

UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA DE LA SELVA
FACULTAD DE INGENIERIA EN INDUSTRIAS ALIMENTARIAS
DEPARTAMENTO ACADÉMICO DE CIENCIA, TECNOLOGÍA E INGENIERÍA DE
ALIMENTOS



“DETERMINACIÓN DE LA DIFUSIVIDAD TÉRMICA EN PULPA
DE NONI (*Morinda citrifolia*, L), EN FUNCIÓN DE LA
TEMPERATURA”
TESIS

Para optar el título de:

INGENIERO EN INDUSTRIAS ALIMENTARIAS

Presentado por:

ELAINE MANELY GARCÍA VILLEGAS

PROMOCIÓN 2008 – I

Tingo María – Perú

2009

Q02

G25

García Villegas, Elaine M.

Determinación de la Difusividad Térmica en Pulpa de Noni (*Morinda citrifolia*, L), en Función de la Temperatura. Tingo María, 2008

89 h.; 18 cuadros; 17 fgrs.; 42 ref.; 30 cm.

Tesis (Ingeniero en Industrias Alimentarias) Universidad Nacional Agraria de la Selva, Tingo María (Perú). Facultad de Ingeniería en Industrias Alimentarias.

MORINDA CITRIFOLIA / DIFUSIVIDAD TÉRMICA / PULPA – NONI
/ TEMPERATURA / TRANSFERENCIA – CALOR / TINGO MARÍA /
RUPA RUPA / LEONCIO PRADO / HUÁNUCO / PERÚ.



UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA DE LA SELVA
Tingo María
FACULTAD DE INGENIERIA EN INDUSTRIAS ALIMENTARIAS
Av. Universitaria s/n. Teléfono (062) 561385 – Fax (062) 561156
Apart. Postal 156 Tingo María E.mail; fia@unas.edu.pe

ACTA DE SUSTENTACIÓN DE TESIS

Los Miembros del Jurado que suscriben, reunidos en acto público el 11 de Agosto de 2009, a horas 5:00 p.m. en la Sala de Audiovisuales de la Facultad de ingeniería en Industrias Alimentarias de la Universidad Nacional Agraria de la Selva, ubicada en la ciudad de Tingo María, Provincia de Leoncio Prado, Departamento de Huánuco, para calificar la tesis presentado por la Bach. **GARCÍA VILLEGAS, Elaine Manely**. titulado:

**“DETERMINACIÓN DE LA DIFUSIVIDAD TÉRMICA EN PULPA DE NONI
(*Morinda citrifolia*, L) EN FUNCION DE LA TEMPERATURA”**

Después de haber escuchado la sustentación, las respuestas a las preguntas formuladas, lo declaran aprobado con el calificativo de BUENO, en consecuencia el Bachiller, queda apto para recibir el título de **Ingeniero en Industrias Alimentarias** del Consejo Universitario, de conformidad con el Art. 22° de la Ley Universitaria 23733; los artículos 51° y 52° del Estatuto Actualizado de la Universidad Nacional Agraria de la Selva.

Tingo María, 11 de Agosto de 2009

.....
Ing. Alfredo A. Carmona Ruiz
Presidente

.....
Ing. Yolanda J. Ramírez Trujillo
Miembro

.....
Ing. Jhony W. Vargas Solórzano
Miembro

.....
Ing. Williams V. Roldán Carbajal
Asesor

DEDICATORIA

A Dios que todo lo puede; a las personas que me dieron la vida, mis padres: Julián García Céspedes y Marianela Villegas Maravi; a mis recordados y queridos abuelitos Lucas y Emilia; a mis hermanos: Karem, Christian, Melissa y al angelito que Dios mandó, con todo el amor del mundo.

AGRADECIMIENTO

Primero a Dios que me dio la fuerza para seguir adelante, a mis padres, hermanas(os), a mis abuelitos, por su amor, apoyo y paciencia, porque siempre estuvieron durante todo el transcurso de mi carrera y a lo largo de mi vida.

Al ingeniero: Williams Roldan Carbajal, por su enseñanza, amistad, orientaciones, sabios consejos y por confiarme la realización de esta investigación; por su buena disposición y colaboración con sus conocimientos y con el material bibliográfico y por su ayuda desinteresada durante el desarrollo de algunas de las técnicas empleadas en la realización de este trabajo.

A todos los docentes que aportaron en mi formación profesional y humana a lo largo de la carrera a: F. Mamani (Q.E.P.D.), M. Alcedo, Y. Ramírez; W. Paredes, R. Matos, P. Peláez, J. Castro, E. Cáceres, A. Carmona, A. Ortega, E. Ordoñez, M. Follegatti, J. Vargas, L. Zavaleta, R. Natividad, G. Daza, J. Basilio, C. Leandro Laguna, entre otros.

A los compañeros de estudio y amigos: karem, Gisela, Marielena, Marco, Manuel, Felix, Victor, Jackeline, Carolina, Helen, Angelica, Maribel, Sandra, Benjamín, entre otros, por su alegría y amistad entregadas, durante la ejecución de la tesis y a lo largo de estos años en la universidad.

Al resto de los integrantes de la Facultad de Ingeniería en Industrias Alimentarias por contribuir en este proyecto y por hacer más amenos los días de trabajo.

A los señores: Carlos, Lucas, Juan, Aurelia, Celedonio, Concepción, Glelea, Diana y Zoila, Nidia, por su gran ayuda en esos pequeños, pero importantes detalles que facilitaron el trabajo en los diversos laboratorios y planta piloto.

ÍNDICE

	Página
I. INTRODUCCIÓN.....	1
II. REVISIÓN DE LITERATURA.....	3
A. CARACTERÍSTICAS GENERALES DEL NONI.....	3
1. Consideraciones Generales.....	3
2. Descripción botánica.....	4
B. TRANSFERENCIA DE CALOR.....	5
1. Mecanismos de transferencia de calor.....	6
a. Conducción.....	6
b. Convección.....	9
c. Radiación.....	10
2. Transferencia de calor en estado no estacionario.....	12
3. Flujo de calor en estado no estacionario.....	13
C. PROPIEDADES TERMOFÍSICAS.....	20
1. Conductividad térmica.....	23
2. Difusividad térmica.....	26
3. Calor específico.....	29
III. MATERIALES Y MÉTODOS.....	32
A. LUGAR DE EJECUCIÓN.....	32
B. MATERIA PRIMA.....	32

C. EQUIPOS, MATERIALES Y REACTIVOS.....	33
1. Equipos.....	33
2. Materiales.....	34
3. Reactivos.....	35
D. MÉTODOS DE ANÁLISIS	35
1. Características biométricas del Noni.....	35
2. Características químico proximales del Noni.....	36
3. Características fisicoquímicas del Noni.....	36
4. Determinación de la difusividad térmica.....	37
E. METODOLOGÍA EXPERIMENTAL.....	37
1. Caracterización del fruto del Noni.....	37
a. Características biométricas del Noni.....	37
b. Características químico proximales del Noni.....	37
c. Características fisicoquímicas del Noni.....	37
2. Preparación de la muestra de pulpa de Noni.....	37
3. Validación del equipo utilizado para hallar la difusividad térmica.....	40
4. Determinación de la difusividad térmica.....	40
IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	45
A. DE LA CARACTERIZACIÓN DEL FRUTO DEL NONI.....	45
1. De las características biométricas del Noni.....	45
2. De la evaluación químico proximal del Noni.....	46
3. De las características fisicoquímicas del Noni.....	47
B. PREPARACIÓN DE LA MUESTRA DE PULPA DE NONI	48

1. Humedad de la pulpa de Noni en las diferentes muestras	51
2. Densidad de la pulpa de Noni en las diferentes muestras.....	53
3. Sólidos solubles de la pulpa de Noni en las diferentes muestras.....	55
C. VALIDACIÓN DEL EQUIPO UTILIZADO PARA HALLAR LA DIFUSIVIDAD TÉRMICA.....	56
D. DIFUSIVIDAD TÉRMICA DE LA PULPA DE NONI EN LOS DIFERENTES TRATAMIENTOS.....	62
a. Difusividad térmica en el tratamiento a 50°C.....	62
b. Difusividad térmica en el tratamiento a 55 °C.....	63
c. Difusividad térmica en el tratamiento a 60 °C.....	64
d. Difusividad térmica en el tratamiento a 65 °C.....	65
e. Difusividad térmica en el tratamiento a 70 °C.....	66
f. Difusividad térmica en el tratamiento a 75 °C.....	67
g. Difusividad térmica en el tratamiento a 80 °C.	68
E. COMPORTAMIENTO DE LA DIFUSIVIDAD TÉRMICA EN LA PULPA DE NONI EN LOS DIFERENTES TRATAMIENTOS.....	76
F. DE LA ECUACION DE DIFUSIVIDAD TÉRMICA DE LA PULPA DE NONI.....	78
V. CONCLUSIONES.....	83
VI. RECOMENDACIONES.....	84
VII. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	85

ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro		Página
1.	Composición química y valor nutricional de la pulpa de Noni.....	4
2.	Valores de las variables β_n y $J_1(\beta_n)$	18
3.	Difusividad térmica de algunos frutos y vegetales.....	28
4.	Calores Específicos de algunos zumos de Frutas.....	30
5.	Medidas biométricas de diez frutos de Noni.....	45
6.	Análisis proximal de la pulpa de Noni.....	46
7.	Composición fisicoquímica de la pulpa de Noni.....	48
8.	Balance de materia en la obtención de la pulpa de Noni.....	50
9.	Humedad promedio de las muestras en los tratamientos.....	51
10.	Densidad promedio de las muestras en los tratamientos.....	54
11.	Sólidos Solubles promedio de las muestras en los tratamientos..	55
12.	Difusividad térmica promedio en soluciones de sacarosa.....	57
13.	Propiedades termo físicas para soluciones de sacarosa.....	58
14.	Comparación de valores de medición experimentales y de literatura para difusividad térmica en soluciones de sacarosa a 60 °BRIX.....	60
15.	Valores experimentales de difusividad térmica promedio en pulpa de Noni.....	70
16.	Comparación de los promedios de las difusividad térmica entre	

	la pasta de Murta (MUÑOZ, 2002) y la pulpa de Noni.....	73
17.	Difusividad térmica en diferentes alimentos.....	75
18.	Valores hallados en la simulación de la difusividad térmica de la pulpa de Noni.....	81

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura		Página
1.	Diagrama de flujo para el acondicionamiento de pulpa de Noni.....	39
2.	Diseño del equipo utilizado para la obtención del perfil térmico....	41
3.	Diseño experimental para determinación de la difusividad térmica de pulpa de Noni.....	42
4.	Balance de materia en la obtención de la pulpa de Noni.....	49
5.	Humedad promedio de las muestras utilizadas para cada Tratamiento.....	52
6.	Densidad promedio de las muestras utilizadas para cada Tratamiento	54
7.	Sólidos Solubles promedio de las muestras utilizadas para cada tratamiento	56
8.	Linealización de los perfiles térmicos correspondientes al tratamiento de 50 °C.....	63
9.	Linealización de los perfiles térmicos correspondientes al tratamiento de 55 °C.....	64
10.	Linealización de los perfiles térmicos correspondientes al tratamiento de 60 °C.....	65
11.	Linealización de los perfiles térmicos correspondientes al tratamiento de 65 °C.....	66

12.	Linealización de los perfiles térmicos correspondientes al tratamiento de 70 °C.....	67
13.	Linealización de los perfiles térmicos correspondientes al tratamiento de 75 °C.....	68
14.	Linealización de los perfiles térmicos correspondientes al tratamiento de 80 °C.....	69
15.	Variación de la difusividad térmica en los 7 tratamientos.....	77
16.	Variación de la difusividad térmica en función de la temperatura ...	79
17.	Comparación de difusividades térmicas con muestras experimentales y el teórico hallado.....	82

RESUMEN

El presente trabajo de investigación experimental fue realizado aplicando la metodología utilizada por Dickerson en 1965 y modificada por Poulsen en 1982 y tuvo como fin determinar la difusividad térmica de la pulpa de Noni (*Morinda citrifolia*, L), en un rango de temperatura de 50 a 80 °C y basándose en diseños presentados en bibliografía, se construyó el equipo para medir la difusividad térmica.

La humedad de la pulpa de Noni en las diferentes pruebas tuvo un valor promedio de 91,3% con desviación estándar de $\pm 0,3\%$, la densidad y sólidos solubles no presentaron diferencia estadísticamente significativa, lo que indicaría que la variación presentada es propia de productos naturales. La densidad tuvo un valor promedio de $1,001 \pm 0,03$ g/mL, sólidos solubles 8,6 °Brix con desviación estándar de $\pm 0,7$ °Brix.

La pulpa de Noni presentó valores de difusividad térmica, para 50 °C: $1,38 \pm 0,1 \times 10^{-7}$ m²/s; para 55 °C: $1,47 \pm 0,2 \times 10^{-7}$ m²/s; para 60 °C: $1,53 \pm 0,09 \times 10^{-7}$ m²/s; para 65°C: $1,59 \pm 0,2 \times 10^{-7}$ m²/s; para 70°C: $1,71 \pm 0,2 \times 10^{-7}$ m²/s; para 75°C: $1,80 \pm 0,09 \times 10^{-7}$ m²/s y para 80°C: $1,83 \pm 0,1 \times 10^{-7}$ m²/s, detectándose diferencias entre los valores de difusividad térmica.

Finalmente se encontró una relación matemática con la cual se puede predecir un valor de difusividad térmica (Y) para un rango de trabajo de temperatura (X), entre 50 a 80 °C dada en la siguiente forma:

$$Y = 1,567 * 10^{-9} X + 5,999 * 10^{-8}$$

I. INTRODUCCIÓN

La región amazónica cuenta con una variedad de frutos con gran aceptación en el consumo, debido a que contienen propiedades benéficas para la salud; entre éstos se encuentra, el Noni (*Morinda citrifolia*, L). Este fruto presenta propiedades funcionales que ayudan a combatir y prevenir múltiples enfermedades como trastornos digestivos y lesiones cardíacas, inhibe la función precancerosa y el crecimiento de tumores que aquejan al hombre.

Se conoce poco sobre los parámetros del Noni durante el proceso de su transformación así como del comportamiento que éstos presentan con relación a la difusividad térmica y la transferencia de calor. El estudio de la transferencia de calor es una operación unitaria muy importante en la industria de alimentos, está relacionado con la difusividad térmica y la conductividad térmica del alimento en los procesos a que son sometidos durante su transformación, siendo entonces necesario conocer los diferentes fenómenos que ocurren en ella así como la pérdida de sus principales nutrientes por el excesivo tratamiento térmico o la reducción de su vida útil como consecuencia de un tratamiento térmico deficiente. Por lo indicado anteriormente surgió la necesidad de diseñar un sistema con el fin de determinar experimentalmente ecuaciones que gobiernan el comportamiento de transferencia de calor, variando los diferentes parámetros.

El presente trabajo de investigación basándose en los antecedentes expuestos tiene los siguientes objetivos:

- Determinar la difusividad térmica de la pulpa de Noni a diferentes temperaturas.
- Determinación de la ecuación que gobierne la difusividad térmica de la pulpa de Noni en función de la temperatura.

II. REVISIÓN DE LITERATURA

A. CARACTERÍSTICAS GENERALES DEL NONI

1. Consideraciones generales.

La planta crece naturalmente donde el clima es húmedo a moderadamente húmedo, desde el nivel del mar hasta alturas de 500 metros sobre dicho nivel.

GONZÁLES (2003), menciona que la historia del Noni data por lo menos de 2000 años, originaria de la Polinesia, Malasia, Australia, India y el sureste de Asia; pero se ha extendido a casi todas las regiones del mundo. DIXON *et al.*, (1999), indican que el Noni (*Morinda citrifolia*, L), se ha naturalizado en América (México, Panamá; Colombia, Perú; Venezuela y a lo largo del Caribe y en las antillas menores). ELKINS (1997), menciona que el Noni (*Morinda citrifolia*, L), es una buena fuente de vitamina C.

En el cuadro 1, se indica la composición química y valor nutricional de la pulpa de Noni.

Cuadro 1. Composición química y valor nutricional de la pulpa de Noni

Componentes	100 g de pulpa
Energía	163 -197 Kj
Humedad	18 g
Proteína	0,2 - 0,5 g
Grasa total	0,1 - 0,2 g
Grasa saturada	< 0,1 g
Carbohidratos	3,8 g
Fibra	0,5 -1,0 g
Fructosa	3,0 - 4,0 g
Glucosa	3,0 - 4,0 g
Sacarosa	< 0,1
pH	3,4 - 3,6
Vitamina C	3 - 25 mg
Calcio	20 - 25 mg
Hierro	0,1 - 0,3 mg
Fósforo	2,0 - 7,0 mg
Sodio	15,0 - 40,0 mg
Potasio	30,0 - 150,0 mg
Niacina	0,1 - 0,5 mg

Fuente : ELKINS, (1997).

2. Descripción botánica.

PARRA (2006), señala que la planta de Noni es un arbusto verde de hasta 6 m de altura, con la corteza pálida lisa. Hojas opuestas, de estrecha a anchamente elípticas, de color verde brillante, con estípulas grandes, flores aromáticas; tiene el cáliz truncado y la corola tubular,

de color blanco. Fruto en masa casi esférica, verdosa, de 2,5 - 3,5 cm. de diámetro, con la superficie cubierta de pequeñas protuberancias

El Noni tiene la siguiente clasificación botánica:

Reino : Vegetal.
Clase : Angiospermae.
Subclase : Dicotiledoneae
Orden : Tubiflorae
Familia : Rubiaceae
Género : Morinda
Especie : *citrifolia*

B. TRANSFERENCIA DE CALOR

Es la ciencia que trata de la determinación de las velocidades de esa transferencia de energía en forma de calor entre distintos cuerpos, o entre diferentes partes de un mismo cuerpo que están en distinto nivel energético, se detiene cuando los dos medios alcanzan la misma temperatura (ARCOS, 2007).

Según INCROPERA *et al.*, (1999), la transferencia de calor es la energía en tránsito debido a una diferencia de temperaturas. 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.*, 1981).

1. Mecanismos de transferencia de calor

La transferencia de calor puede verificarse por los tres mecanismos: conducción, convección y radiación (Heldman y Lund, 1992, citado por GALLARDO, 2004).

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, citado por MUÑOZ, 2002).

a. Conducción.

La conducción de calor se realiza en el interior de un cuerpo sólido o desde un cuerpo a otro por intercambio de energía cinética entre moléculas (Heldman y Lund, 1992, citado por GALLARDO, 2004).

MORAN (2004), menciona que la transferencia de energía por conducción aparece en gases, líquidos y sólidos. Podemos pensar en la conducción como la transferencia de energía desde las partículas más energéticas de una sustancia a las partículas

adyacentes menos energéticas por las interacciones entre las partículas.

La conducción de calor en gases y líquidos es una consecuencia de la agitación molecular y de la equipartición de la energía en el choque (tendencia a la igualación de la energía cinética en choques sucesivos). El fenómeno de igualación de la energía cinética media, y en consecuencia de la temperatura es muy lento, en los gases y líquidos el fenómeno de transmisión de calor se realiza en general por corrientes de convección.

La conducción de calor en sólidos obedece a causas análogas, siendo los distribuidores de la energía los electrones constituyentes de los átomos, que en agitación térmica, se comportan como un gas electrónico. Los metales (cuyos átomos retienen débilmente a sus electrones) conducen el calor más rápidamente que los no metales (BURBANO *et. al.*, 2003).

Un ejemplo de conducción se da, si se inserta una varilla de cobre a la flama, la temperatura de la parte de metal que está en la mano aumenta rápidamente, se puede entender por conducción al proceso por el cual el calor de la flama se transfiere a lo largo de la varilla de cobre hasta la mano,

examinando lo que sucede a los átomos del metal. Inicialmente antes de someter a la flama, los átomos están vibrando en torno a sus posiciones de equilibrio. A medida que la flama calienta la varilla, los átomos de cobre próximos a la flama comienzan a vibrar más rápidamente, estos átomos que vibran alocadamente chocan con sus vecinos y transfieren parte de su energía en las colisiones, poco a poco la varilla se calienta hasta llegar al extremo sostenido por la mano, la conducción de calor depende aparte de las colisiones atómicas, de las propiedades de la sustancia que se calienta (RAYMOND *et. al.*,2001) .

MORAN (2004), manifiesta que la velocidad de transferencia de energía por conducción se calcula macroscópicamente por la ley de Fourier:

$$\frac{\Delta Q}{\Delta t} = Q_x = -\lambda A \frac{dT}{dx} \dots\dots\dots (1)$$

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 $-dT/dx$, que representa la relación del incremento de temperatura y la longitud en la dirección del flujo, y a la conductividad térmica λ

(W/m K), que es una propiedad física del material.

El signo menos es consecuencia de que la energía fluye en la dirección de las temperaturas decrecientes.

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 citado por MUÑOZ (2002).

b. Convección

La convección es transferencia de calor como resultado de una transferencia de masa, que puede ser natural o forzada (WILSON y BUFFA, 2003). Al existir una diferencia de temperatura en el interior de un líquido o un gas, es casi seguro que se producirá un movimiento fluido, este transfiere calor de una parte del fluido a otra.

Es convección natural, cuando se calienta un líquido o un gas, su densidad (m/v) suele disminuir. Si el líquido o el gas se encuentran en el campo gravitatorio, el fluido más caliente y menos denso asciende, mientras que el fluido más frío y más denso desciende, este movimiento, es debido exclusivamente a la no uniformidad de la temperatura del fluido.

La convección forzada se logra sometiendo el fluido a un gradiente de presiones, con lo que se fuerza su movimiento de acuerdo a las leyes de la mecánica de fluidos (DIAZ, 2006).

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.*, 2000) debido al movimiento de masa causado por diferencia de densidad.

c. Radiación

Todo cuerpo a una temperatura absoluta finita emite radiación electromagnética. Esta radiación, cuando está en el rango de longitud de onda comprendido entre los 0,2 y los 100 μm se denomina térmica. Cualitativamente puede explicarse su origen a variaciones en los estados electrónico, vibracional y rotacional de átomos y moléculas. Conforman solo una pequeña parte de todo el espectro de radiación e incluye parte de la radiación ultravioleta, la radiación visible (0,35 a 0,78 μm) y parte del infrarrojo (BETANCOURT, 2003). 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 (Mc CABE *et al.*, 1991).

ALLEN y MOSCA, (2006), manifiestan que todos los cuerpos emiten y absorben radiación electromagnética. Cuando un cuerpo está en equilibrio térmico con su medio, emite y absorbe energía al mismo ritmo. La energía térmica irradiada por un cuerpo por unidad de tiempo es proporcional al área del cuerpo y a la cuarta potencia de su temperatura absoluta. Este resultado, obtenido empíricamente por Josef Stefan en 1879 y deducido teóricamente por Ludwig Boltzmann unos cinco años después, se denomina ley de Stefan –Boltzmann y se expresa en la forma:

$$P_t = e\sigma AT^4 \dots\dots\dots (2)$$

P_t : Potencia radiada en vatios.

A : Área (m²)

e: Emisividad del cuerpo.

σ : Constante universal Stefan –Boltzmann cuyo valor es
5,6703x 10⁻⁸ W/m².K⁴.

T: Temperatura absoluta .

En la transmisión de calor por radiación tiene mucha importancia el nivel de temperatura y nula importancia el gradiente de la misma. En la radiación, la transmisión de energía se efectúa mediante ondas electromagnéticas. Estas se transmiten mejor en el vacío que en un medio material, lo que diferencia claramente a la radiación de los otros dos mecanismos de transmisión de calor.

Cuando la radiación electromagnética llega a una superficie de un cuerpo material, esta radiación puede ser:

- **Absorbida**, calentándose el cuerpo o provocando reacciones fotoquímicas (función clorofílica como almacenamiento de energía solar)
- **Reflejada**, devolviéndose al medio ambiente en la misma forma
- **Transmitida**, atravesando el cuerpo sin alterarse.

Sólo la fracción absorbida se transforma en energía interna, bien aumentando la temperatura o bien provocando reacciones fotoquímicas (ESPULGAS y CHAMARRO, 2005).

2. Transferencia de calor en estado no estacionario.

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 (Mc Adams, 1964; Ibarz *et al.*, 1999 citado por MUÑOZ, 2002).

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.

3. Flujo de calor en estado no estacionario

Antes de que un producto tratado térmicamente alcance condiciones de equilibrio, debe transcurrir un intervalo de tiempo en que la temperatura cambia con la posición y el tiempo, en un proceso conocido como transferencia de calor transiente. Este proceso adquiere especial importancia por la cantidad de procesos asociados al calentamiento y enfriamiento en la industria alimentaria.

La transferencia de calor en estado transiente es de vital importancia en el proceso de desactivación enzimática, así como en la degradación de factores de calidad, asociados al efecto de la temperatura sobre los componentes biológicos involucrados, durante el período de calentamiento así como durante el enfriamiento (Stumbo, 1965; Luna *et al.*, 1986; Garrote *et al.*, 1987; Halpin y Lee, 1987 citado por GALLARDO, 2004).

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 citado por MUÑOZ, 2002). 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 (Jiménez y Kasahara, 1991 citado por MUÑOZ, 2002).

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:

$$\frac{\Delta T}{\Delta t} = \frac{\lambda}{\rho C_p} \left[\frac{\Delta}{\Delta x} \left(\frac{\Delta T}{\Delta x} \right) + \frac{\Delta}{\Delta y} \left(\frac{\Delta T}{\Delta y} \right) + \frac{\Delta}{\Delta z} \left(\frac{\Delta T}{\Delta z} \right) \right] + q \dots \dots \dots (3)$$

Donde:

λ : Coeficiente de la conductividad térmica (W/m.K).

ρ : Densidad (g/cm³).

C_p : Calor específico (J/Kg.K).

q : Densidad de flujo de calor (W/m²).

T : Temperatura (°C).

t : Tiempo (s).

x, y, z : Posiciones.

La ecuación puede ser simplificada suponiendo que la conductividad térmica λ es independiente de la temperatura. Para la transferencia de calor en una sola dirección, la ecuación (3) se reduce a:

$$\frac{\Delta^2 T}{\Delta X^2} = \frac{B}{\lambda} + \frac{1}{\alpha} \frac{\Delta T}{\Delta t} \dots \dots \dots (4)$$

Donde:

B : Calor generado por las fuentes internas.

λ : Coeficiente de la conductividad térmica (W/mK).

α : Difusividad térmica (m²/s).

T: Temperatura (°C).

t : Tiempo (s).

x : Dirección del flujo de calor.

La solución de esta ecuación 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. 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 (Drusas y Saravacos, 1985, citado por MUÑOZ, 2002):

$$T = f \log j \left[\frac{T_m - T_0}{T_m - T} \right] \dots\dots\dots (5)$$

Donde:

T_m : Temperatura del medio externo.

T_0 : Temperatura inicial en el centro.

T : Temperatura del centro en el tiempo t .

j : Funciones Bessel.

La ecuación antes descrita está referida a la función de primera clase de Bessel (Nuñez, *et al.* 2005 citado por COARICONA, 2008).

$$Y = 2 \sum_{n=1}^{\infty} \frac{J_0(\beta n \xi)}{\beta n \cdot J_1(\beta n)} \exp(-\beta_n^2 X_{F0}) \dots\dots\dots (6)$$

Donde:

$$Y = \frac{T - T_a}{T_0 - T_a} : \text{Temperatura adimensional.}$$

$$\xi = \frac{r}{R} : \text{Radio adimensional.}$$

$$X_{F0} = \frac{t}{R^2 / \alpha} : \text{Tiempo adimensional.}$$

J_0, J_1 : Funciones Bessel de orden indicado por el subíndice.

β_n : Raíces de la ecuación.

α : Difusividad térmica (m^2/s).

T: Temperatura ($^{\circ}C$).

t: Tiempo (s).

r: Dimensión radial (m).

R: Radio del cilindro (m).

Donde para un cilindro infinito, 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 2. Valores de las variables β_n y $J_1(\beta_n)$

Valores de β_n	para $J_0(\beta_n)=0$	$J_1(\beta_n)$
β_1	2,4048	0,5191
β_2	5,5201	-0,3404
β_3	8,6537	0,2715
β_4	11,7915	-0,2324
β_5	14,9309	0,2065

J_0, J_1 = Funciones Bessel de orden indicado por el subíndice; β_n = Raíces de la ecuación.

Fuente: Loncin, (1991), citado por MUÑOZ, (2002).

Entonces la resolución con los valores del Cuadro 2, para un cilindro infinito se describe con la siguiente ecuación (7):

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

Cuando F_0 (número de Fourier) es superior aproximadamente a 0,1, solamente es importante el primer término de la serie, de forma que se pueden despreciar los demás términos (Mc CABE *et al.*, 1991). Entonces reordenando de otra manera puede ser escrita como:

$$t = 0,398 \frac{r^2}{\alpha} \log \left(1,6 \frac{T_m - T_0}{T_m - T} \right) \dots \dots \dots (8)$$

Donde:

T_m : Temperatura constante del medio externo (°C).

T_0 : Temperatura inicial en el centro (°C).

T : Temperatura del centro en el tiempo t (°C).

r : Radio interno del cilindro (m).

t : Tiempo (s).

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. Escogiendo una gran

longitud con respecto al radio del cilindro (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 (MUÑOZ, 2002).

C. PROPIEDADES TERMOFÍSICAS

GALLARDO (2004), menciona que para resolver el problema de la transferencia de calor es necesario conocer las propiedades termofísicas de los alimentos que definen apropiadamente el comportamiento térmico del alimento. Dado que ellas gobiernan los cambios de temperatura en procesos que involucran la transferencia de calor, procesos tales como, calentamiento, enfriamiento, secado y congelamiento (Jiménez y Kasahara, 1991; Peleg, 1983; Singh y Heldman 1998, citado por MUÑOZ, 2002).

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 citado por MUÑOZ, 2002). Juegan un papel importante en el diseño y análisis de los procesos de alimentos y de los equipos de procesamiento (Singh y Heldman, 1993, citado por GALLARDO, 2004).

En situaciones de transferencia de calor en estado transiente, la temperatura cambia con el tiempo y también las propiedades antes mencionadas (Singh y Heldman, 1993, citado por GALLARDO, 2004).

Debe considerarse que en el estudio de la transferencia de calor en estado transiente es de interés conocer el valor de las propiedades termofísicas, y en la simulación de los fenómenos de transporte, transferencia de calor, los modelos propuestos han llegado a ser muy útiles.

Estas propiedades, tales como la conductividad térmica (λ) el calor específico, (C_p) y la difusividad térmica (α), están definidas por la relación:

$$\alpha_T = \frac{\lambda}{C_p \rho} \dots\dots\dots (9)$$

Donde:

α : Difusividad térmica (m^2/s).

λ : Coeficiente de la conductividad térmica ($W/m.K$).

C_p : Calor específico ($J/Kg.K$).

ρ : Densidad (g/cm^3).

Donde ρ es la densidad, puede 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, citado por MUÑOZ, 2002).

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, citado por MUÑOZ, 2002).

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 citado por MUÑOZ, 2002). Se han realizado también estudios en pastas de pescado con una humedad de 82 %, encontrando un valor de difusividad térmica de $1,42 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$ (Jiménez Y Kasahara, 1991 citado por MUÑOZ, 2002). 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, citado por MUÑOZ, 2002).

1. Conductividad térmica.

La conductividad térmica es una propiedad característica de cada material, su valor puede depender de la temperatura y de una serie de factores tales como la densidad, composición, porosidad, contenido de humedad, diámetro de fibra, tamaño de poros, estructura celular, otros factores que también afectan la conductividad térmica son la presión y la temperatura. Aquellos materiales que tienen baja conductividad térmica pueden ser utilizados como aislantes (Earle R.L.1988, citado por CASTILLO Y ROJAS, 2005).

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 $W /m K$ (SINGH y HEDLMAN, 1998).

Los alimentos siendo de origen biológico, están sujetos a alta variabilidad en su composición y estructura, por lo que los valores de conductividad térmica no se mantienen siempre constantes, sin embargo son malos conductores por lo que los procesos de transferencia de calor en donde la conducción predomina, éstos son generalmente lentos (Earle R.L.1988, citado por CASTILLO Y ROJAS, 2005)

La conductividad térmica de alimentos con un alto contenido de humedad tiene valores cercanos al de la conductividad térmica del agua (Singh y Heldman, 1993 citado por GALLARDO, 2004). Sin embargo la conversión de agua a hielo incrementa la conductividad térmica aproximadamente cuatro veces (Lewis M.J ,1993 citado por CASTILLO Y ROJAS, 2005)

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. La conductividad térmica de líquidos puede incrementarse con la presión, pero decrece con un incremento de la concentración de solutos (Peleg, 1983, citado por MUÑOZ, 2002).

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 (λ) de una muestra de espesor conocido (Δx) puede ser calculada a partir de la medición de la densidad de flujo de calor (Q), si el gradiente de temperatura ($\Delta T/\Delta x$) es conocido: en W/m^2 (Ziegler Y Rizvi, 1985, citado por MUÑOZ, 2002).

$$Q = \lambda \left(\frac{\Delta T}{\Delta x} \right) \dots\dots\dots (10)$$

Donde:

\dot{Q} : Flujo de calor (W).

λ : Coeficiente de la conductividad térmica (W/mK).

T : Temperatura (°C).

x : Posición.

Modelos matemáticos han sido desarrollados por muchos investigadores para predecir las propiedades térmicas de alimentos (Choi y Okos, 1986, citado por MUÑOZ, 2002), 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. 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 (Jiménez Y Kasahara.1991, citado por CASTILLO Y ROJAS, 2005). Otros autores la definen como la velocidad de propagación de una onda térmica en un material, es decir la relación entre la habilidad del material para conducir calor con relación a la habilidad de almacenar calor. También como el cociente de la

conductividad térmica por el producto de la densidad y el calor específico, siendo sus unidades (m^2/s) (MOHSENIN, 1980). En términos físicos la difusividad térmica da una medida de la rapidez de cambio de temperatura cuando hay calentamiento o enfriamiento.

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 $2 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$ y es directamente proporcional a la temperatura (Peleg, 1983 citado por MUÑOZ 2002).

La difusividad térmica esta afectada por el contenido de agua y la temperatura así como por la composición; ya que en muchos procesos, el contenido de agua puede cambiar considerablemente, se puede esperar una variabilidad en el valor numérico de esta propiedad. Además, muchos productos no son homogéneos y la difusividad térmica puede variar de un lugar a otro en el mismo producto (Singh, 1982 citado por GALLARDO, 2004). Los alimentos que tienen alta difusividad indica que estos son mas aptos para transmitir energía por conducción que para almacenarlo, es decir pueden ser calentados o

enfriados rápidamente a diferencia de aquellos materiales que tienen baja difusividad que responden lentamente (CASTILLO Y ROJAS, 2005).

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 la pulpa de Noni, los valores encontrados se presenta en el Cuadro 3.

Cuadro 3. Difusividad térmica de algunos frutos y vegetales

Frutos	Humedad (%)	α ($\times 10^{-7}$ m ² /s)
Manzana	86,8	1,30
Melón	93,7	1,59
Sandia	92,6	1,37
Papaya	89,5	1,33
Tomate	94,9	1,50
Lima	90,1	1,32
Ciruela	88,7	1,49
Plátano	75,2	1,38
Durazno	87,4	1,57
Agua	100	1,48
Fresa	91,8	1,47

Fuente: ALVARADO y AGUILERA, (2001).

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 (Schneider, 1957 citado por GALLARDO, 2004).

El calor específico depende de la composición del alimento, u contenido de humedad, temperatura y presión. Sin embargo, en muchas aplicaciones en procesamiento de alimentos, normalmente se considera que esta propiedad permanece constante en el intervalo de temperatura de trabajo (Singh y Heldman, 1993 citado por GALLARDO, 2004)

El calor específico es la única propiedad para estimar la cantidad de energía requerida para cambiar la temperatura de un producto alimenticio y es definido, como la cantidad de calor ganado o perdido por unidad de masa de producto para lograr el cambio deseado en temperatura , sin un cambio de fase .

Si el calentamiento se produce manteniendo constante el volumen de la sustancia o su presión, se habla de calor específico a volumen constante o presión constante estos son llamados “calores específicos principales”.

En los alimentos, es una propiedad difícil de cuantificar, depende en su mayoría de la cantidad de agua presente y por el estado físico del agua, por lo que se calcula el calor específico de un alimento a partir de su composición. En el cuadro 4 se indican los calores específicos en Kj/Kg°K, obtenidos experimentalmente, de diversos alimentos (CASTILLO Y ROJAS, 2005).

Cuadro 4. Calores específicos de algunos zumos de Frutas

Producto	T(°C)	Calor específico experimental (Kj/Kg°K)
Zumo de frambuesa	25	3,89
Zumo de fresa	25	3,98
Zumo de naranja	25	3,822
Zumo de naranja	15;H=89%	3,89
Zumo de manzana	25	3,85
Zumo de cereza	25	3,85

Fuente: George D. Hayes, (1992) citado por CASTILLO y ROJAS, (2005).

En términos termodinámicos, el calor específico a presión constante es definido como una función de Energía Libre de Gibbs (G), según la Ecuación (14).

$$C_p = \left(\frac{\partial G}{\partial T} \right)_P \dots\dots\dots (14)$$

Donde:

C_p : Calor específico del material (J/kg °C o J/kg K).

∂G : Variación de energía o entalpía (J).

δT : Variación de temperatura (°C).

Experimentalmente, el calor específico ha sido frecuentemente medido a través de método de combinación del calorímetro adiabático o del calorímetro diferencial de barrido (DSC), (Santos, 2004 citado por COARICONA, 2008).

III. MATERIALES Y MÉTODOS

A. LUGAR DE EJECUCIÓN

El experimento se realizó en la Planta piloto y en los laboratorios de: Análisis de Alimentos, Ingeniería de Alimentos y Nutrición Animal de la Universidad Nacional Agraria de La Selva, ubicada en la ciudad de Tingo María; provincia de Leoncio Prado, departamento de Huanuco, región Andrés Bello; ubicada a 660 msnm, con una humedad relativa de 84% y una temperatura promedio anual de 24 °C, en el periodo comprendido Junio y Agosto del año 2008.

B. MATERIA PRIMA

- El fruto del Noni (*Morinda citrifolia*, L), fue obtenido de un lote de cultivo del noni ubicado de la zona de Aguaytía, la cantidad necesaria para las pruebas, se recibió y almacenó descartando las dañadas, las verdes y sobremaduras. Se colocó en bolsas de 1kg para posteriormente realizar el proceso de pulpeado.
- Soluciones de sacarosa de 60 y 70 °Bx.

C. EQUIPOS, MATERIALES Y REACTIVOS.

1. Equipos.

- Balanza analítica electrónica OHAUS, modelo AP210s serial number 113032314, Sensibilidad 0.0001 g, EEUU.
- Bomba de vacío, tipo pV 35-535(EE.UU).
- Computadora instalada con programa de "DATA TRACE" FOR WINDOWS DATATRECE micropack serial number M3T12677, model 7500T1, rango -20 To +140 DEGREES C, DATATRECE micropack serial number M3T11776, part number 12752823-501, model 7500T2, rango -20 To +140 DEGREES C, USA.
- Difusor térmico con 1 motor de 220 voltios marca Sankey (adaptada a 60 rpm) con una paleta mecánica (agitador) y resistencia de 3000 watts a 220 voltios.
- Estufa tipo LP 201/AL con temperatura hasta 200.
- Equipo micro kjeldahl para la determinación de proteínas.
- Equipo Soxhlet para la determinación de grasa.
- Equipo completo para la determinación de fibra.
- Equipo de titulación para medir la acidez (bureta autoenrrasable de 10 mL), marca de bureta; pipetas, marca MSARIENFLED, tolerancia 0,1 mL volumen 10mL, made in Germany.
- Picnómetro o matraz aforado de 100ml clase A PIREX.
- Potenciómetro, marca SCHOTT, modelo CG840, digital, rango de pH 0

- 14, made in USA.

- Pulpeadora o majador marca KAMPLEX tipo Ep-9 con juego de tamices; made in Hungría; cámara congeladora, marca OLIVEROS.
- Refractómetro de mesa, marca QUIMUS: graduado de 0% a 100% de sacarosa, made un Brasil.
- Refrigeradora marca electrolux modelo Firgidaire Frost free, Canadá.
- Sensores térmicos "DATA TRACE" (con dos sondas).

2. Materiales.

- Agua destilada.
- Bandejas de acero inoxidable.
- Cuchillos de acero inoxidable.
- Cilindros de acero inoxidable de dimensiones, longitud: 200 mm por diámetro: 30,10 mm.
- Tamices
- Bolsas de polietileno.
- Mesa de acero inoxidable.
- Crisol.
- Lunas de reloj.
- Termómetro de mercurio Brannan, rango -20°C a 110°C , precisión $\pm 1^{\circ}\text{C}$.
- Material aislante (teflón, corcho, cinta aislante).
- Matraz marca Schott de 500,1000 mL.

- Papel tisú.
- Pinza de metal.
- Probeta marca Kimax de 100, 200, 300, 400, 500 mL.
- Pipeta marca Schott de 0,5; 5;10 mL.
- Tapones de jebe para los extremos del cilindro.
- Vasos de precipitación marca Boeco de 100, 200, 300, 400, 500, 1000 mL; campana de vidrio marca csn-cimax (desecador).
- Vasos de precipitado, marca MARIENFELD, volumen de 100, 250, 400,500 mL c/u , made in Germany .
- Soporte de fierro para el tubo de acero.

3. Reactivos.

Hidróxido de sodio (NaOH) 0.1N, marca RIEDEL DE HAEN; indicador de fenoltaleina 1%; buffer acetato de sodio 0.1 M pH 4.5, marca RIEDEL DE HAEN; buffer acetato de sodio 1M pH 5, marca RIEDEL DE HAEN. Acido sulfúrico, colorante 2-6 diclorofenolindofenol.

D. MÉTODOS DE ANÁLISIS

1. Características biométricas del Noni.

La medición física y biométrica, se realizó en los frutos de Noni, utilizándose un micrómetro, midiendo el diámetro, longitud promedio y el peso promedio.

2. Características químico proximales del Noni.

- Determinación de humedad: método 12.002 (AOAC 1984).
- Proteína (Nx6, 25), (AOAC 1997).
- Grasa, método descrito por (AOAC, 1997).
- Determinación de cenizas, según A. O. A. C. (1995), N° 923,03.
- Determinación de fibra, según A. O. A. C. (1997), N° 920,86.
- Densidad, método de volumen, según la metodología descrita por LIDE, (1998).

3. Características fisicoquímicas del Noni.

- Determinación del pH: método 11.032(AOAC, 1997).
- Determinación de sólidos solubles: método 932.14C (AOAC, 1995).
- Acidez titulable: método 942.15 (AOAC, 1997).
- Determinación de Índice de madurez, indicado por BLEINROTH, (1993)
- Determinación de sólidos totales, según la metodología descrita por PEARSON, (1976).
- Determinación de Vitamina C, según la metodología descrita por PEARSON, (1976).
- Determinación de Azúcares reductores, Según la metodología descrita por MAIER, (1981).

4. Determinación de la difusividad térmica.

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).

E. METODOLOGÍA EXPERIMENTAL.

1. Caracterización del fruto del Noni

- a. Características biométricas del Noni.
- b. Caracterización químico proximal del Noni.
- c. Caracterización fisicoquímica del Noni.

2. Preparación de la muestra de pulpa de Noni.

Los frutos de Noni obtenidos de un mismo lote, se seleccionaron tomando en cuenta las características físicas de la fruta en el estado maduro (cambio de color verde a amarillo opaco, olor fuerte penetrante y de consistencia acuosa) seleccionándose los frutos por el tamaño, color homogéneo y descartando la fruta dañada, se procedió al pesado y lavado de los frutos para eliminar residuos, luego se realizó un cortado para disminuir el tamaño de la fruta para posteriormente pasar al pulpeado, se tamizó hasta obtener la pulpa, se procedió al envasado en bolsas de polietileno, para ser almacenadas a temperatura de -20°C para su conservación para el tiempo que dure la ejecución de la investigación.

Para conocer las características de la materia prima con la que se estaba evaluando la difusividad se realizaron análisis de la humedad, densidad y sólidos solubles en cada muestra para cada experimento de pulpa de Noni antes de la determinación de la difusividad térmica.

Las muestras de Noni almacenadas en congelación a -20°C permanecieron, previo a la determinación de humedad, densidad y sólidos solubles, a temperatura ambiente durante un tiempo aproximado de 4 horas para descongelar la muestra. El descongelamiento también se realiza previo a cada tratamiento térmico.

El Diagrama de flujo para el acondicionamiento de pulpa de Noni se presenta en la figura (1).

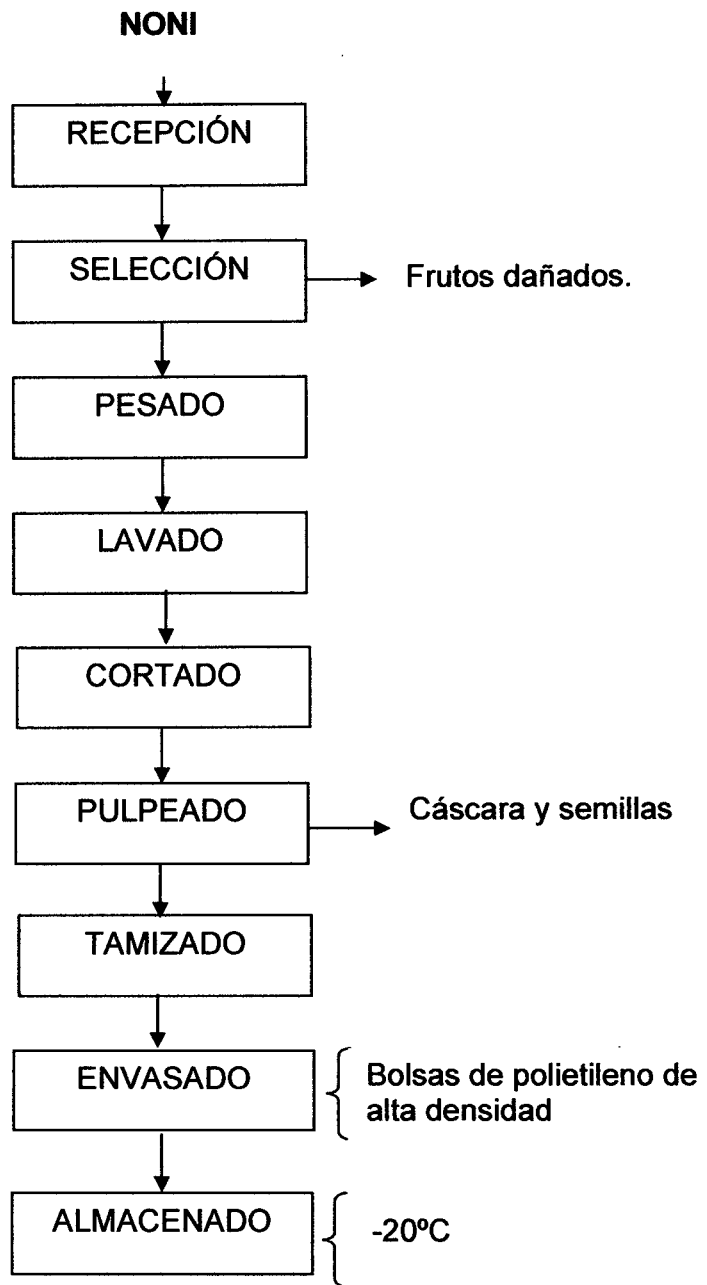


Figura 1. Diagrama de flujo para el acondicionamiento de pulpa de Noni.

3. Validación del equipo utilizado para hallar la difusividad térmica

- Para la validación del equipo utilizado, se probó con soluciones de sacarosa a diferentes concentraciones y tratamientos térmicos.
- Se colocó un sensor térmico en el cilindro y otro en el recipiente y los análisis se realizaron por triplicado, el diseño experimental fue de 2 muestras, equivalente a 2 concentraciones, y 3 tratamientos térmicos, con un arreglo factorial de 2 x 3 para la determinación de la difusividad térmica.
- Se tomó nota de las temperaturas de ambos sensores térmicos hasta hacer llegar la solución a punto de ebullición.
- Con los datos que se obtuvo se procedió a graficar las curvas usando una hoja electrónica Excel para de esta manera observar su comportamiento.

4. Determinación de la difusividad térmica

Para realizar la medición de la difusividad térmica se utilizó el equipo que se muestra en la figura 2, que es el método desarrollado por Dickerson (1965), consiste en baño de agua agitado a temperaturas señaladas para cada tratamiento, un cilindro (hecho con material de alta conductividad térmica) en el cual se llenó el alimento en este caso la pulpa de Noni, 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, para posteriormente sumergirlo en el baño de agua. Se colocaron dos sensores de temperatura previamente programados en el "DATA TRACE" programa instalada en la computadora, con la finalidad de registrar y almacenar las temperaturas del centro térmico y del medio de calentamiento para luego ser procesados y determinar las difusividades térmicas, según el diseño indicado en la figura 3.

Posterior a las experiencias, se aplicaron los análisis utilizando el método analítico, gráfico y estadísticos para los 7 tratamientos para detectar diferencias significativas entre los tratamientos.

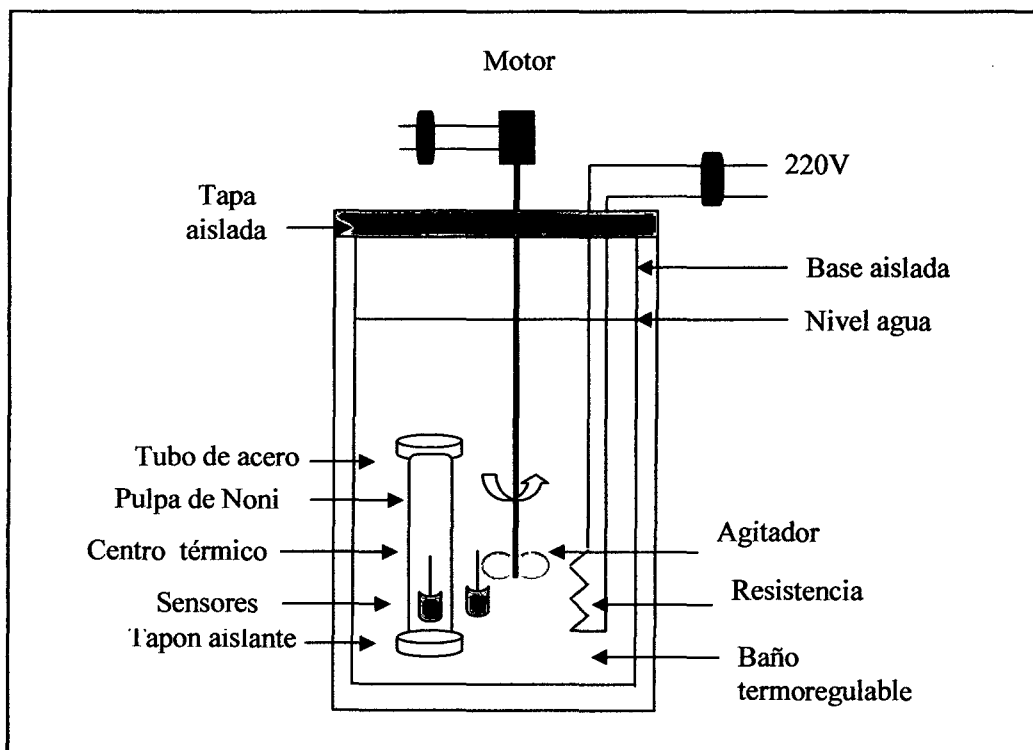


Figura 2. Diseño del equipo utilizado para la obtención del perfil térmico.

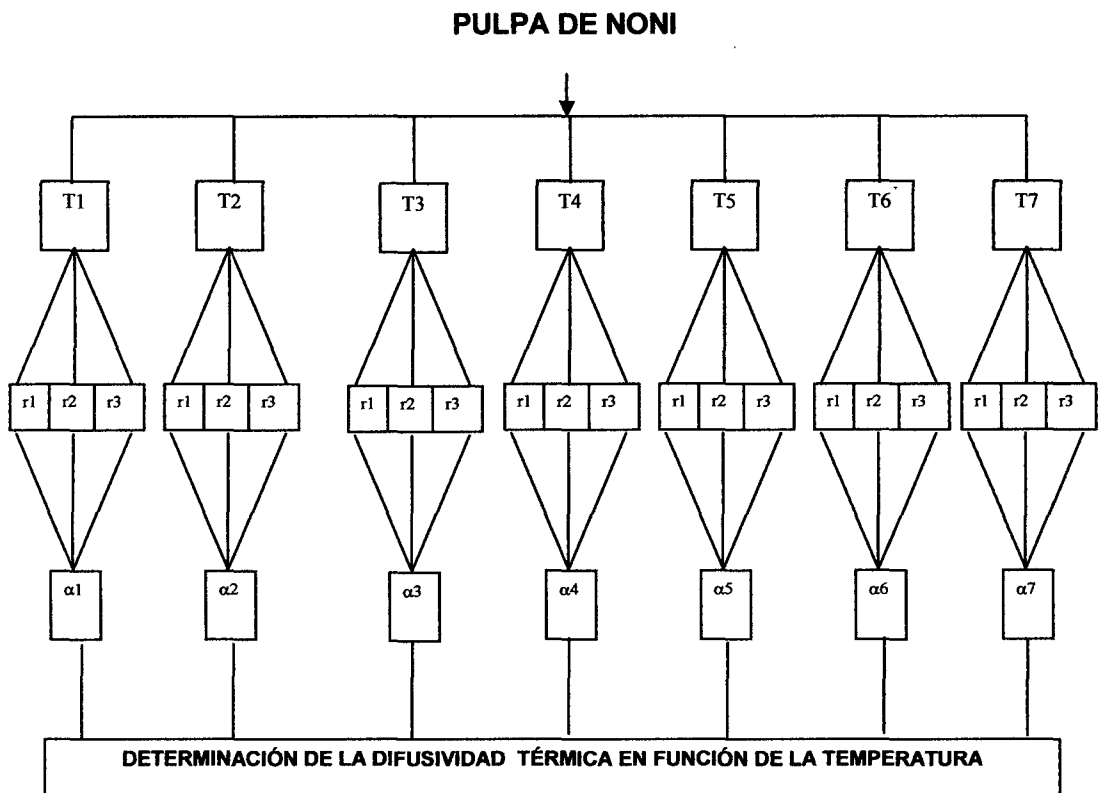


Figura 3. Diseño experimental para determinación de la difusividad térmica de pulpa de Noni.

Leyenda: T_i = temperatura del medio de calentamiento °C (T_m)

Temperatura del medio de calentamiento a: $T_1= 50$ °C, $T_2= 55$ °C,

$T_3= 60$ °C, $T_4=65$ °C, $T_5= 70$ °C, $T_6= 75$ °C y $T_7=80$ °C.

Repeticiones: r_1, r_2, r_3 .

Promedio de difusividades: $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \alpha_4, \alpha_5, \alpha_6, \alpha_7$

Para determinar la difusividad térmica se utilizó el método de transferencia de calor en el estado no estacionario desarrollado por Dickerson en 1965 y modificado por Poulsen, 1982. Tal como se muestra en la ecuación (15):

$$t = 0,398 \frac{r^2}{\alpha_r} \log \left[1,6 \frac{T_m - T_0}{T_m - T} \right] \dots\dots\dots (15)$$

Donde:

α_T : Difusividad térmica en m^2 / s

r : 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_0 : 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 (15), queda la ecuación de una recta

$$\log \left[1,6 \frac{T_m - T_0}{T_m - T} \right] = \frac{1}{0,398} \frac{\alpha_t}{r^2} t \dots\dots\dots (16)$$

Donde:

$\left[\frac{T_m - T_0}{T_m - T} \right]$ 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 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:

$$m = \frac{1}{0,398} \frac{\alpha_T}{r^2} \dots\dots\dots (17)$$

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 (16), la que está en función de la distancia recorrida y difusividad térmica

Despejando α_t de la ecuación (17); La expresión que permite encontrar la difusividad térmica queda como sigue:

$$\alpha_t = 0,398mr^2; m^2 / S \dots\dots\dots (18)$$

Con los datos obtenidos se buscará una función que explique el comportamiento de difusividad térmica en función de la temperatura para el rango de trabajo de 50 – 80 °C.

$$\alpha_t = f(T) \dots\dots\dots (19)$$

IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

A. DE LA CARACTERIZACIÓN DEL FRUTO DEL NONI

1. De las características biométricas del Noni.

En el cuadro 5 se aprecian las medidas biométricas del fruto de Noni.

Cuadro 5. Medidas biométricas de diez frutos de Noni.

Fruto Nº	Peso (g)	Longitud (cm)	Diámetro (cm)
1	320	8,4	4,7
2	310	8,3	4,5
3	333	7	4,6
4	303	8,3	4,5
5	295	8,2	4,5
6	300	8,9	4,2
7	340	8,6	4,5
8	312	6,5	4,2
9	330	8	4,4
10	322	7,8	5,4
X	316 ± 15,01 g	8,0 ± 0,73 cm	4,55 ± 0,33 cm

Los valores representan el promedio ± la desviación estándar de las tres repeticiones.

Según el cuadro 5, el peso del fruto tiene un promedio de $316 \pm 15,01$ g

Siendo un peso máximo de 340 g y mínimo de 295 g.

La longitud tiene un promedio de $8,0 \pm 0,73$ cm, siendo un tamaño

máximo de 8,9 cm y mínimo de 6,5 cm; su ancho (diámetro mayor) tiene un promedio de $4,55 \pm 0,3$ cm, dicho diámetro tiene como máximo 5,4 cm y mínimo 4,2 cm. La fruta tiene forma ovalada; el cual se encuentra próximo al promedio de 2,5 - 3,5 cm de diámetro, con una superficie cubierta de pequeñas protuberancias (PARRA, 2006).

2. De la evaluación químico proximal del Noni

En el cuadro 6, se observa los valores porcentuales de los diversos componentes del fruto de Noni.

Cuadro 6. Evaluación químico proximal de la pulpa de Noni.

Determinaciones	Porcentajes (%)
Humedad	91,3±0,3
Proteína (Nx6,25)	2,46± 0,01
Grasa	0,5±0,08
Ceniza	1,03 ±0,08
Fibra	4,97 ±0,05

Los valores representan el promedio \pm la desviación estándar de las tres repeticiones.

Analizando el cuadro 6, se encontró que el Noni presenta un $91,3 \pm 0,3\%$ de humedad no habiendo mucha diferencia con lo indicado por CHAN *et. al.*, (2007), quien muestra una humedad de $91,8 \pm 0,4$ g/100 g. El contenido de proteína fue de $2,46 \pm 0,01\%$, a diferencia de otros frutos tales como la tuna verde y la papaya que contienen 1,5 y 0,9

respectivamente (REPO Y ENCINA, 2008), el fruto del Noni es una importante fuente de proteínas.

Un $4,97 \pm 0,05$ % de fibra en el fruto del Noni, es importante ya que la cantidad que contiene es mayor a las frutas, como la tuna verde y la papaya que contienen 3,7 y 0,6 respectivamente (REPO Y ENCINA, 2008),

3. De las características fisicoquímicas del Noni.

La composición fisicoquímica del Noni se muestra en el cuadro 7, se observa que el pH $4,20 \pm 0,17$ %, CHAN *et al.*, (2007), señala que el Noni es una fruta ácida con un pH = $4,0 \pm 0,1$; el Noni presenta un alto contenido de sólidos totales $36,49 \pm 0,12$ %, sólidos solubles $8,60 \pm 0,7$ %. CHAN *et al.*, (2007), señala que el Noni tiene sólidos solubles de $7,3 \pm 0,3$ g /100 g. De lo cual DAMASO (2005), menciona que en los frutos maduros, los sólidos totales solubles tienen importancia por estar formados de compuestos orgánicos que en gran medida, determinan el sabor, los colores, y en general, la calidad de las frutas, además pueden ser utilizados como indicadores de maduración.

En cuanto al contenido de vitamina C: $33,25 \pm 0,09$ mg /100g, se encuentra próximo al de algunos cítricos como lo indica el INS (1996), 36,0 mg /100g para la Lima, 44,2 para el Limón, 48,7 Mandarina. CHAN *et al.*, (2007), indica que el Noni es una fruta rica en vitamina C (316 ± 64 mg/100 g). Azúcares reductores $15,44 \pm 0,04$ mg /100g.

Cuadro 7. Composición fisicoquímica de la pulpa de Noni

Determinaciones	Porcentajes (%)
pH	4,20± 0,17
Sólidos solubles	8,6±0,7
Acidez titulable (% como ácido cítrico)	0,2±0,02
Índice de madurez	30,00 ±0,08
Sólidos totales	36,49±0,12
Vitamina C (mg /100g)	33,25 ±0,09
Azúcares reductores (mg /100g)	15,44±0,04

Los valores representan el promedio \pm la desviación estándar de las tres repeticiones.

B. PREPARACIÓN DE LA MUESTRA DE PULPA DE NONI

En la figura 4 y cuadro 8, se muestra el balance de materia para la obtención de la pulpa de Noni, de las cuales se obtuvieron 2836 gramos de pulpa, con un rendimiento del fruto del 47,9%, ya que este fruto presenta semillas y cáscaras que hacen que obtenga este rendimiento. ORTEGA (1974), Obtuvo en sus estudios de extracción y almacenaje de pulpa refinada de Taperíba un rendimiento de 39,94% por fruta entera, este porcentaje es debido a la semilla y la cáscara. REYES (2007), Obtuvo un rendimiento en la extracción de la pulpa de Noni de un 40%.

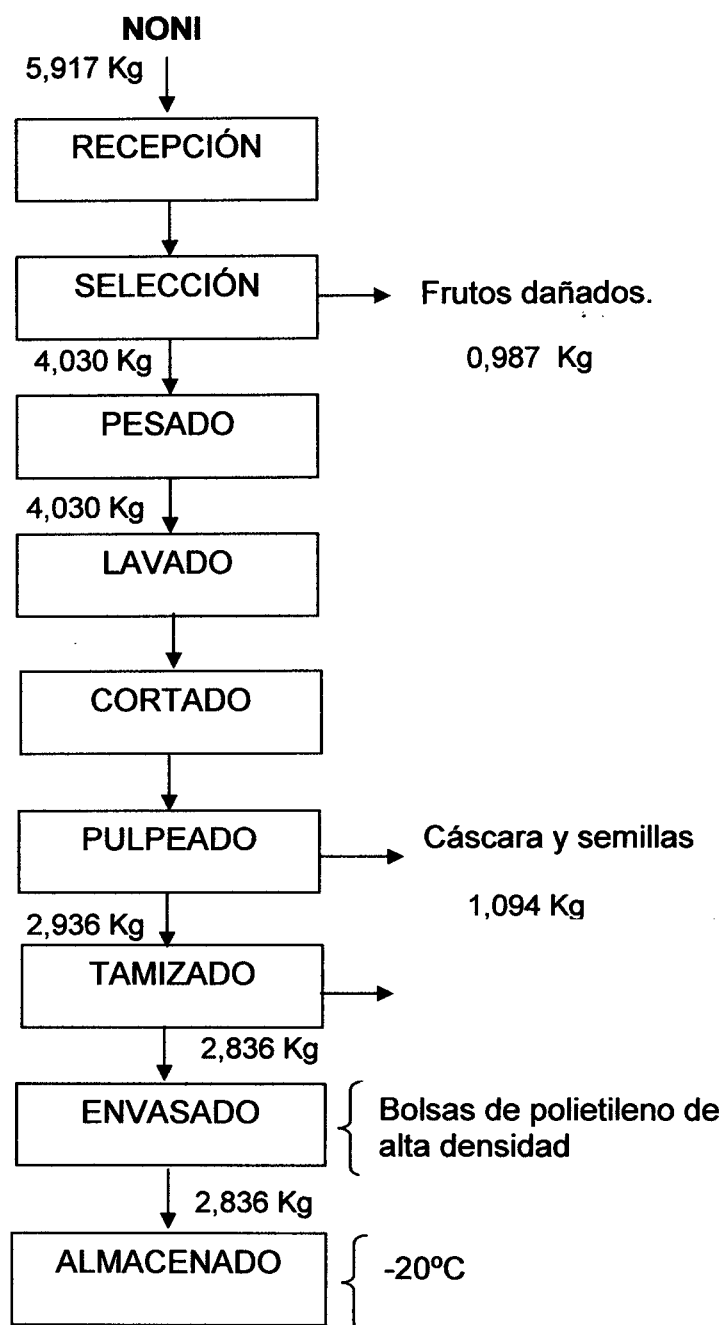


Figura 4. Balance de materia en la obtención de la pulpa de Noni.

Cuadro 8. Balance de materia en la obtención de la pulpa de Noni.

OPERACIONES	ENTRA	SALE	CONTINÚA	R.O. (%)	R.P. (%)
Recepción	5,917 Kg	-----	5,917 Kg	100,00	100,00
Selección	5,917 Kg	0,987 Kg	4,030 Kg	68,108	68,108
Pesado	4,030 Kg	-----	4,030 Kg	100,00	68,108
Lavado	4,030 Kg	-----	4,030 Kg	100,00	68,108
Cortado	4,030 Kg	-----	4,030 Kg	100,00	68,108
Pulpeado	4,030 Kg	1,094 Kg	2,936 Kg	72,853	49,619
Tamizado	2,936 Kg	0,100Kg	2,836 Kg	96,594	47,928
Envasado	2,836 Kg	-----	2,836 Kg	100,00	47,928
Almacenado	2,836 Kg	-----	2,836 Kg	100,00	47,928

R.O =Rendimiento por operación

R.P = Rendimiento por proceso

1. Humedad de la pulpa de Noni en las diferentes muestras

La humedad registrada tuvo un promedio máximo de 91,3% y a un mínimo de 89,7 % (Cuadro 9). Esto se debe a que la materia prima para su conservación se congeló y para cada experimento tuvo que ser descongelada, por tanto, la última muestra o lote utilizado de material de análisis obtuvo el valor más bajo de humedad (la muestra fue la que permaneció el mayor tiempo bajo congelación). El tiempo máximo de permanencia fue de 7 semanas. En el cuadro 9 se muestran los valores de humedad promedio para cada tratamiento. Todos los valores determinados para humedad se encuentran en triplicado en Anexo 1.

Cuadro 9. Humedad promedio de las muestras en los diferentes tratamientos.

Muestra para el tratamiento	Humedad de la pulpa de Noni	
	Promedio %	Desviación estándar
1	91,3	±0,3
2	90,9	±0,5
3	90,7	±0,4
4	90,4	±0,6
5	90,0	±0,6
6	89,9	±0,3
7	89,7	±0,3

Los valores representan el promedio \pm la desviación estándar de las tres repeticiones.

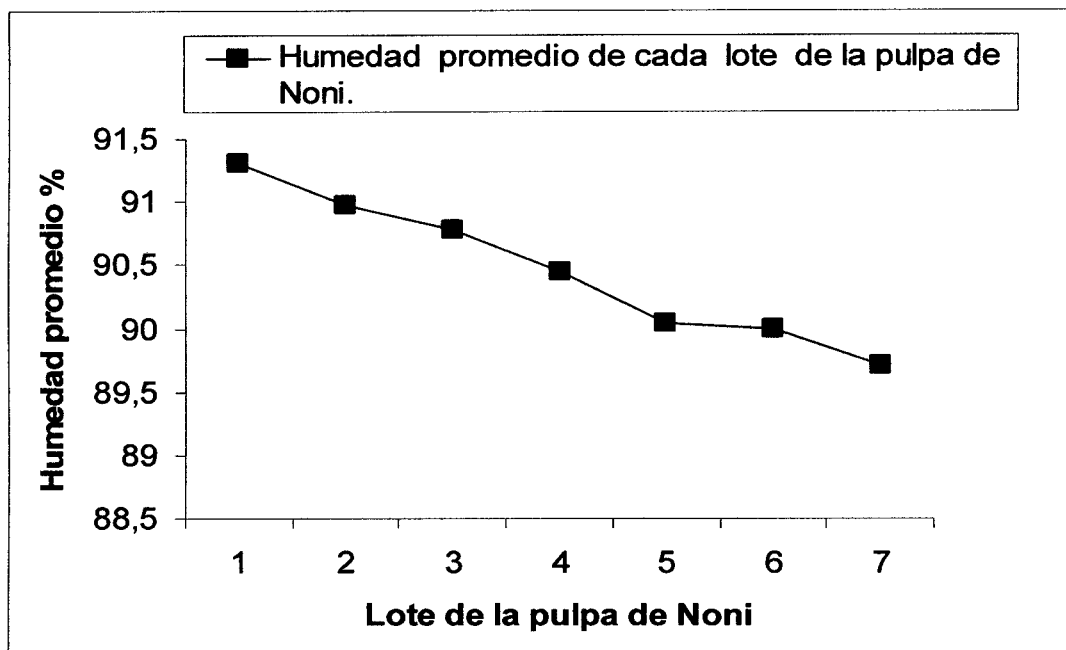


Figura 5. Humedad promedio de las muestras utilizadas para cada tratamiento.

En la Figura 5, se observa la leve disminución experimentada por la humedad de las muestras utilizadas en los diferentes experimento; 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 (Anexo 2), se observó que existe diferencia estadísticamente significativa entre los valores promedio de humedad de las muestras utilizadas para cada experimento. 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 para la pulpa de Noni de 91,3 % con una desviación estándar de $\pm 0,3$ %.

Este resultado es comparable a lo determinado por JIMÉNEZ (2003) el cual muestra un contenido de humedad de 92,5%.

2. Densidad de la pulpa de Noni en las diferentes muestras

El análisis estadístico muestra que no existe diferencia significativa entre los valores determinados en las muestras de la pulpa de Noni correspondientes a los diferentes lotes utilizados en cada experimento. MUÑOZ (2002), menciona que la poca fluctuación en la densidad es una variación propia de productos naturales. Pereira *et al.*(2002) citado por CASTILLO y ROJAS (2005), indican que la densidad del jugo de fruta es directamente proporcional al contenido de humedad (T° constante) e inversamente proporcional a la temperatura.

CASTILLO y ROJAS,(2005), mencionan que las frutas y verduras contienen entre 75 y 95% de agua por lo que sus densidades están próximas a 1g/mL, aunque depende también de la porosidad y de la cantidad de aire contenido. Las densidades de frutas y hortalizas congeladas son menores que las correspondientes en estado fresco. En los resultados se encontró un rango de variación de un máximo de

1,021 g/mL y un mínimo de 0,982 g/mL, (Cuadro 10, Figura 6), existiendo un rango de variación mínima entre las muestras para cada experimento. Las repeticiones de las densidades de todos los tratamientos se observan en el Anexo 3.

Cuadro 10. Densidad promedio de las muestras en los diferentes tratamientos.

Densidad promedio		
Muestra	(g/mL)	Desviación estándar(g/mL)
1	1,001	±0,03
2	1,001	±0,03
3	1,005	±0,03
4	1,005	±0,02
5	1,003	±0,04
6	1,021	±0,02
7	0,982	±0,05

Los valores representan el promedio \pm la desviación estándar de las tres repeticiones.

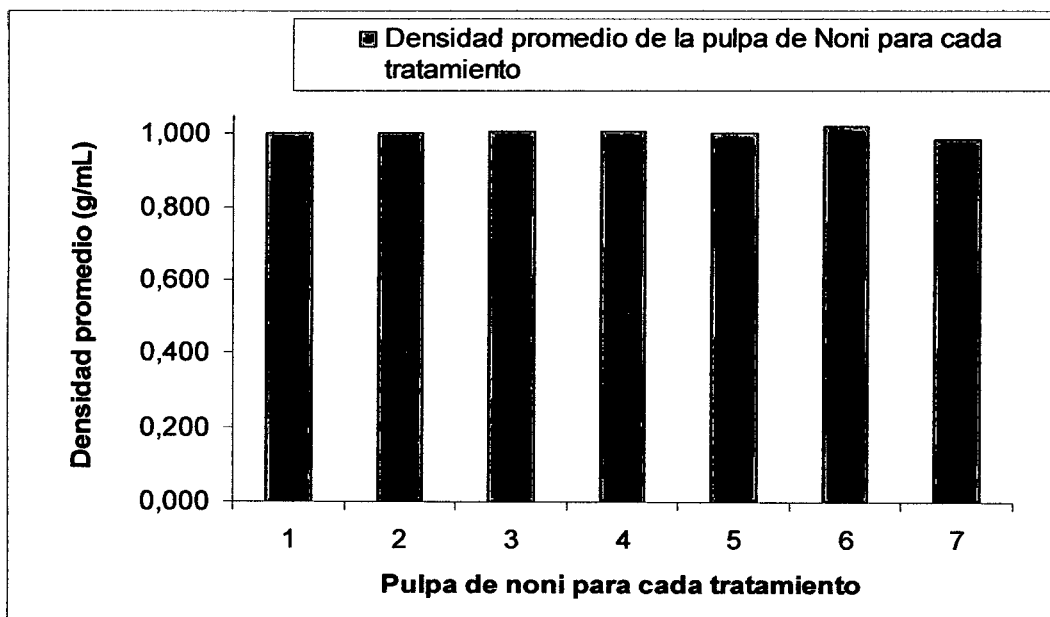


Figura 6. Densidad promedio de las muestras utilizadas para cada tratamiento.

La densidad promedio de la pulpa de Noni fue, de 1,001 g/ mL con una desviación estándar de $\pm 0,03$ g / mL. Los datos del análisis estadístico se presentan en el Anexo 4.

3. Sólidos solubles de la pulpa de Noni en las diferentes muestras

El análisis estadístico (Anexo 5), mostró que no existe diferencia significativa en los sólidos solubles de la pulpa Noni, con un grado de confianza del 95 %, entre los valores determinados en las muestras, utilizadas para 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 9,8 °Brix y un mínimo de 7,7 °Brix, (Cuadro 11). Las repeticiones de los sólidos solubles, en °Brix, de todos los tratamientos se observan en el Anexo 6.

Cuadro 11. Sólidos Solubles promedio en los tratamientos.

Muestra para el tratamiento	Sólidos Solubles de la pulpa de Noni	
	Promedio (°BRIX)	Desviación estándar
1	7,7	$\pm 1,8$
2	8,3	$\pm 1,4$
3	8,6	$\pm 0,7$
4	9,1	$\pm 0,8$
5	9,7	$\pm 0,7$
6	9,7	$\pm 1,1$
7	9,8	$\pm 1,9$

Los valores representan el promedio \pm la desviación estándar de las tres repeticiones.

Observamos gráficamente en la Figura 7, lo mencionado anteriormente que existe un rango de variación mínima entre las muestras para cada tratamiento.

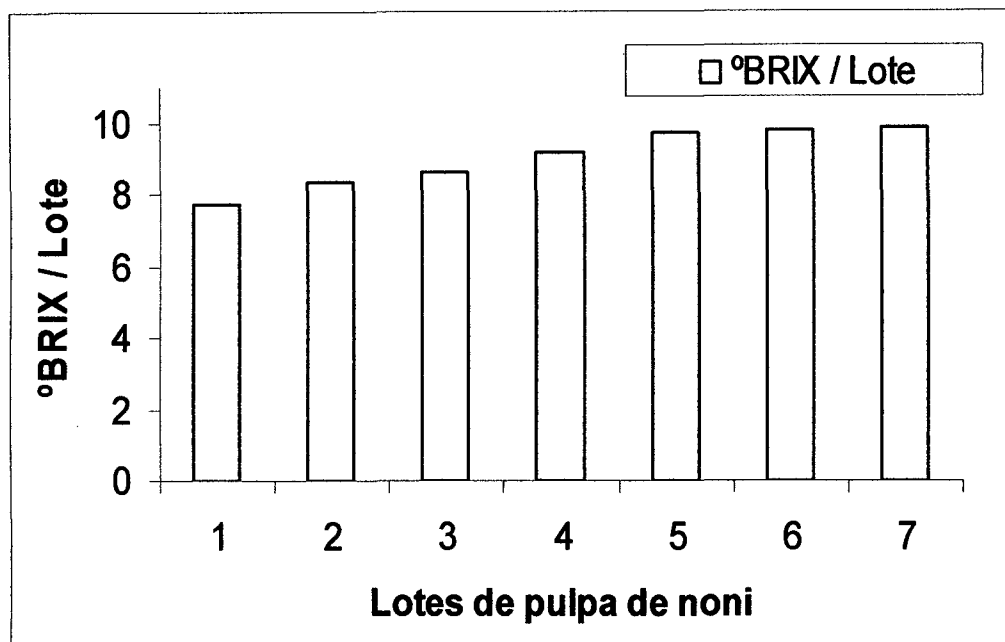


Figura 7. Sólidos solubles promedio de las muestras utilizadas para cada tratamiento.

C. VALIDACIÓN DEL EQUIPO UTILIZADO PARA HALLAR LA DIFUSIVIDAD TÉRMICA.

- **Medición de la difusividad térmica en soluciones de sacarosa.**

En el cuadro 12, se observa los resultados donde existe una dependencia de la difusividad térmica con la temperatura, mostrando una relación, en donde 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.

MUÑOZ (2002), determinó que sus resultados obtenidos van en incremento conforme la temperatura aumenta.

Los valores de todas las repeticiones en las soluciones de sacarosa se presentan en el Anexo 7.

Cuadro 12. Difusividad térmica promedio en soluciones de sacarosa.

Concentración °Brix	Tratamiento Térmico Tm (°C)	Temperatura inicial de muestra To (°C)	Difusividad Térmica 10 ⁻⁷ m ² /s	Desviación estándar 10 ⁻⁷ m ² /s
60	50	27,3 ± 2,2	1,91	± 0,104
			2,11	±0,102
	60		2,44	±0,212
			70	
70	50	27,5 ± 0,9	1,79	±0,110
			2,07	±0,235
	60		2,34	±0,127
			70	

Los valores representan el promedio ± la desviación estándar de las tres repeticiones.

En el cuadro 12 se observa una relación inversa entre el valor de la difusividad térmica y la concentración en ellas 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.

GABAS *et al.* (2005), observó en su investigación en el fruto de la ciruela, cuyo contenido de humedad fue de 14,2 a 80,4 % un aumento de la difusividad térmica con el aumento del contenido de humedad.

Tschubik y Maslow (1973) citado por MUÑOZ (2002), tabularon las propiedades termo físicas de la sacarosa en concentraciones de 60 °Brix (Cuadro 13), 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 13. Propiedades termo físicas para soluciones de sacarosa

Concentración °Brix	Temperatura °C	Propiedades termo físicas		
		λ (W/m K)	C_p (J/Kg K)	ρ (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), citado por MUÑOZ (2002).

Tschubik y Maslow (1973), citado por MUÑOZ, (2002), Calcularon la difusividad térmica según la relación que asocia las propiedades termofísicas:

$$\alpha_T = \frac{\lambda}{C_p \cdot \rho} \dots\dots\dots (22)$$

MUÑOZ (2002), indica valores obtenidos en dos concentraciones de 60 °Brix y 70 °Brix, utilizando la formula $\alpha_T = 0,398.m.r^2$, las cuales se tienen un rango en la concentración de 60°Brix de $2,04 \times 10^{-7}$ a $2,25 \times 10^{-7}$ m²/s y en 70 °Brix de $1,83 \times 10^{-7}$ m²/s a $2,16 \times 10^{-7}$ m²/s.

COARICONA (2008), obtuvo a partir de las experiencias en solución de sacarosa a 60 °Brix un promedio de la difusividad térmica de $2,57 \times 10^{-7}$ m²/s con desviación estándar de $1,084 \times 10^{-8}$ m²/s, obteniendo sus resultados a partir de la ecuación utilizada por Muñoz (2002). Se compararon los resultados obtenidos y se obtuvo lo indicado en el cuadro 14.

Los resultados del cuadro 14, muestran que existe una relación diferencial mayor en los datos de Tschubik y Maslow (1973) citado por MUÑOZ (2002), con el presente trabajo, el cual posiblemente sólo estimó el efecto de conducción en soluciones de sacarosa obviando el efecto de convección, al contrario con las muestras de MUÑOZ (2002) que tiene una diferencia mínima con los datos del presente trabajo, en los resultados elaborados por COARICONA (2008), se observa una diferencia con el presente trabajo.

Cuadro 14 .Comparación de valores de medición experimentales y de literatura para difusividad térmica en soluciones de sacarosa a 60 °BRIX.

Temperatura exterior °C	50	60	70
Tschubik y Maslow (x 10 ⁻⁷) (m ² /s)	1,17(a)	1,18(a)	1,19(a)
Muñoz (x 10⁻⁷) (m²/s)	2,04(b)	2,18(b)	2,25(b)
Coaricona (x 10⁻⁷) (m²/s)	2,46(c)	2,56(c)	2,68(c)
Presente trabajo (x 10⁻⁷) (m²/s)	1,91(d)	2,11(d)	2,44(d)
Relación diferencial (%)1- (a/d)	39	44	41
Relación diferencial (%)1- (b/d)	7	3	8
Relación diferencial (%)1- (c/d)	28	21	10

Este método para la determinación de la difusividad es válido para productos donde la transferencia de calor se realiza principalmente por conducción. Según MUÑOZ (2002), es usado principalmente para la determinación de la velocidad de transferencia de calor en pastas de alimentos.

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 por lo que existe mucha diferencia con los valores reportados por Tschubik y Maslow (1973), citado por MUÑOZ (2002), COARICONA (2008) y MUÑOZ (2002) respectivamente.

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 18, 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 el análisis de varianza (ANVA). (Anexo 2); 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 %; esto indica que existe una dependencia de la difusividad térmica con la temperatura, dado que como se observa en los valores del cuadro 14, 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 citado por COARICONA ,2008).

D. DIFUSIVIDAD TÉRMICA DE LA PULPA DE NONI EN LOS DIFERENTES TRATAMIENTOS.

a. Difusividad térmica en el tratamiento a 50°C.

El tratamiento a 50 °C, mostró un promedio de $1,38227 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$, con un mínimo de $1,26207 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$ y un máximo de $1,53252 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$ (Anexo 9). Este promedio resulta ser el más bajo comparado con todos los tratamientos, debido a que a menor temperatura de trabajo también es menor la velocidad de transferencia de calor.

En la Figura 8, se grafican las repeticiones del tratamiento, mostrando una correlación entre ellas.

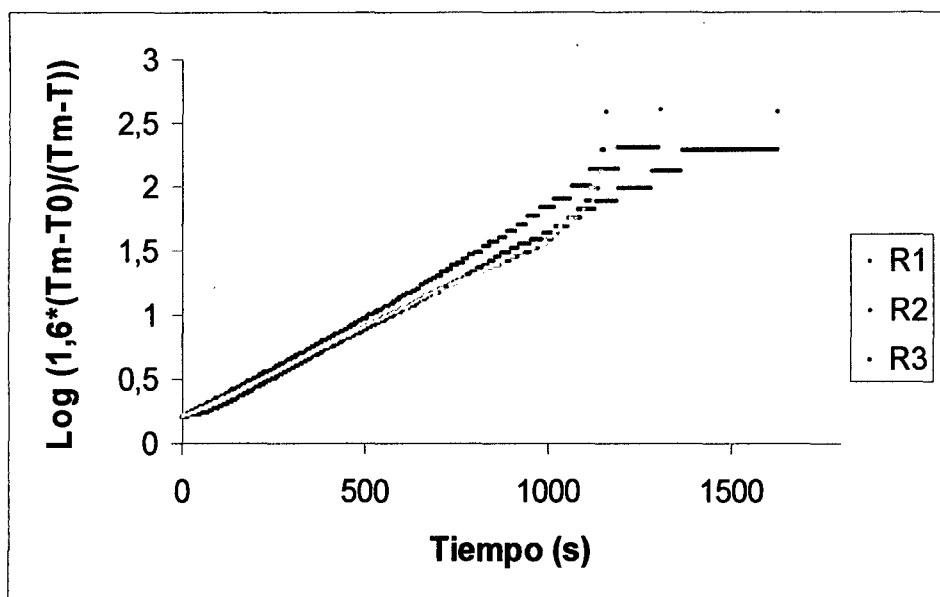


Figura 8. Linealización de los perfiles térmicos correspondientes al tratamiento de 50 °C.

b. Difusividad térmica en el tratamiento a 55 °C.

En la Figura 9, se grafican las repeticiones registradas del tratamiento.

El tratamiento a 55 °C, mostró un promedio de $1,47242 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$, con un mínimo de $1,17192 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$ y un máximo de $1,71281 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$ (Anexo 9).

Este promedio resultó al igual que el tratamiento a 50°C, ser uno de los más bajos de todos los tratamientos, dado que las temperaturas de trabajo fueron las menores y hace que la velocidad sea lenta.

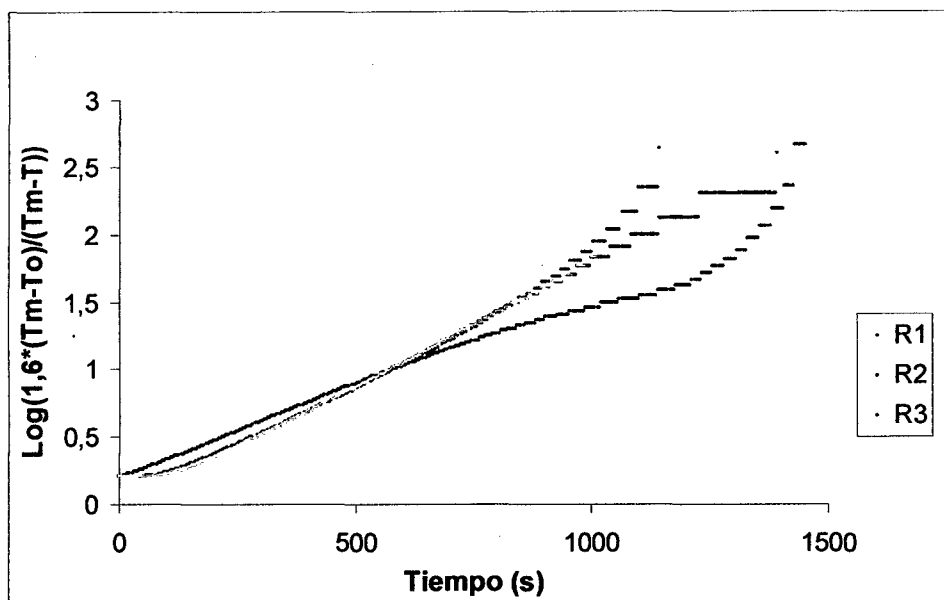


Figura 9. Linealización de los perfiles térmicos correspondientes al tratamiento de 55 °C

c. Difusividad térmica en el tratamiento a 60 °C.

El tratamiento a 60 °C, mostró un promedio de $1,53252 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$, con un mínimo de $1,44237 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$ y un máximo de $1,62266 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$ (Anexo 9). Es importante resaltar que comienza a incrementarse la velocidad de transferencia de calor en la pulpa de Noni, en comparación con los anteriores tratamientos, debido a que la temperatura empieza a elevarse.

En la Figura 10, se grafican las repeticiones del tratamiento, mostrando una correlación entre ellas.

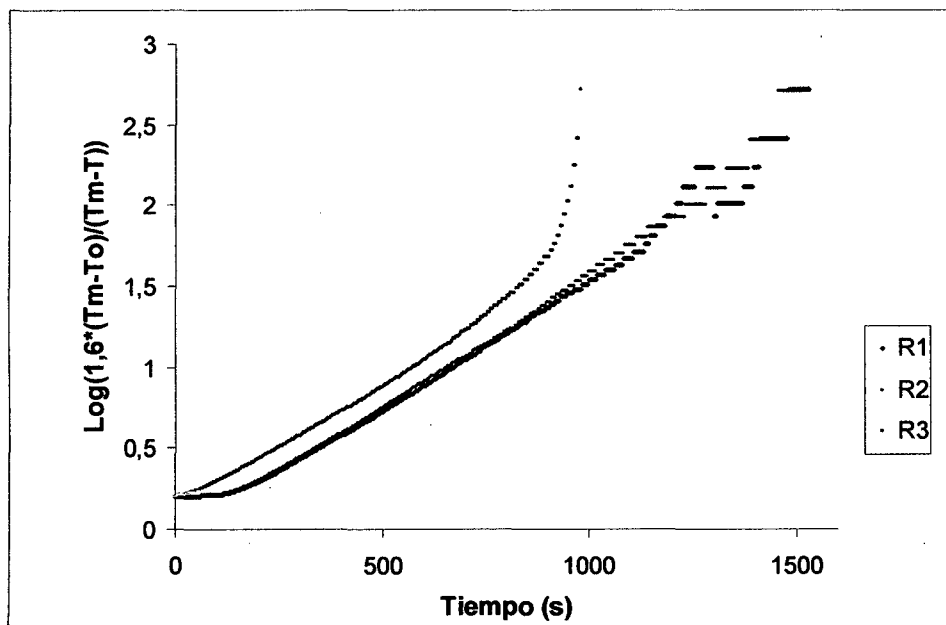


Figura 10. Linealización de los perfiles térmicos correspondientes al tratamiento de 60 °C

d. Difusividad térmica en el tratamiento a 65 °C.

El tratamiento a 65°C, correspondiente a 3 repeticiones, mostró un promedio de $1,59261 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$, con un mínimo de $1,35222 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$ y un máximo de $1,89311 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$ (Anexo 9). El promedio del tratamiento a 65 °C, fue mayor que el promedio del tratamiento a 60 °C, mostrando un aumento de la velocidad de transferencia de calor en la pulpa de Noni.

En la Figura 11, se grafican las repeticiones del tratamiento.

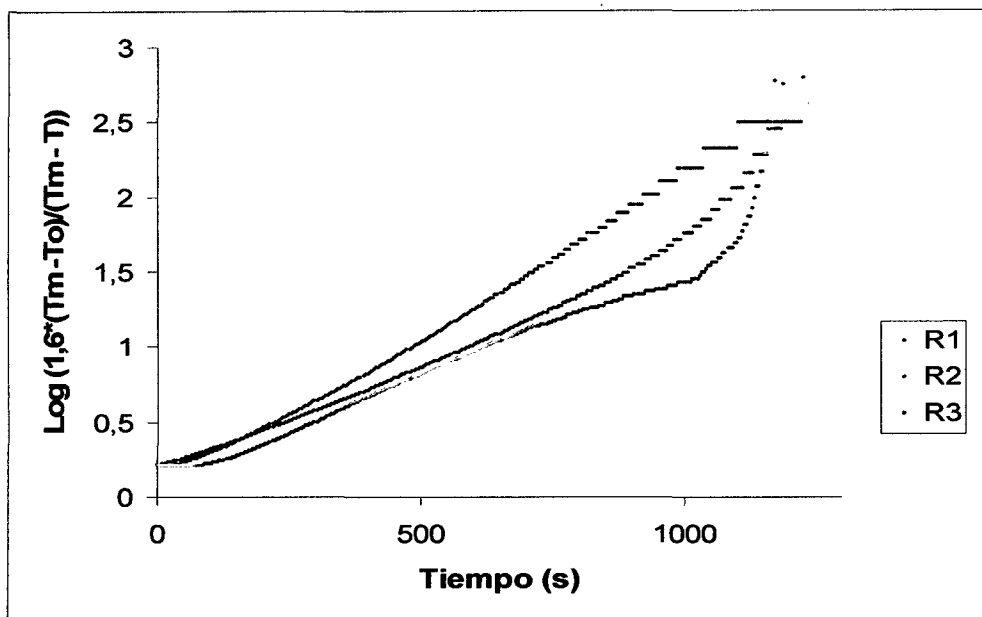


Figura 11. Linealización de los perfiles térmicos correspondientes al tratamiento de 65 °C.

e. Difusividad térmica en el tratamiento a 70 °C.

El tratamiento a 70 °C, se obtuvo un promedio de $1,71281 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$, con un mínimo de $1,44237 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$ y un máximo de $1,89311 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$ (Anexo 9). Es importante resaltar el incremento de la velocidad de transferencia de calor, en la pulpa de Noni frente a las temperaturas anteriores.

En la Figura 12, se grafican las repeticiones del tratamiento, mostrando una buena correlación entre ellas.

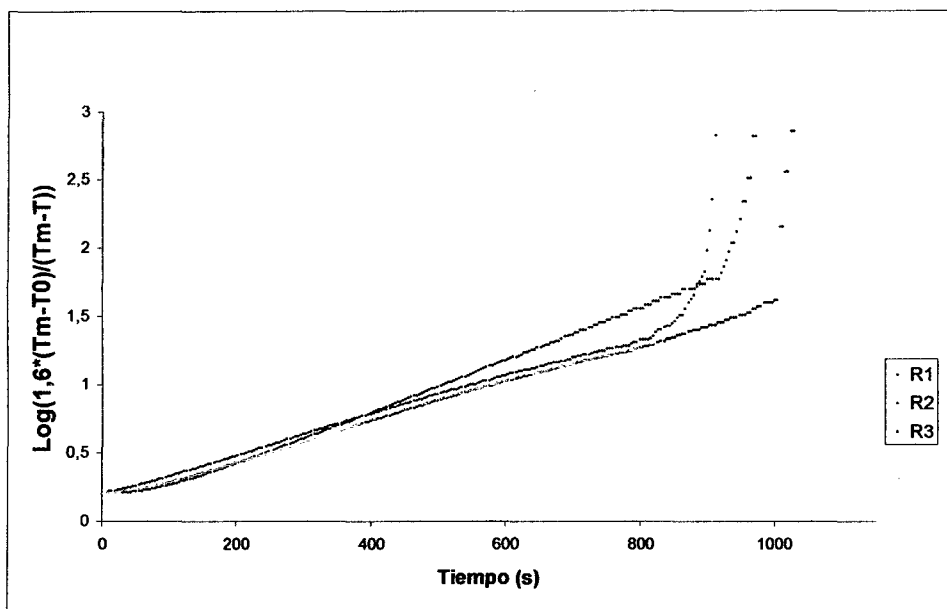


Figura 12. Linealización de los perfiles térmicos correspondientes al tratamiento de 70 °C

f. Difusividad térmica en el tratamiento a 75 °C.

El tratamiento a 75 °C, correspondiente a 3 repeticiones, mostró un promedio de $1,80296 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$, con un mínimo de $1,71281 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$ y un máximo de $1,89311 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$. (Anexo 9). El promedio del tratamiento a 75 °C fue mayor que el promedio del tratamiento a 70 °C, mostrando un aumento de la velocidad de transferencia de calor al aumentar la temperatura en la pulpa de Noni. (Figura 13).

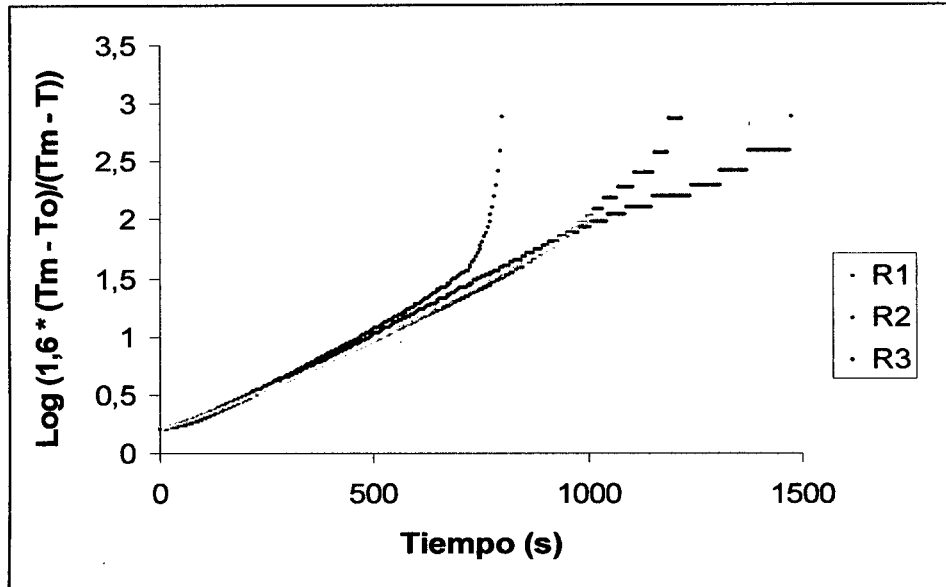


Figura 13. Linealización de los perfiles térmicos correspondientes al tratamiento de 75 °C.

g. Difusividad térmica en el tratamiento a 80 °C.

El tratamiento a 80 °C, en las 3 repeticiones, obtuvo un promedio de $1,83301 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$, con un mínimo de $1,71281 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$ y un máximo de $1,98326 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$ (Anexo 9). Este promedio de difusividad térmica presentó una gran similitud a lo observado a temperaturas de 75°C, lo cual muestra que la velocidad de transferencia de calor permanece casi constante, sin presentar un aumento notorio frente a las temperaturas anteriores.

En la Figura 14, 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 9.

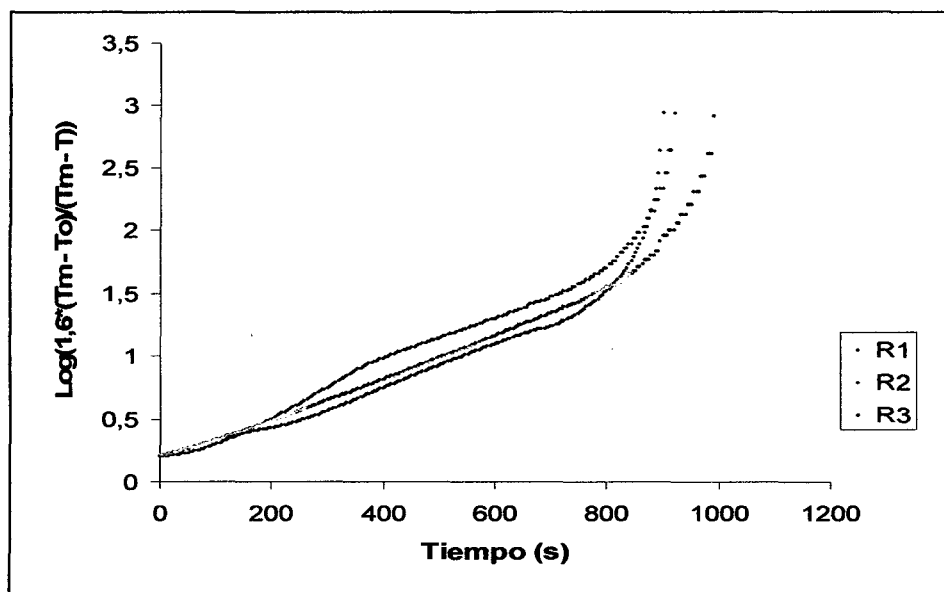


Figura 14. Linealización de los perfiles térmicos correspondientes al tratamiento de 80 °C

En el cuadro 15, se presentan todos los valores promedio de la difusividad térmica obtenidos de las tres repeticiones de todos los tratamientos de la pulpa de Noni. 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 avanza.

Cuadro 15. Valores experimentales de difusividad térmica promedio en Pulpa de Noni.

Tratamiento	Temperatura exterior ° C promedio	Temperatura Centro inicial To ° C	Difusividad térmica Promedio $\times 10^{-7}$ (m ² /s)	Desviación Estándar $\times 10^{-7}$ m ² /s
1	50 ± 0,3	25,4 ± 0,5	1,3822	±0,1
2	55 ± 0,3	27,9 ± 1,8	1,4724	±0,2
3	60 ± 0,4	27,7 ± 0,5	1,5325	±0,09
4	65 ± 0,3	28,4 ± 1,7	1,5926	±0,2
5	70 ± 0,5	27,3 ± 2,2	1,7128	±0,2
6	75 ± 0,2	27,5 ± 0,9	1,8029	±0,09
7	80 ± 0,2	27,3 ± 1,6	1,8330	±0,1

Los valores representan el promedio \pm la desviación estándar de las tres repeticiones.

Al realizar análisis estadísticos (ANVA) se observa que existe diferencia estadísticamente significativa entre los valores de difusividad térmica de los diferentes tratamientos con un porcentaje de confianza del 95 % (Anexo 10).

Según la prueba de Tukey LSD (con un nivel de confianza del 95 %), se detectaron diferencias entre los valores de difusividad térmica (Anexo 11).

Con ello se determina que existe diferencia estadísticamente significativa entre el tratamiento a 50°C frente a los tratamientos de 55, 60, 65, 70, 75 ,80 °C. Esto se ve claramente, dado que los promedios expresados muestran en el tratamiento de 50°C, un rango

$1,3 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$ a diferencia de los otros tratamientos que bordean el rango de $1,4$; $1,5$; $1,7$; $1,8 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$.

En el tratamiento a 55°C se observa una diferencia estadísticamente significativa, frente a los tratamientos de 60 , 65 , $70,75$ y 80°C . Al igual que en el caso anterior este tratamiento presenta un rango diferente de alrededor de $1,4 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$ a diferencia de los tratamientos más drásticos donde los promedios se encuentra en el orden de $1,5 \times 10^{-7}$; $1,7 \times 10^{-7}$ y $1,8 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$.

Asimismo se encontró diferencia estadísticamente significativa de los tratamientos a 60 y 65°C frente a los tratamientos de 70 , 75 y 80°C en estos tratamientos presentan un rango de alrededor de $1,5 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$ a diferencia de los demás tratamientos.

Al igual que los tratamientos anteriores el tratamiento a 70°C tiene una diferencia significativa frente a los tratamientos 75 y 80°C , en este tratamiento se presenta un rango de $1,7 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$

No se encontró diferencia estadísticamente significativa entre los tratamientos a 75 y 80°C , dado que los dos 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, por tanto existirían grupos o rangos de temperaturas bien definidos.

Los grados de aumento, experimentado por la pulpa de Noni en la difusividad térmica, corresponde a alrededor de $1 \times 10^{-8} \text{ m}^2/\text{s}$ y $2 \times 10^{-8} \text{ m}^2/\text{s}$.

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). Con ello se determina que existe diferencia estadísticamente significativa entre los tratamientos.

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 en el cilindro 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 citado por MUÑOZ ,2002) y con ello altera la rapidez de la propagación del calor.

Comparando con los promedios obtenidos en la pasta de Murta realizado por MUÑOZ (2002) (Cuadro 16), que realizó su investigación con el mismo método, la cual inició a una temperatura de 60°C. Se observa que la difusividad térmica a partir de 60°C , esta dentro de los rangos y a la vez es notorio el incremento de la velocidad de transferencia de calor, hay que tener presente que los modelos matemáticos asumen al alimento como un producto homogéneo, la diferencia encontrada frente a estos frutos, pasta de Murta realizada por Muñoz(2002) y el presente trabajo en pulpa de Noni, posiblemente pueda deberse para el caso de la pasta de Murta, que presenta una gran cantidad de semillas, las cuales podrían incidir en la menor propagación del calor, aumentando la resistencia a este y en la pulpa de Noni pueda deberse a que tiene una consistencia un poco viscosa.

Cuadro 16. Comparación de los promedios de las difusividad térmica entre la pasta de Murta (MUÑOZ, 2002) y la pulpa de Noni.

Tratamiento (°C)	Difusividad térmica promedio (m^2/s) de la pasta de murta.	Difusividad térmica promedio (m^2/s) de la pulpa de noni.
60	$1,15 \times 10^{-7}$	$1,53 \times 10^{-7}$
65	$1,15 \times 10^{-7}$	$1,59 \times 10^{-7}$
70	$1,23 \times 10^{-7}$	$1,71 \times 10^{-7}$
75	$1,26 \times 10^{-7}$	$1,80 \times 10^{-7}$
80	$1,34 \times 10^{-7}$	$1,83 \times 10^{-7}$

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 (Jiménez y Kasahara, 1991 citado por COARICONA 2008).

Se observa claramente una dependencia de la difusividad térmica con la humedad, mostrando un aumento de la difusividad térmica a medida que la humedad es mayor, lo mismo fue observado por: Njie *et al.* 1998 en banana y mandioca (Rodríguez, 2001 citado por COARICONA 2008).

Los valores de las difusividades térmicas hallados en la pulpa de Noni son valores semejantes comparados con las difusividades térmicas de las pulpas de frutas, hallados en los datos teóricos, según se muestra en el cuadro 17.

Cuadro 17. Difusividad térmica en diferentes alimentos

Frutos	Humedad (%)	α ($\times 10^{-7}$ m ² /s)	Fuentes
Manzana	86,8	1,30	Alvarado y Aguilera (2001)
Melón	93,7	1,59	Alvarado y Aguilera (2001)
Sandia	92,6	1,37	Alvarado y Aguilera (2001)
Papaya	89,5	1,33	Alvarado y Aguilera (2001)
Tomate	94,9	1,50	Alvarado y Aguilera (2001)
Lima	90,1	1,32	Alvarado y Aguilera (2001)
Ciruela	88,7	1,49	Alvarado y Aguilera (2001)
Plátano	75,2	1,38	Alvarado y Aguilera (2001)
Durazno	87,4	1,57	Alvarado y Aguilera (2001)
Agua	100	1,48	Alvarado y Aguilera (2001)
Fresa	91,8	1,47	Alvarado y Aguilera (2001)
Pulpa			
Noni	91,3	1,38-1,83	Presente trabajo

E. COMPORTAMIENTO DE LA DIFUSIVIDAD TÉRMICA EN LA PULPA DE NONI EN LOS DIFERENTES TRATAMIENTOS

Las experiencias realizadas a diferentes temperaturas de trabajo reflejan un comportamiento diferente a medida que va siendo más drástico el tratamiento térmico, se determinó la difusividad térmica de la pulpa de noni utilizando la ecuación 15. El análisis realizado muestra la variación que experimenta la difusividad térmica en las repeticiones, desde una temperatura inicial hasta alcanzar la temperatura exterior de calentamiento.

En los tratamientos 50, 55, 60, 65,70 °C (Figura 15), la difusividad térmica va en incremento conforme la temperatura de calentamiento va en aumento.

Un caso particular es lo que ocurre en los tratamientos de 75 y 80 °C (Figura 15), donde se aprecia un aumento más drástico y notorio en la difusividad térmica que los tratamientos más bajos no existiendo mucha diferencia entre ellas. La difusividad térmica de la pulpa Noni no presenta una disminución en su valor al aproximarse a la temperatura de trabajo, encontrándose una tendencia a permanecer constante.

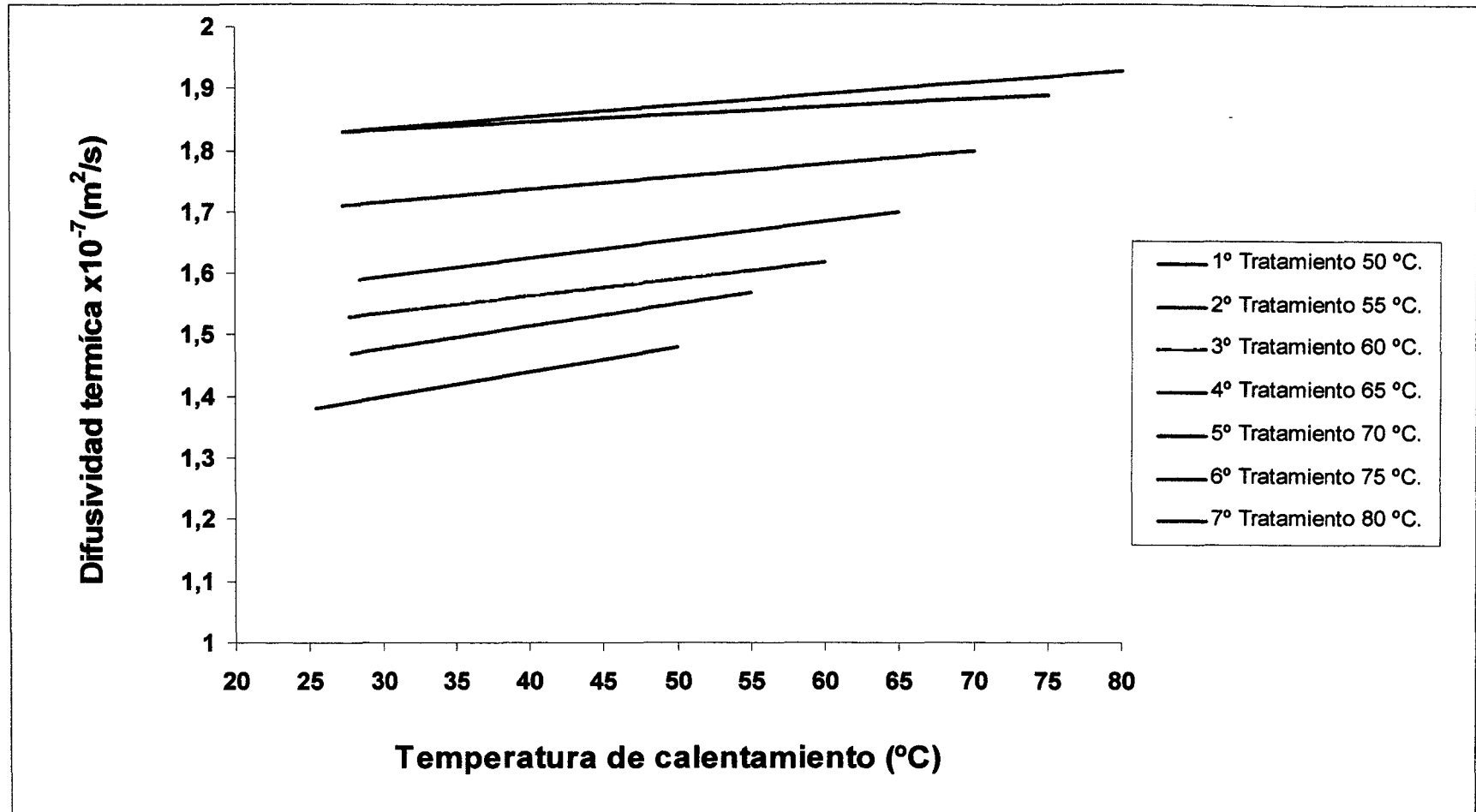


Figura 15. Variación de la difusividad térmica en los 7 tratamientos

Se observa un aumento del valor difusividad en las proximidades de alcanzar la temperatura del medio de calentamiento (temperatura de trabajo), esto puede deberse a que la pulpa de Noni puede sufrir cambios debido posiblemente a una modificación en su estructura (posible ruptura molecular); si se asume una ruptura molecular puede que presente características similares al agua y por ende un incremento en la propagación del calor.

La pulpa de Noni presenta un contenido de agua promedio de $91,3 \pm 0,3$ %. MUÑOZ (2002), señala en su investigación de la pasta de Murta un contenido de agua promedio de $82,3 \pm 1,2$ % y lo más probable es que presente un comportamiento similar al agua.

MUÑOZ (2002), 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, lo mismo sucede en la experiencia con la pulpa de Noni como se puede observar en los promedios de las difusividades en el cuadro 15.

F. DE LA ECUACION DE DIFUSIVIDAD TÉRMICA DE LA PULPA DE NONI

La difusividad térmica determinada, nos muestra una dependencia frente a la temperatura del medio de calentamiento con una temperatura inicial de la

pulpa de $27,3 \pm 1$ °C (Figura 16), la cual está referida a los valores de cada repetición que se describen en el Anexo 9 y posteriormente se extraen los promedios (Cuadro 15).

En la Figura 16, se observa una buena correlación de los promedios de cada tratamiento térmico, tal como se comprobó en el análisis estadístico, los valores promedio obtenidos van aumentando en un rango de 1×10^{-8} m^2/s y 2×10^{-8} m^2/s . Como se ha visto, en el rango de temperaturas de 50 a 80 °C, hay un aumento en la difusividad térmica de la pulpa de Noni, 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 70 °C y valores casi constantes entre las temperaturas de 75 a 80 °C.

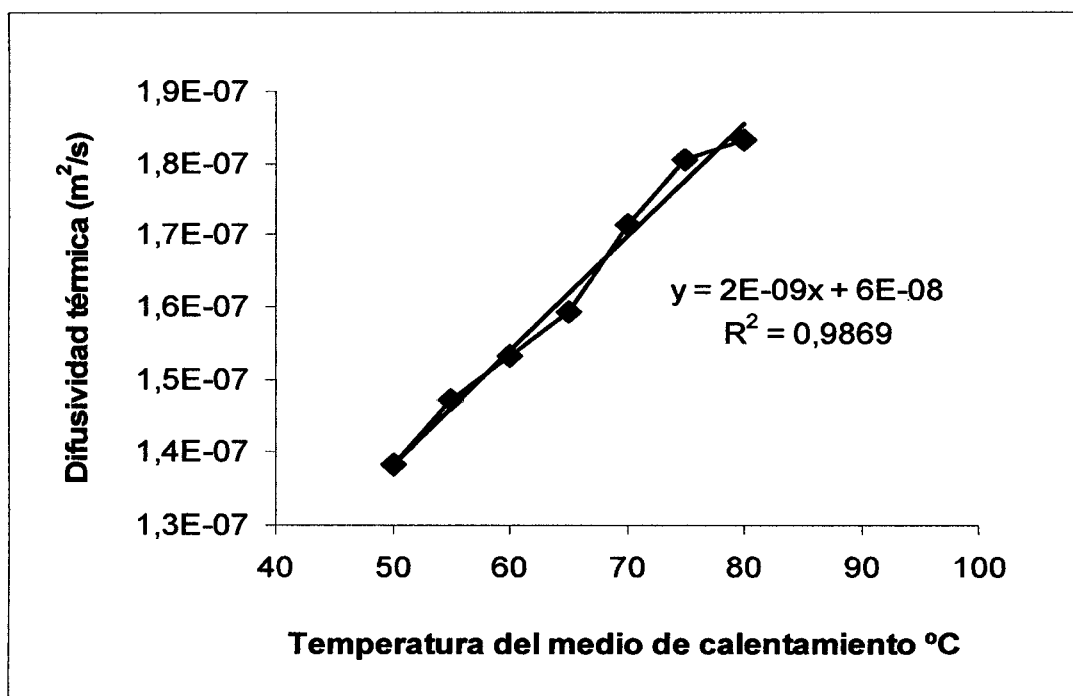


Figura 16. Variación de la difusividad térmica en función de la temperatura.

Para efectos prácticos de trabajo en la pulpa de Noni, es importante rescatar que la transferencia de calor no presenta diferencia en rapidez de calentamiento de 75 a 80 °C, con lo cual para tratamientos de pasteurización de la pulpa de Noni, se puede recomendar trabajar a temperaturas menores o iguales de 80 °C, considerando que se presentaría el mismo efecto con temperaturas más altas y se evitaría un daño innecesario a la pulpa; 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 pulpa de Noni registró un promedio de humedad cercano a 91,3%

Finalmente se encuentra una correlación matemática que muestra el comportamiento de la difusividad térmica frente a la temperatura, en el rango de 50 a 80 °C, obteniendo una ecuación lineal que nos permitiría la determinación de la difusividad térmica de la pulpa de Noni en forma teórica. Esto para condiciones del medio de calentamiento, a temperaturas del agua entre 50-80 °C.

Se simuló datos teóricos de la difusividad térmica con la ecuación de la curva y se compararon con los datos del experimento en el cuadro 18 y Figura 17, existiendo una buena correlación entre ellos.

Según bibliografía, el margen de error debería estar entre $\pm 5\%$ sin embargo, los datos teóricos hallados en la demostración de la simulación están por debajo del 2%.

Por consiguiente, se propone la ecuación polinómica obtenida para predecir la difusividad térmica en la pulpa de Noni y productos similares.

$$Y = 1,567 * 10^{-9} X + 5,999 * 10^{-8} \dots\dots\dots (22)$$

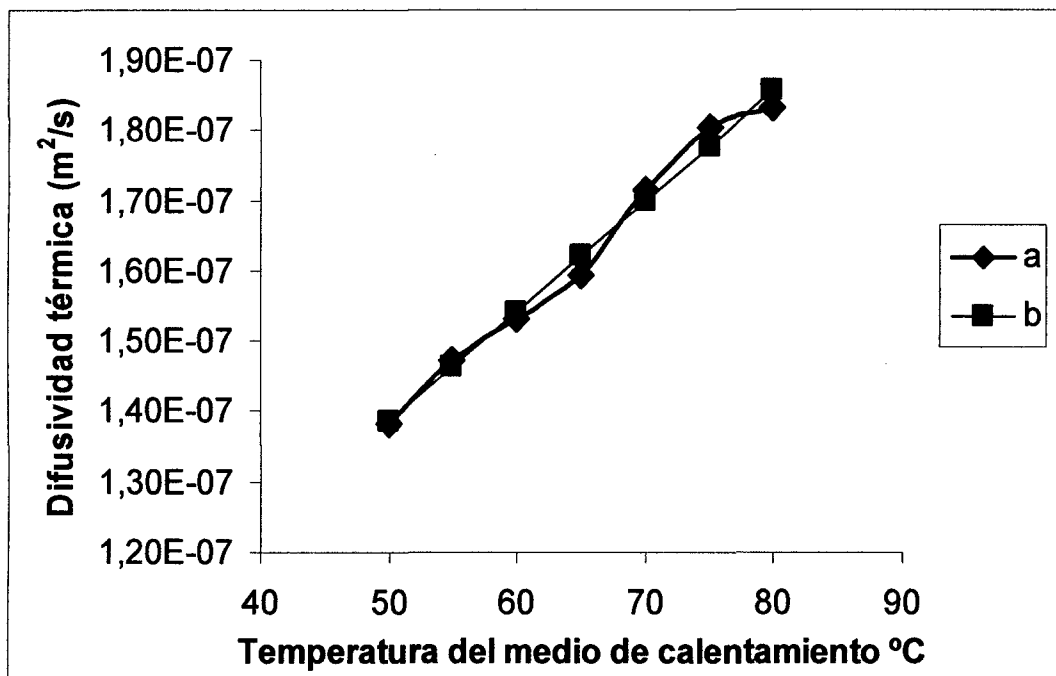
Donde:

Y: Difusividad térmica calculada (m^2/s)

X: Temperatura del medio de calentamiento $^{\circ}C$.

Cuadro 18. Valores hallados en la simulación de la difusividad térmica de la pulpa de Noni.

Ecuación (línea de tendencia)	$Y = 1,567 * 10^{-9} X + 5,999 * 10^{-8}$			
Pendiente de la curva	$1,567 \times 10^{-9}$			
Intersección	$5,999 \times 10^{-8}$			
Temperaturas $^{\circ}C$	α experimental $*10^{-7} (m^2/s)$	α teórico $* 10^{-7} (m^2/s)$	% de error	% de error absoluto ($\pm 5\%$)
50	1,382	1,385	0,19032	-0,19032
55	1,472	1,463	0,61241	-0,61241
60	1,533	1,542	0,61233	-0,61233
65	1,592	1,620	1,74464	-1,74464
70	1,712	1,698	0,81222	-0,81222
75	1,803	1,777	1,41766	-1,41766
80	1,833	1,855	1,24880	-1,24880



Donde: a = difusividades térmicas experimentales; b= difusividades térmicas teóricas

Figura 17. Comparación de difusividades térmicas con muestras experimentales y el teórico hallado.

V. CONCLUSIONES

1. Se determinó la difusividad térmica de la pulpa de Noni a diferentes temperaturas las cuales presentan en promedio para : 50 °C, un valor de $1,38 \pm 0,1 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$; 55 °C, un valor de $1,47 \pm 0,2 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$; 60 °C, un valor de $1,53 \pm 0,09 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$; 65°C un valor de $1,59 \pm 0,2 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$; 70°C un valor de $1,71 \pm 0,2 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$; a 75°C un valor de $1,80 \pm 0,09 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$ y a 80°C un valor de $1,83 \pm 0,1 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$. Se observa que en casi todos los tratamientos existen diferencias en las velocidades de transferencia de calor a medida que la temperatura del medio aumenta.
2. Se determinó la ecuación polinómica obtenida para predecir la difusividad térmica (Y) en la pulpa de Noni en función a la temperatura (X), la cual se muestra en la siguiente ecuación:

$$Y = 1,567 * 10^{-9} X + 5,999 * 10^{-8}$$

Donde:

Y: Difusividad térmica calculada (m^2/s)

X: Temperatura del medio de calentamiento °C.

VI. RECOMENDACIONES

- 1. Continuar con la investigación para determinar las propiedades termofísicas de la pulpa de Noni, tales como la conductividad térmica, calor específico, ya que hoy en día este fruto es importante por sus propiedades curativas, y su industrialización requiere conocer estas propiedades.**
- 2. Realizar estudios preliminares de factibilidad de la aplicación del presente trabajo en el diseño de maquinarias y procesos para una producción industrial de bebidas con el Noni.**
- 3. Realizar estudios de investigación de difusividad térmica de diferentes frutos amazónicos, ya que es muy importante conocer esta propiedad termofísica para una producción a escala industrial.**

SUMMARY

This research carried out by applying experimental procedures and the methodology used by Dickerson in 1965 and amended by Poulsen (1982), sought to determine the thermal diffusivity in the pulp of Noni (*Morinda citrifolia*, L) in a temperature range 50 to 80 ° C., based on designs presented in literature, the team was built to measure thermal diffusivity. The humidity of the Noni pulp obtained had an average of 91,3% with a standard deviation $\pm 0,3\%$, in terms of density and soluble solids showed no statistically significant difference, indicating that the variation which correspond to a variation characteristic of natural products. Density had a mean value of 1,001 $\pm 0,03$ g / mL soluble solids, 8.6 °Brix with a standard deviation of $\pm 0,7$ °Brix.

Noni pulp diffusivity presents averages 50 ° C, a value of $1,38 \pm 0,1 \times 10^{-7} \text{ m}^2 / \text{s}$, 55 ° C, a value of $1,47 \pm 0,2 \times 10^{-7} \text{ m}^2 / \text{s}$, 60 ° C, a value of $1,53 \pm 0,09 \times 10^{-7} \text{ m}^2 / \text{s}$, 65 ° C a value of $1,59 \pm 0,2 \times 10^{-7} \text{ m}^2 / \text{s}$ and 70 ° C a value of $1,71 \pm 0,2 \times 10^{-7} \text{ m}^2 / \text{s}$, 75 ° C a value of $1,80 \pm 0,09 \times 10^{-7} \text{ m}^2 / \text{s}$ and 80 ° C a value of $1,83 \pm 0,1 \times 10^{-7} \text{ m}^2 / \text{s}$, difference between the values of thermal diffusivity, Finally there is a mathematical relationship with which to interpolate a value of thermal diffusivity (Y) for a range of work from 50 to 80 ° C. (X), given as follows:

$$Y = 1,567 * 10^{-9} X + 5,999 * 10^{-8}$$

VII. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.

- ALVARADO, J; AGUILERA, J.M. 2001. Métodos para medir propiedades físicas en industrias de alimentos. Editorial Acribia S.A .Zaragoza – España.
- ALLEN P.; MOSCA G.2006.Física para la ciencia y la tecnología. Editorial Reverte S. A. Barcelona-España. 656 p.
- A.O.A.C. 1995.Official Methods of Análisis of the Association of Official agricultural. Chemistry. Washington. U.S.A.
- A.O.A.C. 1997.Official Methods of Análisis of the Association of Official agricultural. Chemistry. Washington. U.S.A.
- ARCOS, E.2007. Análisis de la Transferencia de Calor en un Conductor Eléctrico Usando Métodos Asintóticos. Instituto Politécnico Nacional
- BETANCOURT, R. 2003. Transferencia molecular de calor, masa y/o cantidad de movimiento. Publicado por Unibiblos - U. Nal. Colombia.438 p.México DF. 3 p.
- BLEINROTH, E. W.; MONTERO, 3.M.; GAZETA; VIDIGAL, J.; SPAGNO, N. Y NIEVES, L. C. 1993.Curso internacional de poscosecha de hortalizas .UNAS. Tingo María-Perú. pp. 1 – 17.
- BURBANO, S.; BURBANO, E.; MUÑOZ, C.2003. Física general. Editorial Tebar. Madrid. España. 800 p.

- CASTILLO M.; ROJAS, P. 2005."Determinación De Las Propiedades Físicas En Zumos Y Néctares Empleando Un Programa Visual Basic". Universidad Del Santa – Chimbote-Perú .pp 64.
- CHAN, Y.; VAILLANT, F.; PÉREZ, A.;BRAT, P. 2007. Marketing opportunities for agriculture and forestry products in the greater Caribbean - a challenge for the 21st century. San Juan. Caribbean food crops society, p. 151. Annual meeting Caribbean food crops society. 43. San José, Costa Rica.
- COARICONA, F.1998.Simulación del comportamiento de la difusividad térmica del masato (masa de yuca fermentada diluida), en función al porcentaje de humedad. Tesis Universidad Nacional Agraria De La Selva. Tingo Maria. Perú
- DAMASO, A. (2005). Influencia de la temperatura, insolación y la precipitación sobre los sólidos solubles de frutos tropicales .Instituto de la UNA-Venezuela.
- DÍAZ HERNÁNDEZ M.; 2006.Física 3.Editorial Umbral .Zapopan, Jalisco-México. 38p.
- DICKERSON, R.; W. y READ, R. 1968. Calculation and measurement of heat transfer in foods. Food Tech. 22 (12): 92-105.
- DIXON, A; MCMILLEN, H; ELKIN, N.1999.Ferment this transformation of Noni traditional polynesian medicine. Economic Botany 53 (1):51-68p.
- ESPULGAS, S.; CHAMARRO, E. 2005. Fundamentos de transmisión de calor. Edición Universitat Barcelona.159 p.
- ELKINS, R; M.H.1997. NONI (Morinda citrifolia) La Hierba Preciada del Pacífico del Sur .Woodland Publishing.Health Series .31p

- FENNEMA O.; KAREL, M.; LUND, D. 1981. Introducción a la Ciencia de los Alimentos. Editorial Reverte S. A. Barcelona - España. 474 p.
- FELLOWS, P. 1988. Food processing thecnology: principles and practice. Ellis Horwood. Chinchester, 505 p.
- GABAS, A.L., MARRA-JUNIOR, W.D., TELIS-ROMERO, J., TELIS, V.R.N. 2005. Changes of Density, Thermal Conductivity, Thermal Diffusivity, and Specific Heat of Plums during Drying. International Journal of Food Properties 8:233 -242.
- GALLARDO, A. 2004. Validación Experimental de un Software Asistido por Internet para Describir el Proceso Combinado Escaldado - Hidroenfriado en Floretes de Brócoli (*Brassica oleracea* L. var *italica*). Universidad Austral De Chile. Valdivia – Chile. 12-20 p.
- GONZALES, A. 2003. NONI (*Morinda citrifolia*). Website:
<http://www.herbalsafety.utep.edu>.
- HART; FISCHER, H., J. 1994. Análisis moderno de los alimentos. Ed. Acribia. Zaragoza. España. 619p.
- IBARZ, A.; BARBOSA, G.; GARZA, S. 2000. Métodos Experimentales en la Ingeniería Alimentaria. Editorial Acribia S. A. Zaragoza - España. 250 p
- IBARZ, A.; BARBOSA – CANOVAS, G. 1999. Operaciones unitarias en la Ingeniería de Alimentos. Technomic Publihing Company, INC. Pennsylvania, USA. 880p.
- INCROPERA, F.; DE WITT, D.; CRUZ ,R. 1999. Fundamentos de Transferencia de calor. Editorial Pearson. España .886 p.

INSTITUTO NACIONAL DE ALIMENTOS Y NUTRICION.1996.Tablas peruanas de composición de alimentos. Lima -Perú.

JIMÉNEZ H. V. (2003), Elaboración de cuatro productos naturales a partir del Noni. Universidad de Earth .Costa Rica. 39 p.

ORTEGA, W. 1974.Estudios de la Extracción y almacenaje de la pulpa de taperiba (*Spondias cytherea sonn*). Tesis. Universidad Nacional Agraria la Molina. Lima – Perú.

PARRA, L.2006. Cultivo del Noni .Ed. Hispanoamericana México.

RAYMOND, S.; FAUGHN, J.; ESCALONA Y GARCÍA H, F. 2001. Física. Editorial Pearson. España. 350 p.

REPO R.; ENCINA C., 2008. Determinación de la capacidad antioxidante y compuestos bioactivos de frutas nativas peruanas. Universidad Nacional Agraria La Molina. Lima. Perú.

REYES, G. 2007. Caracterización fisicoquímica y reológica de la pulpa de Noni y Guanabana y su aplicación en néctar. Informe. Universidad Nacional Agraria De La Selva. Tingo Maria – Perú.

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 p

SINGH, P.; HELDMAN, D., 1998. Introducción a la Ingeniería de los Alimentos. Editorial Acribia, S.A. Zaragoza. España. 544p.

Mc CABE, W.; SMITH, R.; HARRIOT, P. 1991. Operaciones básicas de Ingeniería Química. Mc Graw-Hill, Inc. Madrid. España. 1112p.

MORAN .J.; SHAPIRO .N.2004. Fundamentos de termodinámica técnica.
Editorial Reverte. Barcelona. España. 872 p.

MOHSEIN, N., 1980. Thermal Properties of Food and Agricultural materials.
Gordon and Breach Science publishers, INC. N.Y. USA. 407 p.

MUÑOZ, V. 2002. Determinación de la difusividad térmica en Pasta de Murta
(*Ugni molinae Turcz*), en función de la temperatura. Tesis de Licenciado
en Ingeniería en Alimentos. Valdivia, Chile. Universidad Austral de Chile.
102 pp.

TSCHUBIK, I. A., MASLOW, A.M., 1973. Warmephysikalische Konstanten von
Lebensmitteln und Halbfabrikaten. VEB Fachbuchverlag Leipzig.176p.

WILSON, J.; BUFFA, A., 2003. Física . Editorial Pearson. España. 842p.

ZIEGLER, G.; RIZVI, S., 1985. Thermal Conductivity of Liquid Foods by the
Thermal Comparator Method. J. Food Sc. 50: 1458 -1461.

ANEXO

Anexo 1 .Contenido de humedad en la pulpa de Noni en tres repeticiones

Tratamiento (°C)	Repetición	Humedad (%)	Promedio
50	1	91,1959	90,45%
	2	90,1456	
	3	90,0141	
55	1	90,6786	90,03%
	2	89,9004	
	3	89,5239	
60	1	91,6028	90,97%
	2	90,6339	
	3	90,6851	
65	1	91,0845	90,77%
	2	90,9396	
	3	90,3020	
70	1	90,1167	89,98%
	2	89,6306	
	3	90,2119	
75	1	91,6508	91,30%
	2	91,1146	
	3	91,1642	
80	1	89,3588	89,70%
	2	89,7427	
	3	90,0141	

Anexo 2. Análisis de varianza para la Humedad

Fuentes de Variación (F.V.)	Grados de Libertad (G.L.)	Suma de Cuadrados (S.C.)	Cuadrados Medios (C.M.)	F₀
Tratamientos	6	6,18318778	1,0305313	4,71413608
Error	14	3,06046281	0,21860449	
Total	20	9,24365059		

Valor de $P > 0,05$ existe diferencia altamente significativa con un nivel de confianza de 95 %.

Anexo 3. Densidad de la pulpa de Noni en tres repeticiones

Tratamiento (°C)	Repeticón	Densidad (g/mL)	Promedio (g/mL)
50	1	1,0355	1,001
	2	0,9897	
	3	0,9788	
55	1	0,9882	1,001
	2	0,9769	
	3	1,0388	
60	1	1,0204	1,005
	2	1,0233	
	3	0,9697	
65	1	1,0194	1,005
	2	1,0174	
	3	0,9794	
70	1	1,0332	1,003
	2	0,9542	
	3	1,0203	
75	1	0,993	1,021
	2	1,0293	
	3	1,0251	
80	1	0,9850	0,982
	2	1,0265	
	3	0,9352	

Anexo 4. Análisis de varianza para Densidad

Fuentes de Variación (F.V.)	Grados de Libertad (G.L.)	Suma de Cuadrados (S.C.)	Cuadrados Medios (C.M.)	F₀
Tratamientos	6	0,00180151	0,00030025	0,27325451
Error	14	0,0153832	0,0010988	
Total	20	0,01718471		

Valor de $P > 0,05$ existe diferencia altamente significativa con un nivel de confianza de 95 %.

Anexo 5. Análisis de varianza para los sólidos solubles

Fuentes de Variación (F.V.)	Grados de Libertad (G.L.)	Suma de Cuadrados (S.C.)	Cuadrados Medios (C.M.)	F₀
Tratamientos	6	12,1207143	2,02011905	1,25278701
Error	14	22,575	1,6125	
Total	20	34,6957143		

Valor de $P > 0,05$ existe diferencia altamente significativa con un nivel de confianza de 95 %.

Anexo 6. Sólidos solubles de la pulpa de Noni en tres repeticiones

Tratamiento (°C)	Repetición	°Brix	Promedio
50	1	9,6	7,7
	2	7,6	
	3	6	
55	1	9,75	8,3
	2	7	
	3	8,4	
60	1	9,3	8,6
	2	8	
	3	8,5	
65	1	9	9,1
	2	8,5	
	3	10	
70	1	9,2	9,7
	2	10,5	
	3	9,5	
75	1	11	9,7
	2	9	
	3	9,3	
80	1	12	9,8
	2	8,5	
	3	9,1	

Anexo 7. Valores de difusividad térmica para las soluciones de sacarosa

Tratamiento		Repetición	Difusividad Térmicas $\times 10^{-7}$ (m ² /s)	Difusividad Térmica Promedio $\times 10^{-7}$ (m ² /s)
Concentración	Temperatura			
60 °Brix	50 °C	1	2,05	1,91
		2	2,10	
		3	2,00	
	60 °C	1	2,14	2,11
		2	2,18	
		3	2,27	
	70 °C	1	2,31	2,44
		2	2,65	
		3	2,79	
70 °Brix	50 °C	1	1,70	1,79
		2	1,92	
		3	1,74	
	60 °C	1	2,31	2,07
		2	2,05	
		3	1,83	
	70 °C	1	2,43	2,34
		2	2,25	
		3	2,10	

Anexo 8. Análisis de varianza para las experiencias en soluciones de sacarosa.

Fuente de variación	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrado medio	Calculo de F
Entre tratamientos	5,92024E-16	1	5,92024E-16	2,191131238
Dentro de los tratamientos	7,49235E-15	2	3,74618E-15	13,86491622
Interacción	1,64701E-16	2	8,23507E-17	0,304786989
Error	3,24229E-15	12	2,70191E-16	
TOTAL	1,14914E-14	17	6,75963E-16	

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

Anexo 9. Valores de difusividad térmica para todas las repeticiones en la Pulpa de Noni.

Repetición	DIFUSIVIDAD TERMICA x 10⁻⁷ (m²/s)						
	Tratamiento (°C)						
	50	55	60	65	70	75	80
1	1,26207	1,17192	1,44237	1,53252	1,44237	1,53252	1,71281
2	1,53252	1,71281	1,53252	1,89311	1,80296	1,98326	1,98326
3	1,35222	1,53252	1,62266	1,35222	1,89311	1,80296	1,80296

Anexo 10. Análisis de varianza para todos los tratamientos térmicos de la Pulpa de Noni

Fuentes de				
Variación	Grados de	Suma de	Cuadrados	
(F.V)	Libertad (G.L.)	Cuadrados(S.C.)	Medios(C.M.)	F₀
Tratamientos	6	4,91469E-15	8,1912E-16	1,873156342
Error	14	6,12208E-15	4,3729E-16	
Total	20	1,10368E-14		

Valor de P > 0.05 existe diferencia significativa con un nivel de confianza de 95%

Anexo 11. Prueba de rango múltiple Tukey LSD para valores de difusividad térmica de la pulpa de Noni.

COMPARACION MULTIPLE DE DIFUSIVIDAD EN FUNCION A LA TEMPERATURA			
METODO:95% LSD			
Tratamientos	Cuenta	LS media	Grupos homogéneos
1	3	1,38227 x10 ⁻⁷	a
2	3	1,47242 x10 ⁻⁷	b
3	3	1,53252 x10 ⁻⁷	c
4	3	1,59261 x10 ⁻⁷	d
5	3	1,71281 x10 ⁻⁷	e
6	3	1,80296 x10 ⁻⁷	f
7	3	1,83301 x10 ⁻⁷	g