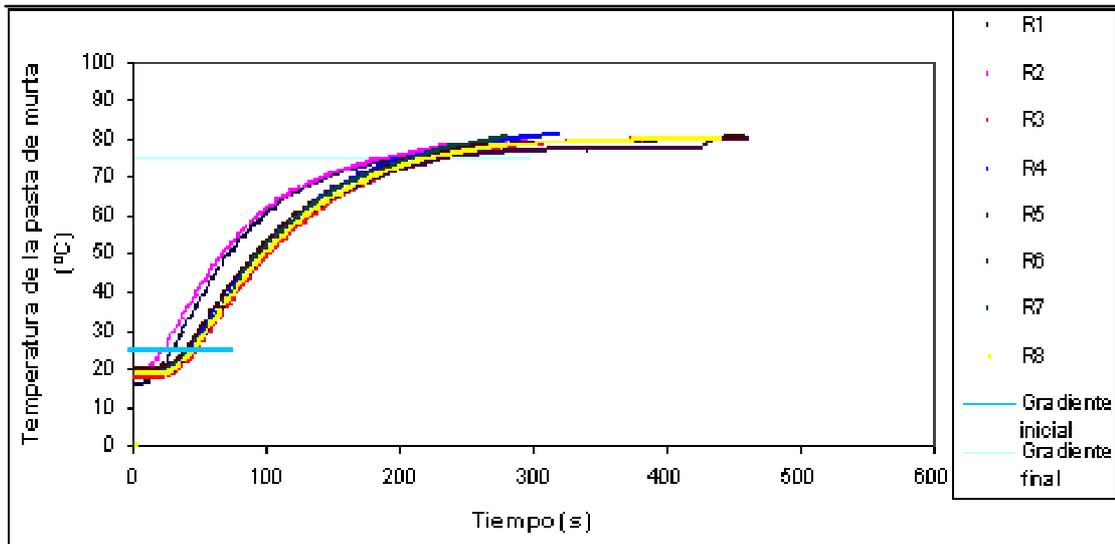
A-13.2 Perfil térmico registrado en el tratamiento a 65 °C



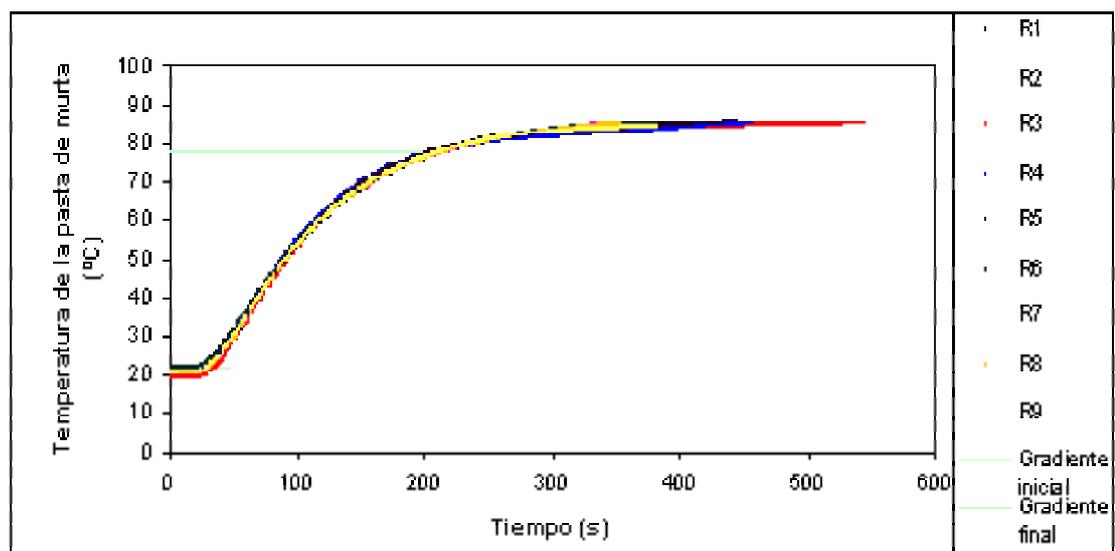
**A-13.3 Perfil térmico registrado en el tratamiento a 70 °C**



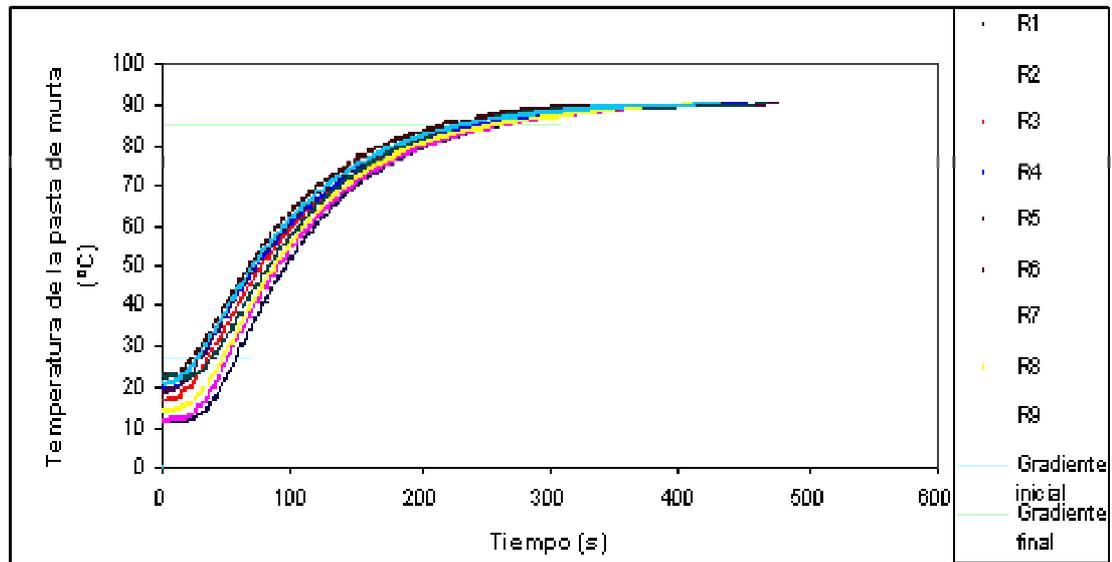
**A-13.4 Perfil térmico registrado en el tratamiento a 75 °C**



**A-13.5 Perfil térmico registrado en el tratamiento a 80 °C**



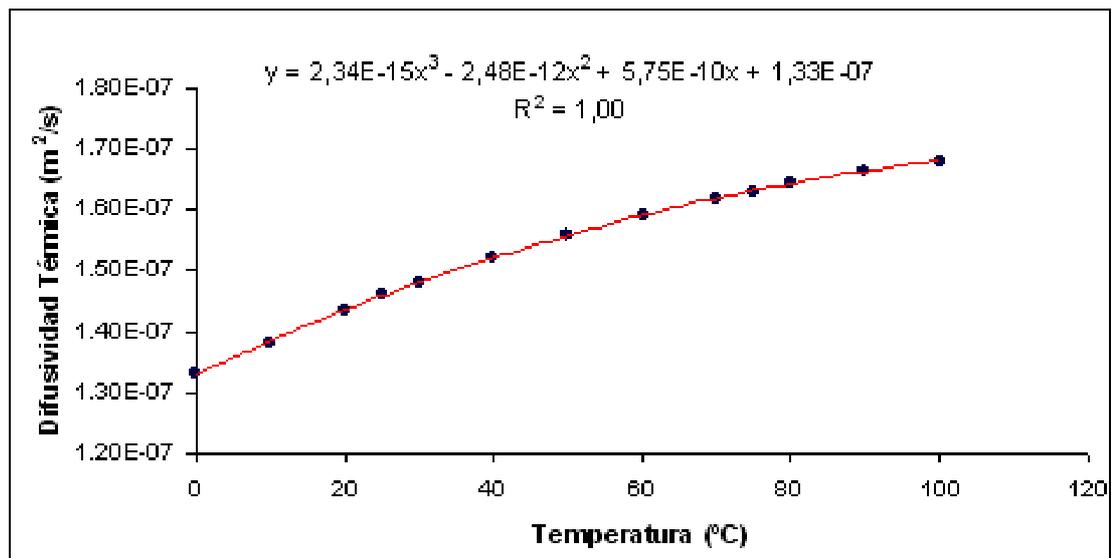
**A-13.6 Perfil térmico registrado en el tratamiento a 85 °C**



**A-13.6 Perfil térmico registrado en el tratamiento a 90 °C**

## ANEXO 14

### Curva de relación Difusividad térmica en función de la temperatura para Agua



## ANEXO 15

### Propiedades termofísicas del Agua

Temperatura ( °C )	Conductividad ( W / m K )	Densidad ( g / ml )	Calor Específico ( J / g K )
0	0,5610	0,99984	4,2176
10	0,580	0,99970	4,1921
20	0,5984	0,99821	4,1818
30	0,6154	0,99565	4,1784
40	0,6305	0,99222	4,1705
50	0,6435	0,98803	4,1806
60	0,6543	0,98320	4,1843
70	0,6631	0,97778	4,1895
80	0,6700	0,97182	4,1963
90	0,6753	0,96535	4,2050
100	0,6791	0,95840	4,2159

**FUENTE: LIDE, 1998.**