

UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA DE LA SELVA
FACULTAD DE INGENIERIA EN INDUSTRIAS ALIMENTARIAS

DEPARTAMENTO ACADÉMICO DE CIENCIA, TECNOLOGÍA E INGENIERÍA DE
ALIMENTOS



**“SIMULACIÓN DEL COMPORTAMIENTO DE LA DIFUSIVIDAD
TÉRMICA DEL MASATO (MASA DE YUCA FERMENTADA
DILUIDA), EN FUNCIÓN AL PORCENTAJE DE HUMEDAD”**

TESIS

Para optar el título de:

INGENIERO EN INDUSTRIAS ALIMENTARIAS

Presentado por:

FELIX YUBANI COARICONA CHURA

PROMOCIÓN 2006 – II

Tingo María – Perú

2008

Q02

C65

Coaricona Chura, Felix Y.

Simulación del Comportamiento de la Difusividad Térmica del Masato (Masa de Yuca Fermentada Diluida), en Función al Porcentaje de Humedad. Tingo María, 2008

85 h.; 10 cuadros; 23 fgrs.; 43 ref.; 30 cm.

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

DIFUSIVIDAD TÉRMICA / MASA-YUCA / FERMENTACIÓN / HUMEDAD
/ TRANSFERENCIA - CALOR / METODOLOGÍA EXPERIMENTAL / 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 19 de diciembre de 2008, a horas 4:00 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 el Bach. **Félix Yubani COARIGONA CHURA**, titulado:

“SIMULACIÓN DEL COMPORTAMIENTO DE LA DIFUSIVIDAD TÉRMICA DEL MASATO (MASA DE YUCA FERMENTADA DILUIDA), EN FUNCIÓN AL PORCENTAJE DE HUMEDAD”.

Después de haber escuchado la sustentación, las respuestas a las preguntas formuladas, lo declaran aprobado con el calificativo de **Buono**, 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, 23 de diciembre de 2008

.....
Ing. MSc. Washington Paredes Pereda
Presidente

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

.....
Ing. Raída L. Matos Bustamante
Miembro

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

"Intenta no volverte un hombre de éxito, sino volverte un hombre de valor" (Albert Einstein).

"No hay que confundir nunca el conocimiento con la sabiduría. El primero nos sirve para ganarnos la vida; la sabiduría nos ayuda a vivir"
(Sorcha Carey).

DEDICATORIA

**A las personas más valiosas de mi vida, con todo el amor del mundo
para mis hermanas: Nancy y Vilma; para mi cuñado: Julio y mi
sobrina: Yameli**

**A mis padres: Felipe y Santusa; a mis tíos: Asencio y Josefa; a
mi primo: Víctor por su gran apoyo y sacrificio
para el logro de mi formación profesional.**

AGRADECIMIENTO

A mis padres, hermanas(os), tíos(as) y familiares por su dedicación y apoyo durante la realización de este trabajo y a lo largo de toda mi vida.

Al los ingenieros: Williams Roldan Carbajal, asesor y Caleb Leandro Laguna, co-asesor, por sus enseñanzas, 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: E. Ordoñez, F. Mamani (Q.E.P.D.), J. Vargas, M. Alcedo, Y. Ramírez; W. Paredes, R. Matos, P. Peláez, J. Castro, E. Cáceres, A. Carmona, M. Follegatti, A. Ortega, L. Zavaleta, R. Natividad, G. Daza, J. Basilio, entre otros.

A los compañeros de estudio y amigos: Luis, Justo, Oscar, Joel, Litman, David, Heber, Karen, Daniza, Merli, Helmut, Marcos, Madeline, Elaine, Manuel, Víctor, Marielena, José, Rossana 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, por su gran ayuda en esos pequeños, pero importantes detalles que facilitaron el trabajo en los diversos laboratorios y planta piloto.

ÍNDICE

I. INTRODUCCIÓN.....	1
II. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA.....	3
A. TRANSFERENCIA DE CALOR.....	3
1. Mecanismos de transferencia de calor.....	3
B. FLUJO DE CALOR EN ESTADO NO ESTACIONARIO.....	8
C. PROPIEDADES TERMOFÍSICAS.....	14
1. Conductividad térmica.....	17
2. Difusividad térmica.....	20
3. Calor específico.....	22
D. CARACTERÍSTICAS GENERALES DE LA YUCA.....	24
1. Taxonomía.....	25
2. Morfología.....	26
3. Composición química de la yuca (raíz entera).....	26
E. CARACTERÍSTICAS GENERALES DE LA MASA DE YUCA FERMENTADA (MASATO).....	26
F. LA SIMULACION.....	29
1. Definición.....	30
2. Ventajas de la simulación.....	30
3. Pasos a seguir para una simulación.....	31
III. MATERIALES Y MÉTODOS.....	33
A. LUGAR DE EJECUCIÓN.....	33
B. MATERIA PRIMA.....	33
C. EQUIPOS, MATERIALES, REACTIVOS E INSTRUMENTOS.....	33
1. Para la determinación de la difusividad térmica.....	33
2. Para la determinación de la composición química.....	34

3. Para el análisis fisicoquímico.....	36
D. DISEÑO Y VALIDACION DEL EQUIPO (Difusor Térmico)	36
E. ELABORACION DE LA MASA DE YUCA FERMENTADA.....	39
F. MÉTODOS DE ANÁLISIS EN LA MASA DE YUCA FERMENTADA	41
1. Evaluación química proximal.....	41
2. Evaluación fisicoquímico	41
G. METODOLOGÍA EXPERIMENTAL PARA LA DETERMINACIÓN DE LA DIFUSIVIDAD TÉRMICA.....	42
IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	46
A. VALIDACION DEL DIFUSOR TERMICO	46
1. Validación del incremento de la temperatura con el tiempo	46
2. Validación de la difusividad térmica en solución de sacarosa	47
B. MASA DE YUCA FERMENTADA.....	48
C. CARACTERISTICAS DE LA MASA DE YUCA FERMENTADA	48
1. Composición química de la masa de yuca fermentada	48
2. Análisis Fisicoquímico	52
D. DIFUSIVIDAD TÉRMICA DE LA MASA DE YUCA FERMENTADA.....	54
1. Pruebas preliminares.....	54
2. Difusividad térmica en la masa de yuca fermentada en los diferentes tratamientos	54
3. Comportamiento de la difusividad térmica frente a las variaciones de humedad.....	63
4. Simulación de la difusividad térmica del masato (masa de yuca fermentada diluida).	67
V. CONCLUSIONES	71
VI. RECOMENDACIONES.....	73
VII. BIBLIOGRAFÍA.....	74

ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro	Descripción	Página
1.	Valores de las variables B_n y $J_1(B_n)$	12
2.	Difusividad térmica de algunos frutos y vegetales.....	23
3.	Composición química de la yuca.....	27
4.	Preparación de las muestras para la determinación de la difusividad térmica de la masa de yuca fermentada.....	39
5.	Comparación de valores de mediciones experimentales y de literatura para difusividad térmica en soluciones de sacarosa.....	47
6.	Composición química proximal de la masa de yuca fermentada.....	48
7.	Análisis fisicoquímico de la masa de yuca fermentada.....	53
8.	Valores experimentales de difusividad térmica promedio en la masa de yuca fermentada.....	61
9.	Comparación de valores de difusividad térmica de la masa de yuca fermentada con pulpas de frutas diversas.....	62
10.	Valores hallados en la simulación de la difusividad térmica del masato.....	70

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura	Descripción	Página
1.	Equipo utilizado para la obtención del perfil térmico.....	37
2.	Dimensiones del tubo de acero inoxidable utilizado.....	38
3.	Flujograma para el procesamiento de la masa de yuca fermentada.....	40
4.	Diseño experimental para la determinación de la difusividad térmica de la masa de yuca fermentada.....	43
5.	Diagrama de flujo del modelo de simulación seguida.....	45
6.	Validación del incremento de la temperatura con el tiempo (primera prueba con 13 L).....	46
7.	Validación del incremento de la temperatura con el tiempo (segunda prueba con 13 L).....	46
8.	Balance de materia de la masa de yuca fermentada en la primera elaboración.....	49
9.	Balance de materia de la masa de yuca fermentada, (Muestra para la simulación).....	50
10.	Humedades de las muestras utilizadas en los diversos tratamientos.....	52
11.	Difusividades de los tratamientos a 74,36% de humedad.....	55
12.	Difusividades de los tratamientos a 77,5% de humedad.....	55
13.	Difusividades de los tratamientos a 80% de humedad.....	56
14.	Difusividades de los tratamientos a 82,5% de humedad.....	57
15.	Difusividades de los tratamientos a 85% de humedad.....	57
16.	Difusividades de los tratamientos a 87,5% de humedad.....	58
17.	Difusividades de los tratamientos a 90% de humedad.....	59

18.	Difusividades de los tratamientos a 92,5% de humedad.....	59
19.	Difusividades de los tratamientos a 95% de humedad.....	60
20.	Comparación de las repeticiones en la determinación de la difusividad térmica.....	63
21.	Promedios de la difusividad térmica en función de la humedad del masato.....	65
22.	Promedios de la difusividad térmica en función de la humedad para determinar la ecuación.....	67
23.	Comparación de los promedios de la difusividad térmica las 2 muestras experimentales y el teórico hallado.....	68

RESUMEN

La investigación tuvo como fin, mediante la metodología utilizada en 1965 por Dickerson, determinar la difusividad térmica del masato (masa de yuca fermentada diluida) en un rango de humedades de 74,36 a 95 %. Para ello se construyó, basándose en diseños presentados en bibliografía, el equipo para medir la difusividad térmica.

La humedad de la masa de yuca fermentada obtenida, tuvo un valor promedio de 74,36% con desviación estándar de $\pm 0,19\%$. La densidad y sólidos solubles no presentaron diferencia estadísticamente significativa, lo cual indica que la variación que presentan correspondería a una variación propia de productos naturales. La densidad tuvo un valor promedio de $1,07387 \pm 0,001$ g/ml; Sólidos solubles, $21,83^\circ$ Brix con desviación estándar de $\pm 0,7638^\circ$ Brix.

El masato presenta valores promedio de difusividad: para 74,36% de humedad, $1,31 \times 10^{-7}$ m²/s; para 77,5% de humedad, $1,33 \times 10^{-7}$ m²/s; para 80% de humedad, $1,35 \times 10^{-7}$ m²/s; para 82,5% de humedad, $1,36 \times 10^{-7}$ m²/s; para 85% de humedad, $1,38 \times 10^{-7}$ m²/s; para 87,5% de humedad, $1,40 \times 10^{-7}$ m²/s; para 90% de humedad, $1,42 \times 10^{-7}$ m²/s; para 92,5% de humedad, $1,43 \times 10^{-7}$ m²/s; para 95% de humedad, $1,48 \times 10^{-7}$ m²/s, detectándose diferencias entre los valores de difusividad térmica,

De acuerdo al proceso de simulación seguido, se propone la ecuación polinómica para predecir la difusividad térmica (Y) en la masa de yuca fermentada en función a la humedad (X):

$$Y = 7,44556 \times 10^{-8}X + 7,51722 \times 10^{-8}$$

I. INTRODUCCIÓN

La transferencia de calor es una operación unitaria muy importante en la industria de alimentos; prácticamente en todos los procesos que involucra alimentos ocurre una entrada o una remoción de calor, que tiene como consecuencia la modificación de características físicas, químicas y de almacenamiento del alimento. Los datos característicos de cada materia prima también permiten conocer las relaciones tiempo-temperatura necesarias para alcanzar la temperatura deseada en el proceso, sea de cocción o enfriamiento.

Para manejar sistemáticamente la transferencia de calor es necesario conocer las propiedades termofísicas de los alimentos, entre las cuales se tienen: capacidad calorífica, entalpía, conductividad y difusividad térmica, cuyos datos básicos se utilizan en el diseño y simulación de procesos de transferencia de calor en la ingeniería de alimentos (enfriamiento, calentamiento, secado, congelamiento, etc.). Debido a la diversidad de alimentos con diferencias en composición, textura, variedad, y otros, se necesitan de técnicas rápidas y exactas para lograr medir estas propiedades termofísicas; en general, la composición, la densidad másica y la temperatura son los factores o condiciones de proceso que afectan principalmente estas propiedades térmicas.

El presente trabajo de investigación tiene como objetivo contribuir con la caracterización del masato (masa de yuca fermentada diluida) para su

procesamiento a escala industrial, en el cual la transferencia de calor es imprescindible, asimismo obtener el valor de la difusividad térmica para conocer la velocidad de propagación de calor que puede ser útil también para optimizar los procesos de elaboración de la misma, o en el diseño de procesos y equipos industriales apropiados para lograr un consumo reducido de energía y determinar la ecuación que gobierne la difusividad térmica del masato (masa de yuca fermentada), en función al porcentaje de humedad para poder simular el comportamiento de la difusividad de la masa de yuca fermentada en función a porcentaje de humedad.

II. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

A. TRANSFERENCIA DE CALOR

En este tipo de proceso, el calor se transfiere mediante un complejo mecanismo submicroscópico en el que los átomos interactúan a través de choques elásticos e inelásticos para propagar la energía desde las regiones con mayor temperatura hacia las que tienen menor temperatura (KREITH y BOHN, 2001). Por esta razón, el tema de transferencia de calor sería más propiamente llamado transferencia de energía térmica. Según Watson y Harper (1987), citado por MUÑOZ, (2002), se puede definir el calor como la energía que es transferida como resultado de una diferencia de temperatura. Por tanto, la transferencia de calor es un fenómeno de transferencia de energía; cualquier incremento del calor causará un movimiento más rápido de las moléculas de un producto, y la energía cinética de las moléculas se incrementa a medida que el calor es absorbido (FENNEMA *et al.*, 1981).

1. Mecanismos de transferencia de calor

El calor puede ser transferido en tres formas diferentes: conducción, convección y radiación. Estas tres formas son similares en que una diferencia de temperatura debe de existir para que se obtenga una transferencia de energía neta en la dirección de mayor a menor temperatura. Sin embargo, son diferentes ya que la forma física de los

tres fenómenos y las leyes que los controlan difieren (Mc Adams, 1964, citado por MUÑOZ, 2002).

a. Conducción

Es el paso de la energía térmica por el interior de un cuerpo de molécula a molécula. De esta forma una molécula transmite su energía cinética a otra, la cual, a su vez, oscila en torno a su posición de equilibrio. En los cuerpos sólidos, la conducción es la forma principal de propagación de calor. Pero también aparece en líquidos y gases en reposo para diferencias de temperatura no demasiados grandes (THIEM, 1982). La conducción tiene lugar a escala molecular, y el mecanismo corresponde a un transporte de la cantidad de movimiento de las moléculas individuales a lo largo del gradiente de temperatura (Mc CABE *et. al.*, 1991).

SINGH y HELDMAN, (1998) mencionan que la conducción de calor es usualmente interpretada como un intercambio molecular de energía cinética. En este concepto, como las moléculas del material son calentadas, ellas se ponen en movimiento y a su vez impactan elásticamente a las moléculas vecinas, y así a través del espesor del material. Esta forma de transferencia de calor describe el flujo de calor de un alimento sólido durante el calentamiento o enfriamiento.

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

$$\frac{\Delta Q}{\Delta t} = \dot{Q} = -\lambda A \frac{\Delta T}{\Delta x} \dots\dots\dots (1)$$

Donde:

\dot{Q} : Tasa de flujo de calor que atraviesa el área a en la dirección x (W).

λ : Conductividad térmica (constante de proporcionalidad) (W/mK).

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

t : Tiempo (s).

x : Dirección del flujo de calor.

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

térmico por conducción, tiene que existir un gradiente de temperatura. Si la temperatura de un punto dado varía con el tiempo, la velocidad del flujo térmico variará también con el tiempo. Se dice entonces que la conducción de calor representa un estado no estacionario o *transiente* de transferencia de calor cuando la temperatura varía con la posición y con el tiempo (Mc Adams 1964, citado por MUÑOZ, 2002).

El signo negativo refleja el hecho físico de que el flujo de calor se produce de mayor a menor temperatura, de forma que el signo del gradiente es contrario al del flujo de calor. Al utilizar la ecuación de Fourier es preciso tener muy en cuenta que el área A es la de una superficie perpendicular al flujo de calor, y que la distancia x es la longitud del camino medido perpendicularmente al área A (SHARMA *et al.*, 2003).

b. Convección

Es la propagación del calor de molécula a molécula de gases y líquidos en movimiento a medios también en movimiento o a cuerpos sólidos o viceversa (THIEM, 1982). El uso de intercambiadores de calor resulta de gran importancia en el estudio del intercambio de calor entre dos fluidos separados por una pared; de modo que, uno de ellos cede calor al otro enfriándose mientras que el otro fluido se calienta. La convección

de calor ocurre a través del movimiento de masa de los fluidos hacia y desde la pared (POTTER y HOTCHKISS, 1995). Dentro de la pared la energía es transferida por conducción.

En la medición de conductividades térmicas de gases y líquidos se refiere al uso frecuente de flujos de calor hacia abajo para evitar la transferencia por convección (Mc CABE *et al.*, 1991; IBARZ *et al.*, 2000) debido al movimiento de masa causado por diferencia de densidad.

c. Radiación

Tiene lugar sin vínculo material y constituye un estado de vibración electromagnético. Los cuerpos calientes irradian energía que es absorbida por los cuerpos fríos parcialmente y, en condiciones ideales, en su totalidad (THIEM, 1982). El paso de un estado energético a otro lleva asociado una absorción o emisión de calor; un cuerpo absorbe y emite energía radiante en todas las direcciones. La energía irradiada es, según la ley de Stefan-Boltzmann, directamente proporcional a la temperatura del cuerpo elevado a cuatro (Mc CABE *et al.*, 1991). Cuando la energía irradiada alcanza a otro cuerpo, parte de ella puede reflejarse y otra parte puede ser transmitida a través del cuerpo, diciéndose entonces que el cuerpo es diatérmico. La energía restante es absorbida y transformada en calor. Si dos cuerpos, uno más

caliente que otro, se encierran en una cavidad, hay un intercambio continuo de energía entre ellos. El cuerpo más caliente emite más energía que absorbe; el más frío absorbe más que irradia. Aún después de alcanzarse el equilibrio térmico, continúa el proceso, radiando y absorbiendo energía cada cuerpo (Mc Adams, 1964, citado por MUÑOZ, 2002).

B. FLUJO DE CALOR EN ESTADO NO ESTACIONARIO

La temperatura que está dada en el alimento durante el procesamiento depende del tiempo de calentamiento o enfriamiento, como también de la posición en el alimento, de esta forma continuamente hay un cambio en la temperatura (FELLOWS, 1988).

De esta manera, el equipo utilizado de forma general en el régimen no estacionario de transferencia de calor consiste en un baño de agua con calefacción o enfriamiento y preferentemente con agitación, en el cual se sumerge un cilindro infinito, aislado en sus extremos con tapas de teflón o de goma, que contiene la muestra por analizar (JIMÉNEZ y KASAHARA, 1991).

Dos termocuplas ubicadas en el centro y en la superficie del tubo, respectivamente, permiten seguir la variación de temperatura con el tiempo, cuando se somete el cilindro con la muestra a calentamiento a razón constante, desde una condición de equilibrio hasta una temperatura

deseada. Por cuanto la muestra adquiere la forma de un cilindro infinito, el calor se propaga sólo en dirección radial por conducción en estado estacionario. (JIMÉNEZ y KASAHARA, 1991).

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

$$\frac{\Delta T}{\Delta t} = \frac{\lambda}{\rho C_p} \left[\frac{\Delta}{\Delta x} \left(\frac{\Delta T}{\Delta x} \right) + \frac{\Delta}{\Delta y} \left(\frac{\Delta T}{\Delta y} \right) + \frac{\Delta}{\Delta z} \left(\frac{\Delta T}{\Delta z} \right) \right] + \dot{q} \dots \dots \dots (2)$$

Donde:

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

ρ : Densidad (g/cm³).

C_p : Calor específico (J/Kg.K).

\dot{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 se reduce a:

$$\frac{\Delta^2 T}{\Delta x^2} = \frac{B}{\lambda} + \frac{1}{\alpha} \frac{\Delta T}{\Delta t} \dots\dots\dots(3)$$

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):

$$T = f \log j \left[\frac{T_m - T_0}{T_m - T} \right] \dots \dots \dots (4)$$

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).

$$Y = 2 \sum_{n=1}^{\infty} \frac{J_0(\beta_n \xi)}{\beta_n J_1(\beta_n)} \exp(-\beta_n^2 X_{F0}) \dots \dots \dots (5)$$

Donde:

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

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

$X_{F0} = \frac{t}{R^2/\alpha}$ = 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.

R : Radio del cilindro (m).

Donde para un cilindro infinito, la transferencia de calor se realiza en forma radial, la relación $(r/R) = 0$, con lo cual se utilizan los valores dados en el Cuadro 1.

Cuadro 1. 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 1, para un cilindro infinito se describe con la siguiente ecuación:

$$\frac{\Delta T}{\Delta T_{\max}} = 1,6e^{-5,78X_{F0}} - 1,06e^{-30,47X_{F0}} - 0,85e^{-74,9X_{F0}} - 0,73e^{-139X_{F0}} + \dots \quad (6)$$

Donde:

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

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

α : Difusividad térmica (m²/s).

R : Radio del cilindro (m).

t : Tiempo (s).

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:

$$t = 0,398 \frac{r^2}{\alpha} \log \left(1,6 \frac{T_m - T_0}{T_m - T} \right) \dots \dots \dots (7)$$

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

Las propiedades térmicas de los alimentos son de considerable importancia en la ingeniería para los procesadores de alimentos, dado que ellas gobiernan los cambios de temperatura en procesos que involucran la transferencia de calor, en el alimento y la mitad en el interior del propio alimento, procesos tales como, calentamiento, enfriamiento, secado y congelamiento (JIMÉNEZ y KASAHARA, 1991). Las propiedades como calor específico, densidad, conductividad térmica son frecuentemente requeridas para la realización de análisis preliminares en proyectos de procesamiento físicos de alimentos. Estas propiedades son bien definidas para materiales no biológicos, mas son escasas las informaciones de las propiedades térmicas en los alimentos (Bhumbla *et al.* 1989, citado por SANTOS, 2004). 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, estas propiedades son dependientes de la temperatura, composición química del producto y estructura física (Urbicain y Lozano, 1997, citado por MUÑOZ, 2002). El conocimiento de las propiedades de los alimentos es requerido para predecir, diseñar y optimizar muchos procesos que involucran la transferencia de calor, como por ejemplo el congelamiento, el descongelamiento, la cocción y el secado. Estas propiedades, tales como

la conductividad térmica, (λ), el calor específico, (C_p), y la difusividad térmica, α_T , están bien definidas por la relación:

$$\alpha = \frac{\lambda}{C_p \cdot \rho} \dots\dots\dots (8)$$

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, pueden ser determinadas por dos vías: por medición directa o 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 aplicación de métodos numéricos usando computadoras es cada vez más útil para la evaluación de procesos que involucran la transferencia de calor en alimentos. Tales aplicaciones a menudo están limitadas por la disponibilidad de datos de las propiedades térmicas, especialmente valores de conductividad y difusividad térmica (Ziegler y Rizvi, 1985, 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. 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), 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).

Los datos de conductividad térmica de alimentos como una función del contenido de humedad es una de las primeras propiedades requeridas para modelar procesos involucrando transferencia de masa y energía. Ejemplos típicos son, los procesos de secado, re-hidratación, almacenamiento, etc. (Lozano *et. al.*, 1979, citado por MUÑOZ, 2002).

1. Conductividad térmica.

La conductividad térmica de un producto es una medida de la velocidad con la que el calor se transmite a través de un espesor de unidad de ese material cuando existe un gradiente de temperatura y está expresada en W/mK (SINGH y HEDLMAN, 1998).

Esta propiedad del alimento depende mucho de la porosidad, la estructura y los constituyentes químicos; está principalmente asociada con las propiedades del aire, de la grasa y del agua en los alimentos. La conductividad térmica de la grasa es más baja que la del agua, al igual que la conductividad térmica del aire; altos niveles de grasa o aire atrapado disminuiría consecuentemente la conductividad térmica de un alimento. Esto tiene un gran impacto en las tasas de calentamiento y enfriamiento, como también en la eficiencia de los procesos. 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).

Para medir esta propiedad en sólidos se han desarrollado numerosas técnicas experimentales muchas de las cuales son válidas para rangos de temperatura y productos alimenticios específicos, las que se pueden agrupar en las de flujo de calor en régimen estacionario y no estacionario. A su vez, la variación de la conductividad térmica experimentada en diferentes alimentos se refiere a las diferencias en

su composición; además estas diferencias parecen ser también originadas por la procedencia de los diferentes productos (JIMÉNEZ y KASAHARA, 1991).

La conductividad térmica de los alimentos y su relación con el contenido de agua es una de las más importantes propiedades de transporte requeridas para modelar procesos donde la energía en calor varía. Como típicos procesos son de secado, en procesos de deshidratado y la predicción de humedades límites en embalajes de alimentos deshidratados durante el almacenamiento. La conductividad térmica depende de la fracción volumétrica en la conductividad térmica de los sólidos (Bakshi y Yoon, 1984; Wangb y Brennan, 1992, citados por QUEIROZ, 2001).

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 (\dot{Q}), si el gradiente de temperatura ($\Delta T / \Delta x$) es conocido: en W/m^2 (Ziegler y Rizvi, 1985, citado por MUÑOZ, 2002).

$$Q = \lambda \left(\frac{\Delta T}{\Delta x} \right) \dots \dots \dots (9)$$

Donde:

Q : Flujo de calor (W).

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

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

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 y está definida como el cociente de la conductividad térmica por el producto de la densidad y el calor específico (AMIGO, 2000).

La difusividad térmica de un material está influenciada por el contenido de agua, por la temperatura, por la composición y porosidad. Como en muchos procesos, el contenido de agua y la temperatura de un producto pueden variar considerablemente, y el valor de la difusividad térmica también puede variar, además de eso, muchos productos alimenticios no son homogéneos y la difusividad térmica puede variar de un lugar para otro dentro del mismo producto. Varios modelos empíricos útiles en la predicción de la difusividad térmica de los alimentos existen en la literatura (Tavman *et al.*, 1997, citado por QUEIROZ, 2001).

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 (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).

(Dickerson, 1965, citado por EVANGELISTA *et al.*, 2003), describe un equipo que permite la determinación de la difusividad térmica de alimentos, el método fue basado en la transferencia de calor *trasciente* en que las temperaturas de la muestra aumentaron linealmente con respecto al tiempo.

Las muestras fueron encerradas en un cilindro de bronce cromado e inmerso en un baño de agua con agitación y calentada a una proporción constante. El cilindro fue considerado de longitud infinita y el flujo de calor axial despreciable. La ecuación resultante fue:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = A = \alpha \left(\frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} \right) \dots \dots \dots (10)$$

Donde:

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

t : Tiempo (s).

A : Taza de crecimiento constante ($^{\circ}\text{C}/\text{s}$).

α : Difusividad térmica (m^2/s).

r : Coordenada radial.

Con las condiciones de contorno:

$$\begin{array}{lll} \text{Para } t > 0, & \text{en } r = R & T = T_R = H \times t \\ & \text{en } r = 0 & \frac{\partial T}{\partial r} = 0 \end{array}$$

Resultando la siguiente ecuación:

$$\alpha = \frac{A \times R^2}{4 \times (T_R - T_c)} \dots \dots \dots (11)$$

Donde:

T_c : Temperatura en el centro del cilindro (°C).

T_R : Temperatura en la pared del cilindro (°C).

A : Taza de crecimiento constante (°C/s).

α : Difusividad térmica (m²/s).

R : Radio del cilindro (m).

La taza de crecimiento es obtenida por la inclinación de la curva de las temperaturas del lado externo y del centro geométrico del cilindro en función del tiempo y la difusividad térmica es calculada por la Ecuación (11).

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 masa de yuca fermentada, los valores encontrados se presenta en el Cuadro 2.

3. Calor específico.

El calor específico es definido como la cantidad de calor que es absorbido o perdida por la unidad de masa del producto para efectuarse una variación de temperatura, sin el cambio de estado (SINGH y HELDMAN, 1998).

Cuadro 2. Difusividad térmica de algunos frutos y vegetales

PRODUCTO	HUMEDAD (%)	TEMPERATURA (°C)	DIFUSIVIDAD TERMICA (m ² /s)
Manzana	85	0-30	1,37 x 10 ⁻⁷
	37	65	1,12 x 10 ⁻⁷
Pasta de manzana	80	5	1,22 x 10 ⁻⁷
	80	65	1,40 x 10 ⁻⁷
Plátano	76	5	1,18 x 10 ⁻⁷
	76	65	1,42 x 10 ⁻⁷
Uva	72	.....	1,09 x 10 ⁻⁷
	88	.....	1,37 x 10 ⁻⁷
Limón	.....	40	1,37 x 10 ⁻⁷
Durazno	.....	27	1,37 x 10 ⁻⁷
Puré de papas	78	65	1,45 x 10 ⁻⁷
Frambuesa	92	5	1,27 x 10 ⁻⁷
Remolacha	.....	60	1,26 x 10 ⁻⁷
Pasta de tomate	.....	26	1,48 x 10 ⁻⁷
Agua	100	30	1,48 x 10 ⁻⁷

Fuente: (SINGH y HELDMAN, 1998).

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 (Mohsenin, 1980, citado por KUROZAWA *et al.*, 2008). 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 el caso.

El calor específico puede ser a presión constante (C_p), y a volumen constante (C_v), que son llamados “calores específicos principales” (Alvarado, 1991, citado por SANTOS, 2004).

En términos termodinámicos, el calor específico a presión constante es definido como una función de Energía Libre de Gibbs (G), según la Ecuación (12).

$$C_p = \left(\frac{\partial G}{\partial T} \right)_p \dots\dots\dots (12)$$

Donde:

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

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

∂T : 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). A veces la medida se efectúa utilizando aparatos bien simples, como los usados por Hwang y Hayakawa, 1979; Kleeberg, 1986; Hense, 1990 y Silva, 1997 (SANTOS, 2004).

D. CARACTERÍSTICAS GENERALES DE LA YUCA

La yuca (*Manihot esculenta Crantz*) es una de las principales plantas alimenticias cultivadas en la Amazonía. Es un alimento energético importante que, además, es utilizado en la alimentación animal y en la industria de alcoholes y gomas. Su cultivo es relativamente fácil y se ha

extendido a otras regiones tropicales, principalmente Africa, en donde constituye un alimento importante (IIAP, 2001).

Tiene una gran variabilidad genética. Los Boras, por ejemplo, conocen 22 variedades de yuca dulce y amarga; siendo uno de los principales componentes de los sistemas agroforestales que ellos manejan (DENEVAN y TREACY, 1990).

La productividad de las raíces varía de acuerdo a la variedad y al lugar en el cual son cultivadas. En Tingo María, reportan rendimientos de 49 t ha⁻¹. En Pucallpa, se ha obtenido rendimientos de 25 t ha⁻¹. En Tarapoto, se reportan producciones de 25 t ha⁻¹ con la variedad «auquina amarilla» y 17 t ha⁻¹ con la variedad «rumo maqui». En Iquitos, se han obtenido productividades de 42, 27, 14 y 8 t ha⁻¹ con las variedades «palo negro», «amarilla», «motelo rumo» y «ungurahui»; respectivamente (VASQUEZ y PEZO, 1990).

1. Taxonomía.

La yuca es familia de las *Eufurbiáceas*, a la cual pertenece *Manihot esculenta crantz*, presenta varios otros géneros de importancia alimenticia en los pueblos tropicales. Actualmente cultivares de *Manihot esculenta* se encuentran distribuidos principalmente en las tierras bajas y calientes de los trópicos, sin embargo, hay algunos cultivares de *Manihot esculenta* en tierras altas frías de Bolivia (MONTALDO, 1983).

2. Morfología.

Es un arbusto que puede llegar a 4 ó 5 metros de altura, pero entre los tipos cultivados no pasa de 2 a 3 metros. Su tallo se ramifica a una altura variable, según las variedades y las condiciones ecológicas; dan generalmente 3 ramificaciones secundarias y a veces terciarias. Las hojas son lobuladas de color desde verde hasta el rojizo, las raíces de 20 a 40 cm de largo por 5 a 8 de diámetro las raíces no reservantes son fibrosas y nacen de los cortes de las estacas y a nivel de los entrenudos alcanzando profundidades de las estacas y a nivel de los entrenudos alcanzando profundidades de 0,5 a 1 metro (MONTALDO, 1983).

3. Composición química de la yuca (raíz entera)

La yuca como raíz entera contiene 61% de humedad; 1,2% de proteínas; 0,4% de grasa; 34,9% de carbohidratos; 1,2% de fibra; 1,3% de cenizas (MONTALDO, 1983), la composición química de la yuca dulce y amarga se indica en el Cuadro 3.

E. CARACTERÍSTICAS GENERALES DE LA MASA DE YUCA FERMENTADA (MASATO)

En el Perú hay una gran variedad de bebidas fermentadas elaboradas a base de diversos sustratos vegetales, incluyendo frutas, cereales y tubérculos regionales, siendo la "chicha de jora" y el "masato" las bebidas más consumidas por la población rural. La "yuca", "mandioca" o "cassava"

(*Manihot esculenta* Crantz – familia *Euphorbiaceae*) constituye la dieta primaria de más de 500 millones de personas (Cock, 1982, citado por SEDANO, 2006).

Cuadro 3. Composición química de la yuca

COMPOSICION	YUCA DULCE	YUCA AMARGA
Valor energético (cal)	132	148
Humedad (%)	65,2	60,6
Proteína (g)	1	0,8
Grasa (g)	0,4	0,3
Carbohidratos (g)	32,8	37,4
Fibra (g)	1	1
Ceniza (g)	0,6	0,9
Calcio (mg)	40	36
Fosforo (mg)	3,4	48
Hierro (mg)	1,4	1,1
Vitamina A (Mcg.Act)	Tz	5
Tiamina (mg)	0,05	0,06
Riboflavina (mg)	0,04	0,04
Niacina (mg)	0,6	0,07
Acido ascórbico (mg)	19	40
Cascara (%)	32	32

Fuente: (LEUNG Y FLORES, 1961)

A pesar del cierto grado de toxicidad que tiene, debido a la presencia de compuestos como la linamarina y su naturaleza altamente perecible, éste producto es utilizado también como alternativa para la elaboración de bebidas fermentadas. El “*burukutu*” del continente africano, así como el “masato” y otras bebidas a base de yuca de la Amazonía en América del Sur son ejemplos de bebidas fermentadas autóctonas de consumo masivo y producción aún artesanal.

El “masato” es una bebida tradicional propia de la Amazonía peruana que se obtiene como resultado de la fermentación espontánea de la yuca. Este sustrato vegetal representa uno de los productos agrícolas de mayor producción, sin embargo su aprovechamiento es pobre. Sólo en el año 2003, la producción nacional de yuca superó las 909 mil toneladas cubriendo el 4,2% del total nacional de hectáreas cultivadas. Para la elaboración de productos procesados tradicionalmente como el “masato” y otros se utiliza un mínimo porcentaje de la producción total de yuca, pero debido a su variable calidad, estos productos no son suficientemente competitivos en los mercados urbanos (SALAS *et al.*, 1996).

En la Amazonía peruana, el principal producto derivado de la yuca fermentada es el “masato”, constituye parte de la dieta diaria del poblador amazónico y es una bebida de consumo mayoritario durante las actividades festivas, agrícolas y ganaderas. En las áreas rurales las madres humildes y las aborígenes que carecen de medios para alimentar

con leche a sus bebés, acostumbran criarlos con “masato” hervido, conservándose los niños sanos y gordos, por lo que se recomienda su uso en la alimentación de madres y niños de escasos recursos. Para la producción del “masato” se utiliza como materia prima yucas peladas sancochadas y machacadas en vasijas de arcilla. La particularidad de su milenaria preparación reside en el hecho de que se acostumbra (en las tribus amazónicas) masticar porciones de dicha masa y devolverlas a los cántaros, donde se deja fermentar naturalmente con el caldo de yuca y se consume como bebida reconstituyente en las labores agrícolas o como bebida alcohólica cuando se le deja fermentar entre 3 a 7 días. La inmigración amazónica a Lima y con ella la incorporación de sus costumbres, ha hecho que esta alegórica bebida se popularice en nuestro medio (NAAR, 1999).

F. LA SIMULACION

En la simulación los modelos se usan para estudiar, planificar, diseñar o controlar el prototipo. En la mayor parte de los casos, la modelación reduce costos, riesgos, y tiempo de ejecución de tareas. En un modelo matemático, la representación del prototipo es simbólica, en términos matemáticos, incluyendo variables, parámetros y relaciones como ecuaciones o desigualdades. Los usos comunes de modelación incluyen observación y explicación, planificación, diseño de ingeniería, optimización y diseño, análisis, control operacional e investigación científica (MEJIAS y PALMA, 2001).

1. Definición

Es el proceso de diseñar y desarrollar un modelo computarizado de un sistema o proceso y conducir experimentos con este modelo con el propósito de entender el comportamiento del sistema o evaluar varias estrategias con las cuales se puede operar el sistema (SHANNON, 2003).

Los simuladores son paquetes de computador que permiten la simulación de una clase específica de sistemas con poco o nada de programación, mientras los lenguajes de simulación son muy generales, aunque pueden caracterizarse para modelar cierto tipo de aplicaciones. En general, los lenguajes de simulación tienen la habilidad de modelar casi cualquier tipo de sistema (ECHEVERRY *et al.*, 2008)

2. Ventajas de la simulación

La ventaja fundamental del uso de simuladores en estos casos es la reducción de tiempo que se necesita para obtener las condiciones óptimas de operación, ya que la velocidad de simulación es mucho más elevada. Esto unido a la posibilidad de ser usada como herramienta de entrenamiento para operarios, hace que los elementos de simulación sean necesarios para el desarrollo de nuevos procesos. Debido al desconocimiento que existe sobre estos nuevos procesos, la herramienta que debe usarse tiene que ser sencilla de programar,

flexible y versátil (para poder re-programarla de manera sencilla según se avance en la investigación), intuitiva y fácil de manejar (para que los operarios que se entrenen con ella puedan manejarla de manera similar a la planta industrial, sin conocer su programa interno) (MEJIAS y PALMA, 2001).

En general, los lenguajes de simulación tienen la habilidad de modelar casi cualquier tipo de sistema (ECHEVERRY *et al.*, 2008).

En consecuencia, la simulación puede desempeñar un importante papel en los procesos de enseñanza y aprendizaje. Por un lado, constituye un espacio intermediario, que puede facilitar la puesta en relación de la realidad con las teorías o modelos (BARBERA Y SANJOSE, 1990), es decir, entre lo concreto y lo abstracto (VALENTE y NETO, 1992).

3. Pasos a seguir para una simulación

Todo estudio de simulación debe realizar una serie de pasos, que incluyen análisis y arduas dedicaciones para obtener datos representativos del sistema en lo mejor posible (AZARANG y GARCIA, 1996). En los pasos para la realización de una simulación se pueden citar los siguientes:

- Elección del método para realizar el estudio.
- Variables a incluir en el modelo.

- Recolección y análisis de los datos del sistema.
- Definición de la estructura del modelo.
- Programación computacional del modelo.
- Validación del modelo.
- Análisis y crítica de los resultados.

En todos ellos se justifica la dedicación de tiempo que sea necesaria para el análisis y validación, ya que de ello depende un buen modelo para la simulación (SYBASE, 2004).

III. MATERIALES Y MÉTODOS

A. LUGAR DE EJECUCIÓN

Las experiencias se realizaron en el Laboratorio de Análisis de los Alimentos y Laboratorio de Ingeniería de los Alimentos de la Facultad de Ingeniería en Industrias Alimentarias; en la Universidad Nacional Agraria de la Selva, ubicada en la ciudad de Tingo María; provincia de Leoncio Prado; departamento de Huánuco; región Andrés Avelino Cáceres; ubicada a 660 msnm, con una humedad relativa de 84% y una temperatura promedio anual de 24 °C, en el periodo de julio a noviembre del año 2008.

B. MATERIA PRIMA

Para los experimentos preliminares, definitivos y validación de la difusividad térmica, se utilizó raíces de yuca (*Manihot esculenta Crantz*) variedad “guía morada” provenientes del mercado de Tingo María.

C. EQUIPOS, MATERIALES, REACTIVOS E INSTRUMENTOS

1. Para la determinación de la difusividad térmica

- Cilindros de acero inoxidable de dimensiones, longitud: 200 mm por diámetro: 30,10 mm.
- 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.

- Retorta (interface) equipada con sensores térmicos "DATA TRACE" (con dos sondas).
- Computador, Compaq, modelo Deskpro EN, instalada con programa de "DATA TRACE".
- Balanza analítica marca Ohaus, modelo AP210S, serie 1113032314, con 0.1 mg de sensibilidad, capacidad máxima de 210 g.
- Refractómetro marca Quimis, modelo Q-109B, 0-95 °Brix.
- Cronómetro marca Q&Q.
- Balanza gramera marca Sartorius, capacidad máxima 3100g, de sensibilidad 0.01g.
- Termómetro de mercurio Boeco, de -20 a 150 °C, precisión ± 1 °C.
- Vasos de precipitado de 1000 cm³.
- Materiales aislantes (tecnopor, corcho, teflón, cinta aislante y baquelita).
- Soporte de fierro para el tubo de acero.
- Termómetro digital WT-1de -50 a 300 °C, precisión de ± 1 °C.
- Agua destilada.

2. Para la determinación de la composición química

- Estufa de aire a 105 ± 2 °C, Samsung.
- Balanza analítica digital con 1 mg de sensibilidad.
- Cápsulas de porcelana (crisol), aprox. 100 cm³.
- Campana de vidrio con silica gel.

- Pinza de metal.
- Horno de incineración (mufla).
- Balones de digestión.
- Erlenmeyer pyrex 100 cm³.
- Cocina de digestión.
- Digestor Kjeldahl.
- Aparato de destilación Kjeldahl.
- Indicadores (rojo de metilo, verde de bromocresol).
- Bureta automática de 500 cm³.
- Extractor Soxhlet.
- Papel filtro.
- Balón de fondo plano Boeco 250 cm³.
- Vaso de precipitado de 600 cm³ Kimax.
- Crisol de vidrio.
- Destilador de reflujo.
- Ácido sulfúrico concentrado y a 1,25%.
- Sulfato de potasio.
- Sulfato de cobre.
- Ácido bórico.
- Ácido clorhídrico 0,1 N.
- Hidróxido de sodio al 50% y 1,25%.
- Hexano.
- Agua destilada.

3. Para el análisis fisicoquímico

- Refractómetro
- Balanza analítica digital.
- Matraz aforado de 100 cm³, Pirex.
- Phmetros: SCHOTT, serie 940454, modelo pH11, $\leq 0,005 \text{ pH} \pm 1$ digit; INOLAB WTW with resolution setting of 3 decimals.
- Termómetro analítico de mercurio.
- Bureta automática
- Pizeta.
- Destilador acondicionado.
- Probeta de 100 cm³.
- Alcoholímetro analítico.
- Soluciones buffers (3,5 y 7)
- Indicador (fenolftaleína).
- Hidróxido de sodio 0,1 N valorado.

D. DISEÑO Y VALIDACION DEL EQUIPO (Difusor Térmico)

Se procedió a armar el equipo, colocándose: el agitador, los termómetros (digital y analógico), y la resistencia; de acuerdo a las condiciones requeridas (Figura 1), y se procedió a validar el incremento de la temperatura con el tiempo en el difusor utilizándose volúmenes de agua de 18L, 17L, 14L, 13L, 12L, con la finalidad de comprobar el volumen de agua, en donde reúna las condiciones específicas (3 °C por minuto aproximadamente).

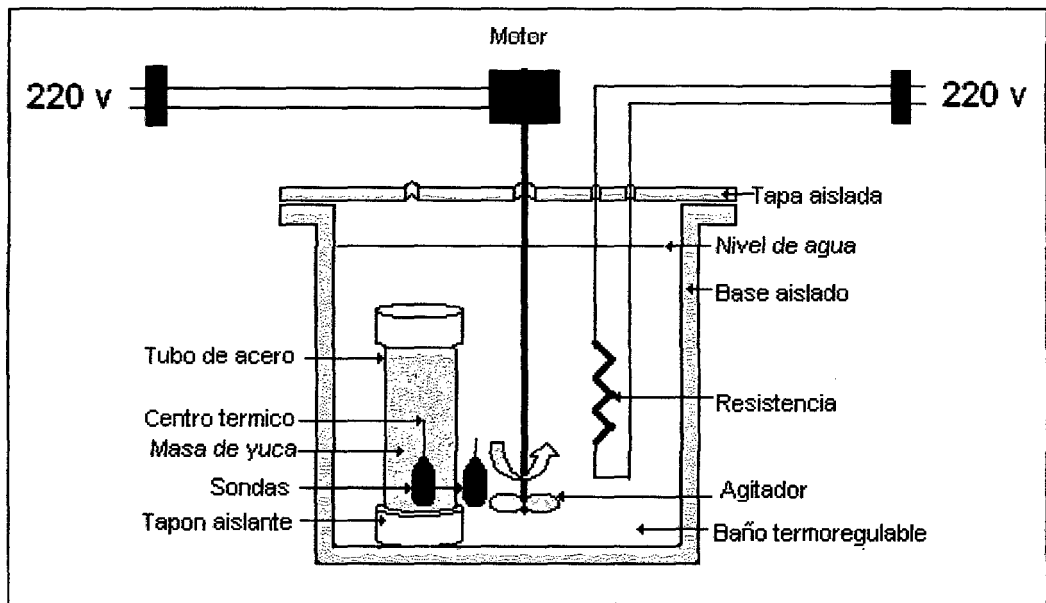


Figura 1. Equipo utilizado para la obtención del perfil térmico

Para la validación del difusor, se utilizó sensores térmicos previamente programados con el programa "DATA TRACE". Se colocaron sensores térmicos al medio de calentamiento, consistente en agua de un baño termoregulable con convección natural para registrar la variación de temperatura que experimenta éste durante la experiencia. En el que se controló la temperatura con una frecuencia de 1 minuto en el interior del tubo con muestra y en el medio exterior, para determinar la difusividad térmica de la solución de sacarosa (60 °Brix)

La difusividad térmica se determinó con el método de transferencia de calor en estado no estacionario, método desarrollado por Dickerson en 1965. Este método se basa en el uso de un cilindro de característica infinita; para asegurar que se cumplan los requerimientos específicos, los extremos del tubo se sellaron con tapones aislantes de teflón de manera

que la transferencia de calor ocurra unidireccionalmente de forma radial. Se supuso para este caso que la transferencia de calor en dirección axial es despreciable frente a la dirección radial (Figura 2)

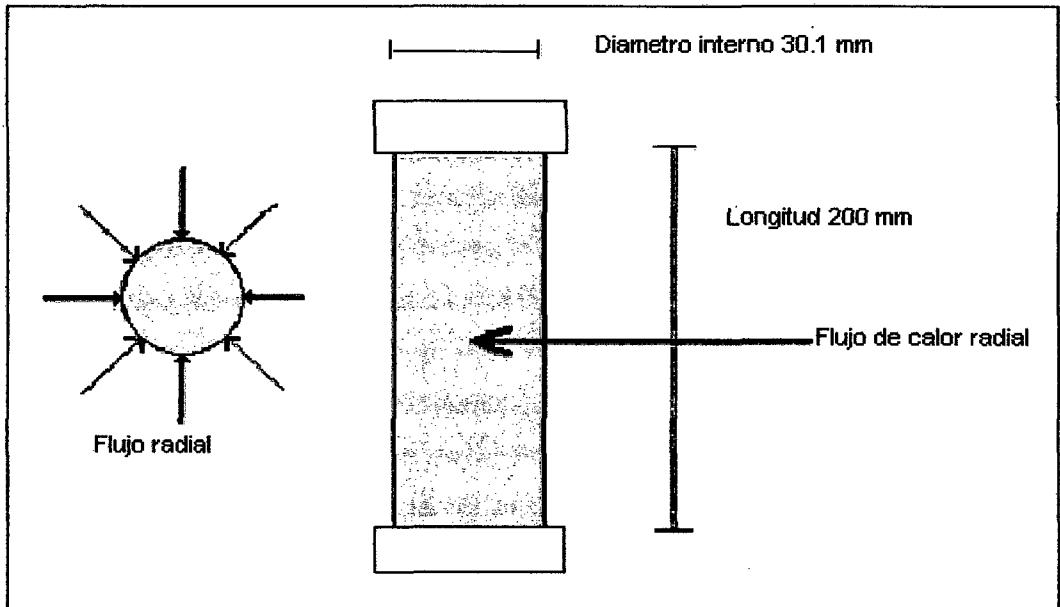


Figura 2. Dimensiones del tubo de acero inoxidable utilizado

Como forma de comparación y validación del método utilizado, se probó la medición con solución de sacarosa, a fin de comparar los valores encontrados con los reportados en la literatura. Se estudió la metodología en 4 experiencias con soluciones de sacarosa a concentración de 60 °Brix. Debido a la particularidad que presentan algunos productos en la velocidad de transferencia de calor, se comprobó el grado de convección que afecta principalmente a los líquidos. Esta estimación se realiza con una ecuación que presenta la singularidad de ser válida sólo para productos donde la transferencia de calor se realiza principalmente por conducción.

E. ELABORACION DE LA DE MASA DE YUCA FERMENTADA

De acuerdo a la investigación realizada se procedió a elaborar la masa de yuca fermentada, utilizándose yuca proveniente del mercado de Tingo María, variedad "guía morada", que sirvió como materia prima para la elaboración de las muestras para la investigación de las difusividades térmicas de acuerdo a lo indicado en el Cuadro 4, para lo cual la yuca fue seleccionada tomando en cuenta tanto la uniformidad como la madurez y coloración homogénea. Se procedió siguiendo las operaciones unitarias descritas en el flujograma de la Figura 3. Y para su conservación fue almacenada a bajas temperaturas (-20 °C), durante el transcurso del tiempo en que duro la ejecución del trabajo.

Cuadro 4. Preparación de las muestras para la determinación de la difusividad térmica de la masa de yuca fermentada

muestra	Masa de yuca fermentada (inicial)			Adición de agua (g)	Masa de yuca fermentada diluida (requerida)		
	Peso (g)	Materia seca	Humedad		Peso (g)	Materia seca	Humedad
1	150,00	25,64%	74,36%	00,00	150	25,64%	74,36%
2	131,63	25,64%	74,36%	18,37	150	22,50%	77,50%
3	117,00	25,64%	74,36%	33,00	150	20,00%	80,00%
4	102,38	25,64%	74,36%	47,62	150	17,50%	82,50%
5	87,80	25,64%	74,36%	62,25	150	15,00%	85,00%
6	73,13	25,64%	74,36%	76,87	150	12,50%	87,50%
7	58,50	25,64%	74,36%	91,50	150	10,00%	90,00%
8	43,88	25,64%	74,36%	106,12	150	7,50%	92,50%
9	29,25	25,64%	74,36%	120,75	150	5,00%	95,00%

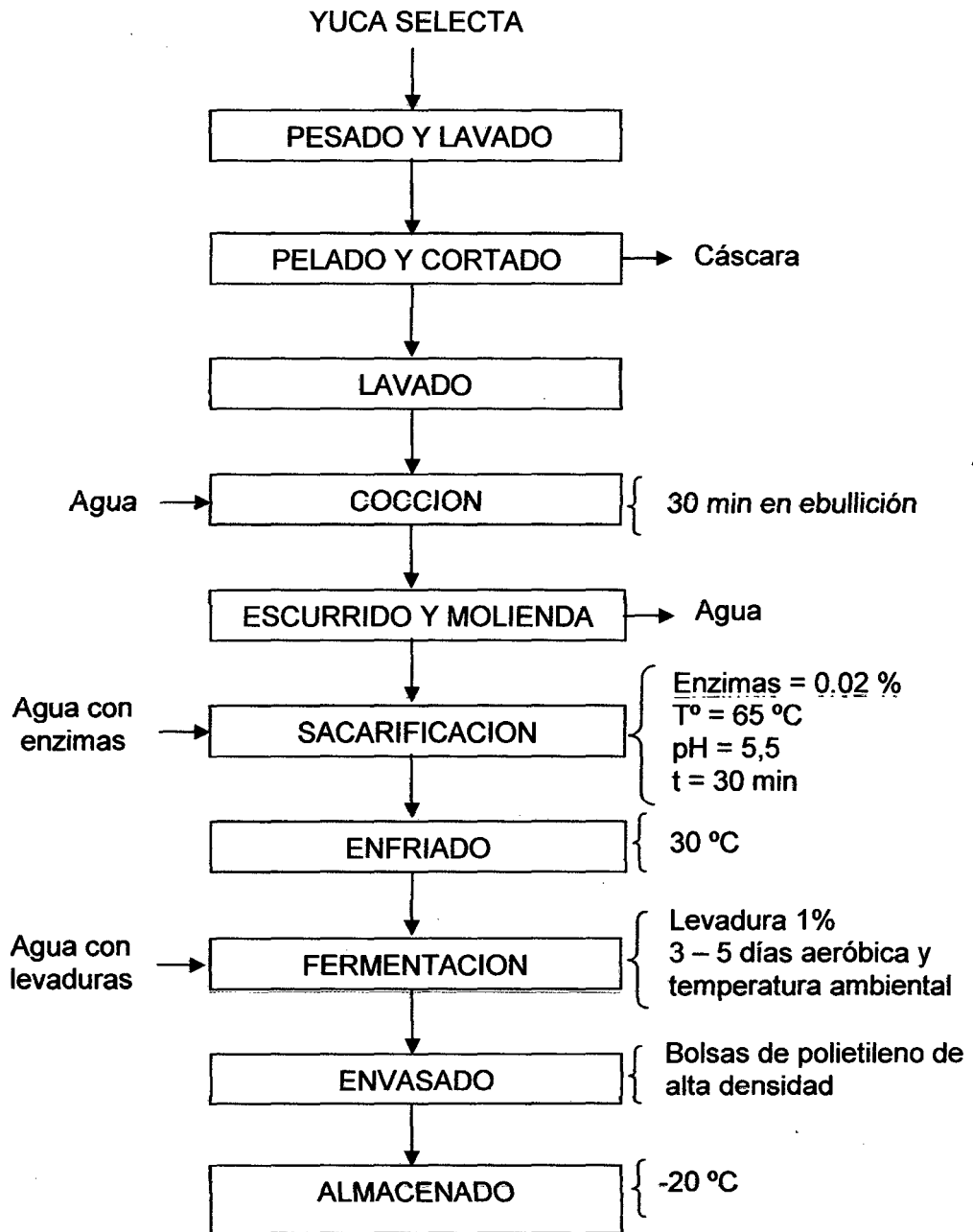


Figura 3. Flujograma para el procesamiento de la masa de yuca fermentada

F. MÉTODOS DE ANÁLISIS EN LA MASA DE YUCA FERMENTADA

1. Evaluación química proximal

Se caracterizo la masa de yuca fermentada.

a. Determinación de Humedad

Para la determinación de humedad se utilizó el método de la A.O.A.C. (1995), N° 925,10.

b. Determinación de cenizas

La ceniza se determinó por incineración según A. O. A. C. (1995), N° 923,03.

c. Determinación de proteínas

La determinación de proteínas se hizo por el método semimicro Kjeldahl, según A. O. A. C. (1995), N° 920,87.

d. Determinación de extracto etéreo

La determinación del extracto etéreo se realizó por el método recomendado por la A. O. A. C. (1995), N° 935,60.

e. Determinación de fibra cruda

La determinación de fibra cruda se llevo por el procedimiento de Weende, según A. O. A. C. (1995), N° 920,86.

2. Evaluación fisicoquímica

Se determinaron las propiedades fisicoquímicas en la masa de yuca fermentada.

a. Determinación de sólidos solubles

Los sólidos solubles de las diferentes muestras se determinaron por refractometría según el método de AOAC 932, 14C (A. O. A. C., 1995).

b. Determinación de densidad

La densidad fue determinada por diferencia de volumen según: Lide (1998), citado por MUÑOZ, (2002).

c. Determinación de acidez titulable

La acidez fue determinado por el método de la A. O. A. C. (1980), 9,119.

d. Determinación de pH

El pH fue determinado por el método potenciométrico: (Método 2-9 pH, método 11,032 de la AOAC), Citado por HART y FISHER, (1984).

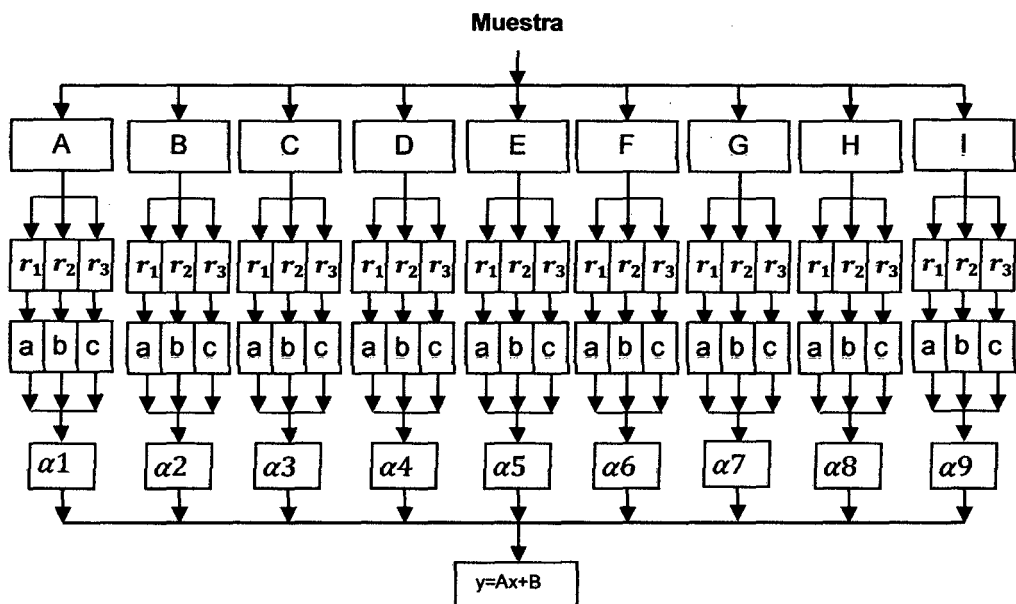
e. Determinación del grado alcohólico.

El grado alcohólico se determino por destilación: (método 2-3), HART y FISHER, (1984).

G. METODOLOGÍA EXPERIMENTAL PARA LA DETERMINACIÓN DE LA DIFUSIVIDAD TÉRMICA**1. Determinación de la difusividad (Prueba preliminar)**

Luego de elaborar las muestras de masa de yuca fermentada a diferente contenido de humedad (74,36% a 95%), se procedió a determinar las difusividades térmicas, según la figura 4.

Para la medición de la difusividades térmicas, el cilindro se rellenó con la muestra, y se colocaron dos sensores térmicos al cilindro con el objeto de registrar las temperaturas del centro térmico (exterior) y de la cara interna del cilindro. Calculando la difusividad térmica con la ecuación 11, comparándose luego con los datos bibliográficos hallados para dar validez a la metodología aplicada.



Donde: A, B, C, D, E, F, G, H, I, son las diluciones (74,36%, 77,5%, 80%, 82,5%, 85%, 87,5%, 90%, 92,5%, 95%); r_1 , r_2 , r_3 repeticiones de las diferentes diluciones; a, b, c son las difusividades térmicas promedio halladas de cada tres repeticiones; α_1 , α_2 , α_3 , α_4 , α_5 , α_6 , α_7 , α_8 , α_9 : difusividades promedios de cada tratamiento; $y = Ax + B$ es la ecuación final de la curva.

Figura 4. Diseño experimental para la determinación de la difusividad térmica

2. Determinación de la difusividad (Prueba definitiva)

Una vez validada la metodología, se determinaron los perfiles térmicos, según el diseño experimental indicado en la Figura 4, se

estudió 9 tratamientos entre 74,36% y 95% de humedad, con 9 repeticiones, 81 análisis totales realizados y con ello se determinó la difusividad térmica con respecto a la humedad utilizándose la ecuación (11). Posterior a las evaluaciones, se aplicaron los análisis estadísticos (ANOVA) a los 9 tratamientos para detectar diferencias significativas entre los tratamientos. Una vez obtenidos los datos (tiempo y temperatura) se procedió a efectuar los cálculos respectivos mediante regresión lineal para hallar las pendientes y las temperaturas de referencia en la pared del cilindro (T_R) y temperatura inicial del centro térmico de la muestra (T_C), y los cálculos de difusividad térmica con la ecuación 11. Previo a cada experiencia se calibraron los sensores térmicos a utilizar con agua destilada a 24 °C (temperatura ambiente) y 96-97 °C (punto de ebullición del agua en Tingo María) según el programa de registro de temperatura y tiempo además las temperaturas fueron registradas en intervalos de tiempo de 1 minuto.

3. Simulación de la difusividad térmica de la masa de yuca fermentada

Según MEJIAS y PALMA, (2001) Las etapas a seguir para la elaboración y ejecución de un proceso de simulación se demuestran en la Figura 5.

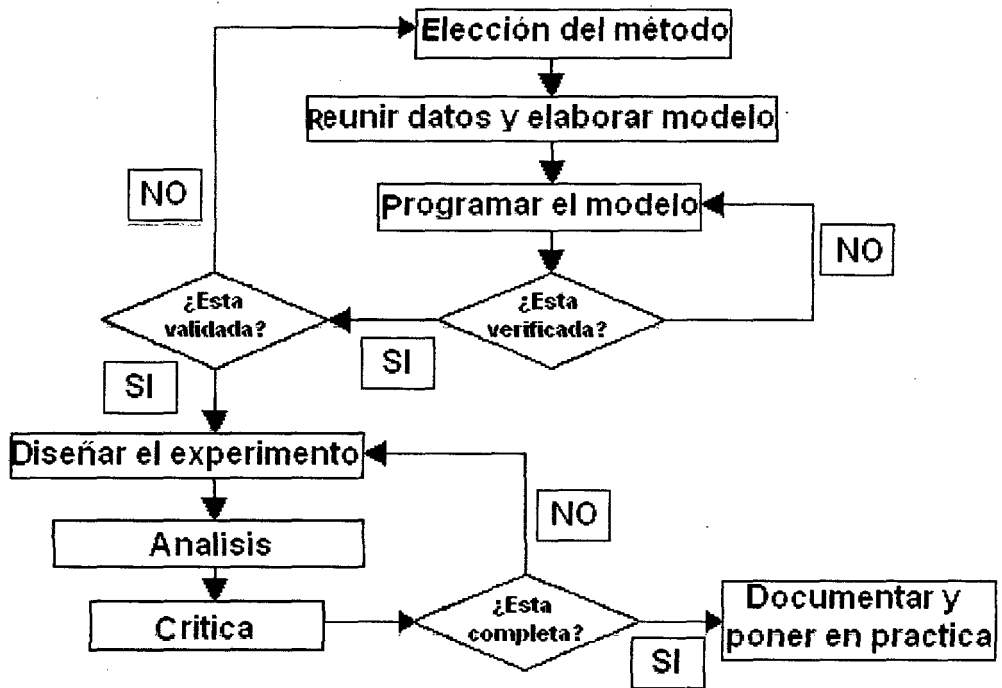


Figura 5. Diagrama de flujo del modelo de simulación seguida

La simulación se realizó de la siguiente manera: Una vez obtenida la curva, se determinaron las difusividades térmicas experimentales en 9 tratamientos entre 80,56% y 91% y se escogieron tres porcentajes de humedad: 80,56%, 86%, 91%, para hallar el valor de la difusividad. Posteriormente, se reemplazaron las tres humedades en la ecuación de la recta y se determinaron las difusividades térmicas teóricas, las mismas que se compararon con los valores experimentales hallados, determinándose el porcentaje de error entre la difusividad térmica teórica y la difusividad térmica experimental.

IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

A. VALIDACIÓN DEL DIFUSOR TÉRMICO

1. Validación del incremento de la temperatura con el tiempo

Se optó por trabajar, con un volumen de 13 L de agua, donde se consiguió las condiciones óptimas de incremento de temperatura con el tiempo (3 °C por minuto), hasta llegar a la temperatura de ebullición, Figuras 6 y 7 (Anexo 1).

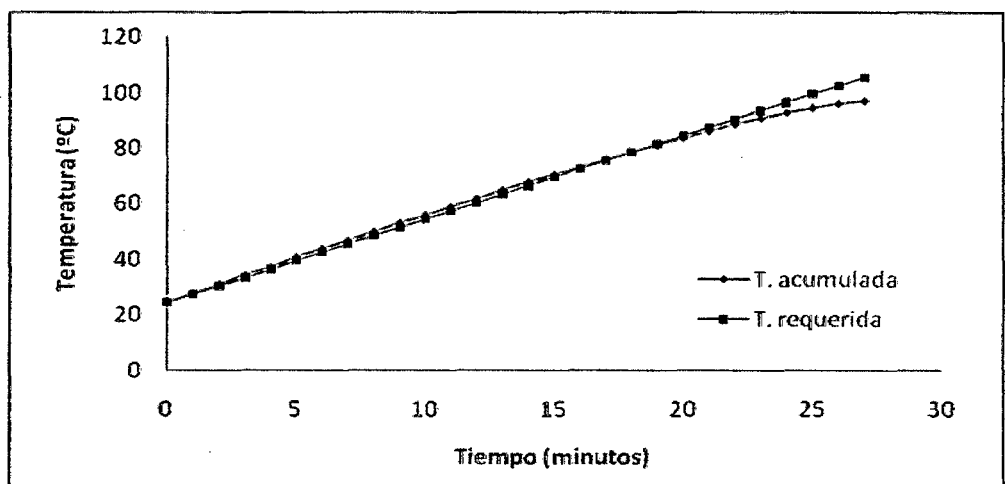


Figura 6. Validación del incremento de la temperatura con el tiempo (primera prueba con 13 L)

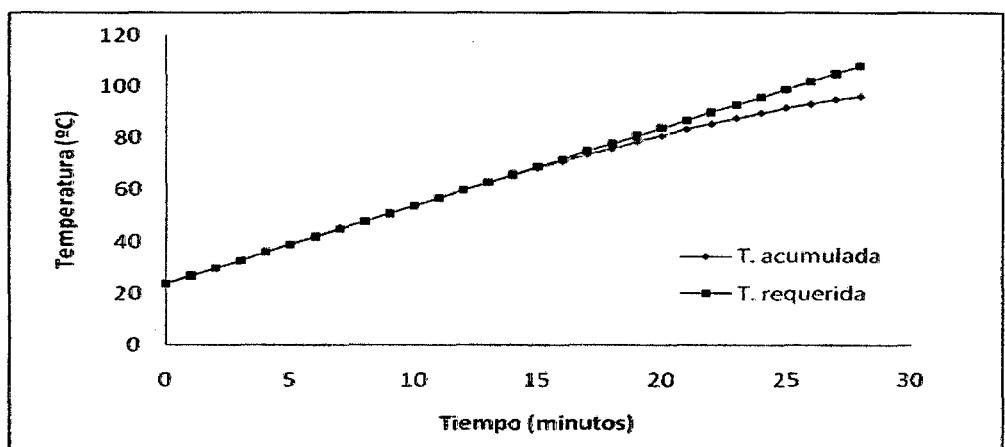


Figura 7. Validación del incremento de la temperatura con el tiempo (segunda prueba con 13 L)

2. Validación de la difusividad térmica en solución de sacarosa

A partir de las experiencias en solución de sacarosa a 60 °Brix se encontró como promedio de la difusividad térmica de $2,57 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$ con desviación estándar de $1,084 \times 10^{-8} \text{ m}^2/\text{s}$, (Anexo 2).

Sobre la base de lo reportado por: Tschubik y Maslow (1973), citado por MUÑOZ, (2002), quienes calcularon la difusividad térmica según la relación que asocia las propiedades termofísicas: $\alpha_T = \frac{\lambda}{c_p \cdot \rho}$, y la usada por MUÑOZ, (2002): $\alpha_T = 0.398 \cdot m \cdot r^2$, se compararon los resultados obtenidos y se obtuvo lo indicado en el cuadro 5.

Cuadro 5. Comparación de valores de mediciones experimentales y de literatura para difusividad térmica en soluciones de sacarosa

DIFUSIVIDADES TERMICAS (m^2/s) DE SOLUCIÓN DE SACAROSA				
Tschubik y Maslow ($\times 10^{-7}$)	Muñoz ($\times 10^{-7}$)	Presente trabajo ($\times 10^{-7}$)	Relación de aumento 1-(a/c) (%)	Relación de aumento 1-(b/c) (%)
1,17 (a)	2,04 (b)	2,46 (c)	52,50	17,18
1,18 (a)	2,18 (b)	2,56 (c)	53,89	14,82
1,19 (a)	2,25 (b)	2,68 (c)	55,59	16,03

El modelo utilizado, desarrollado en 1965 por Dickerson, corresponde a un método con el cual se determina la difusividad térmica en productos donde la transferencia de calor se realiza por conducción. La transferencia de calor se realiza principalmente por conducción pero también existe un efecto de convección que crea un incremento

en el movimiento de las partículas aumentado significativamente la propagación del calor dentro del cilindro por lo que existe mucha diferencia con los valores reportados por Tschubik y Maslow (1973), citado por MUÑOZ (2002).

B. MASA DE YUCA FERMENTADA

Se obtuvo 17901 gramos de masa de yuca fermentada, según el balance de materia indicado en la Figura 8, que sirvió como medio para obtener las muestras para la investigación (Cuadro 4) y se obtuvo 4276 gramos para la simulación de la difusividad térmica, según el balance de materia indicado en la Figura 9.

C. CARACTERÍSTICAS DE LA MASA DE YUCA FERMENTADA

1. Composición química de la masa de yuca fermentada

La composición química de la masa de yuca fermentada se muestra en el Cuadro 6.

Cuadro 6. Composición química de la masa de yuca fermentada

COMPONENTES	CANTIDAD (%)
Humedad	74,36
Carbohidratos totales	19,30
Fibra total	4,18
Proteína total	1,17
Ceniza	0,96
Extracto etéreo (grasa)	0,03

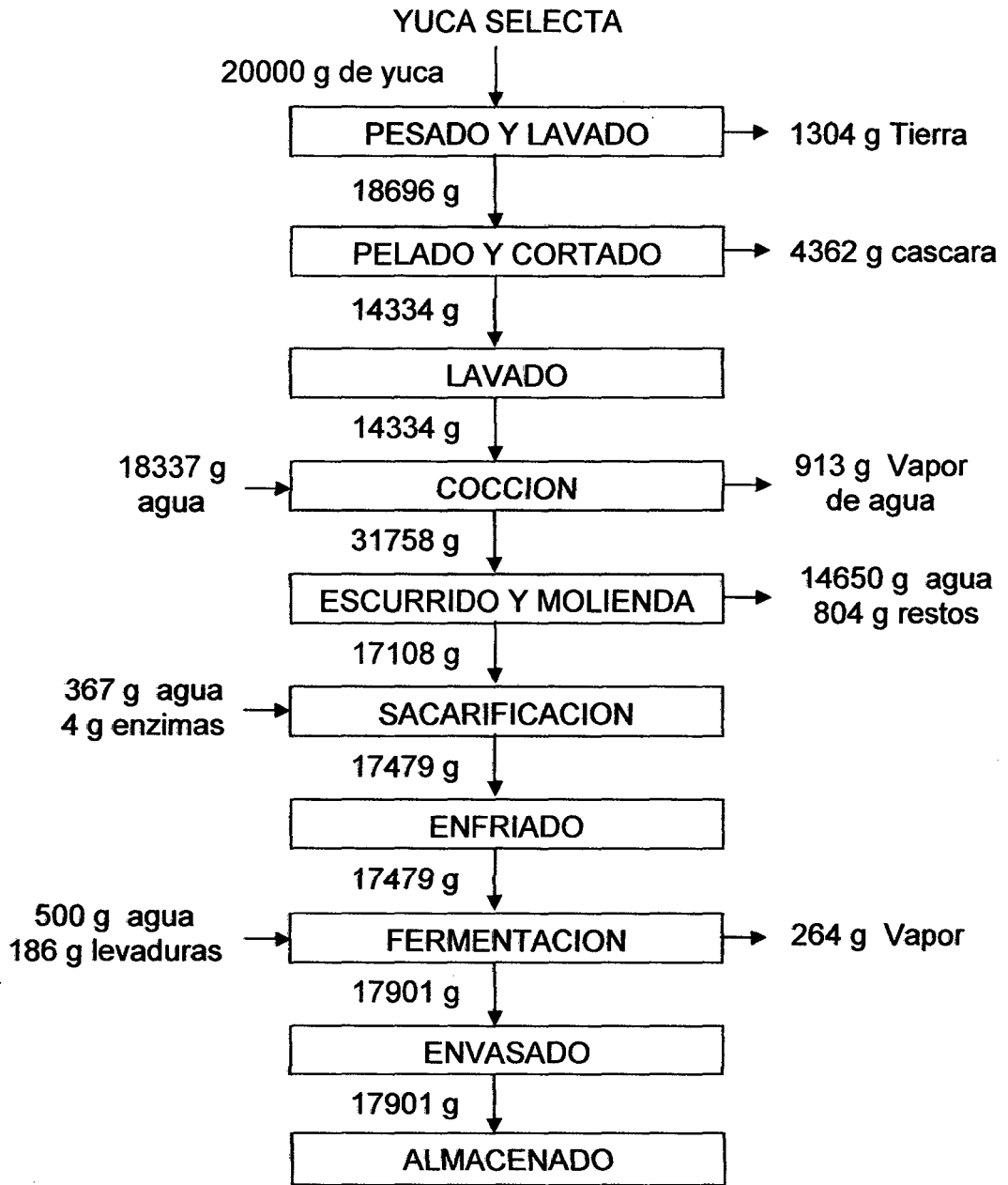
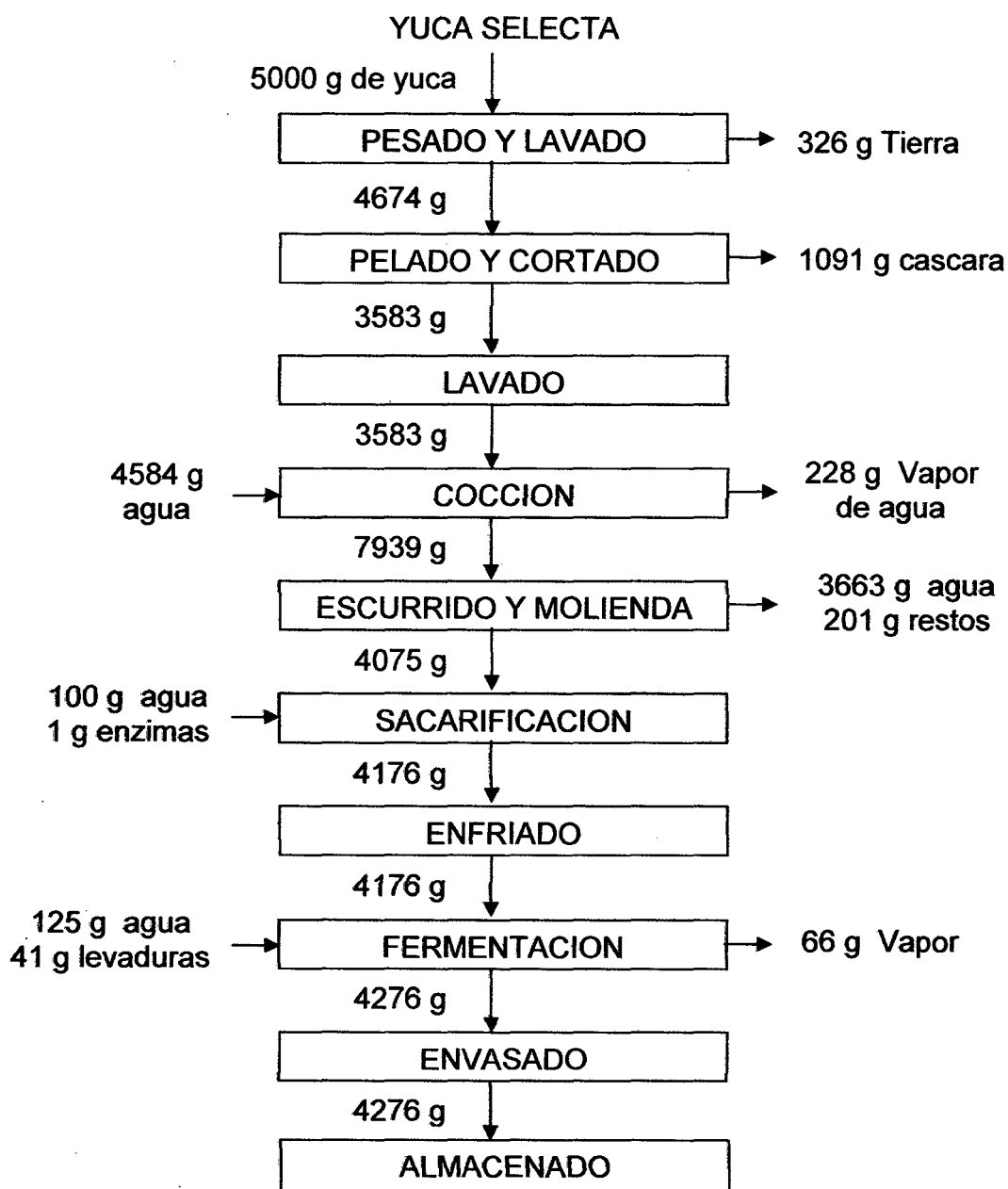


Figura 8. Balance de materia de la masa de yuca fermentada (primera elaboración)



**Figura 9. Balance de materia de la masa de yuca fermentada,
(Muestra para la simulación)**

Del cuadro 6, se puede observar que la masa de yuca fermentada tiene gran aporte de carbohidratos complejos conforme lo recomienda la O.M.S (1990) en el masato.

Los valores obtenidos, con respecto a humedad, carbohidratos, fibra, proteína y ceniza son mayores a lo obtenido por ALBORNOZ, (1998), quién reporta 84% para humedad, 11,46% para carbohidratos, 3,09% para fibra, 0,93% para proteína, 0,5% para ceniza y 0,02% para grasa, pudiendo deberse esto a la variedad de yuca utilizada y las condiciones agronómicas del suelo. La humedad registrada para cada experiencia resultó de un leve descenso desde un promedio máximo de 74,36% a un mínimo de 72,98% (Anexo 3).

Singh (1982), citado por QUEIROZ, (2001), investigó la influencia del agua, la grasa, la proteína, los carbohidratos y la temperatura en la difusividad térmica de alimentos, usando análisis estadísticos, verificó que la temperatura y el contenido de agua son los factores de mayor influencia sobre la difusividad térmica. La variación de la fracción sólida de grasa, la proteína y los carbohidratos tuvieron una pequeña influencia sobre la difusividad térmica.

Para efecto de estudio, la disminución de la humedad, que correspondió a un 1,86% de diferencia entre el promedio mayor y el menor (Figura 9), se asumió como una variación natural del producto,

con lo cual, para efecto de caracterización, la humedad promedio de las muestras presentó para la masa de yuca fermentada un valor de 73,71% con una desviación estándar de $\pm 0,54\%$ (Anexo 3).

Se analizó el comportamiento que experimenta la disminución de la humedad, tomando el contenido de humedad para la primera repetición como referencia (Figura 10).



Figura 10. Humedad de las muestras obtenidas en las diferentes repeticiones.

Al ocurrir un cambio simultáneo en la disminución de la cantidad de agua o el aumento del volumen en el alimento. A consecuencia de ello, las propiedades térmicas también varían (Rao *et al.*, 1975, citado por SANTOS, 2004).

2. Análisis Físicoquímico

Los resultados del análisis físicoquímico de la masa de yuca fermentada se muestran en el Cuadro 7.

Cuadro 7. Análisis fisicoquímico de la masa de yuca fermentada.

COMPONENTES	CANTIDAD
Densidad (g/cm ³)	1,07387
Acidez titulable (%)	1,1228
pH	4,046
Grado alcohólico (°GL)	9,50
Sólidos solubles (°Brix)	21,83

La mayor producción de etanol en el caso de la fermentación con levadura se debe a la especificidad que tiene ésta para consumir hexosas y producir alcohol, MANRIQUE, (1978) señala que la levadura de pan es recomendable para la producción de bebidas alcohólicas. El valor del pH está en un punto donde todos los microorganismos puedan desarrollarse sin afectarse unos a otros, tal como lo demostró: Ngaba y Lee, (1979), citado por ALBORNOZ; (1998), quien recomendó la fermentación tradicional de la yuca en África a pH de 3,65 a 3,95. En la medición de la concentración de sólidos solubles (medidos en °Brix), se observó una relación inversa en relación con el contenido de humedad de la muestra. Los análisis estadísticos mostraron que no hay una diferencia significativa entre las mediciones correspondientes a cada muestra, por tanto la variación existente en la masa se asume como natural y propia de ella. Los azúcares reductores se deben al desdoblamiento del almidón en glucosa y maltosa por la alfa-amilasa, azúcares fermentables que hacen posible la fermentación, por actuar sobre la glucosa las levaduras y posteriormente sobre la maltosa siempre y cuando el

aporte de glucosa se haya agotado (ALBURQUEQUE, 1969; HANSEN, 1978; CHARLEY, 1986).

D. DIFUSIVIDAD TÉRMICA DE LA MASA DE YUCA FERMENTADA

1. Pruebas preliminares

Los resultados encontrados en la investigación mostraron repetibilidad en los diferentes valores de difusividad térmica y comparadas con la teoría dieron valores cercanos al de los alimentos. Por tanto, como el método proporcionó valores cercanos entre repeticiones, se asumió como válido para la evaluación de la masa de yuca fermentada. El método para determinar la difusividad es válido para productos donde la transferencia de calor se realiza principalmente por conducción, para el caso de la presente investigación correspondieron valores: máximo de $1,5416 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$ y mínimo de $1,32327 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$ (Anexo 4) situada dentro de los valores de difusividad térmica de la mayoría de los alimentos.

2. Difusividad térmica en la masa de yuca fermentada en los diferentes tratamientos

a. Difusividad térmica en el tratamiento a 74,36% de humedad.

El tratamiento a 74,36%, mostró una difusividad térmica máxima de $1,32265 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$ con un promedio de $1,30956 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$, este promedio resultó ser el más bajo de todos los tratamientos como se esperaba, puesto que a menor % humedad es menor la

velocidad de transferencia de calor. En la Figura 11 se grafican las repeticiones registradas del tratamiento.

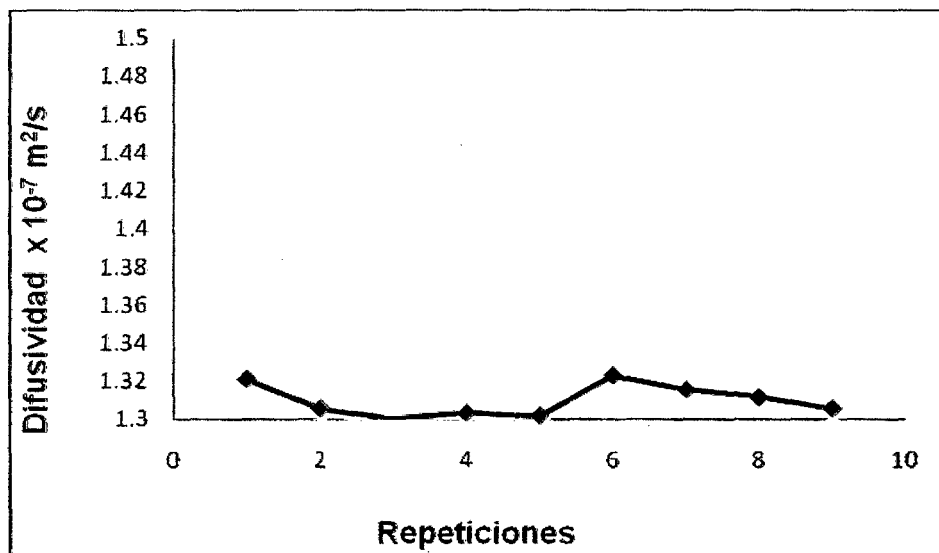


Figura 11. Difusividad de los tratamientos a 74,36% de humedad

b. Difusividad térmica en el tratamiento a 77,5 % de humedad.

El tratamiento a 77,5 %, en las 9 repeticiones, mostró un promedio de $1,3312 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$ con un mínimo de $1,32483 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$ y un máximo de $1,33836 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$. En la Figura 12 se grafican las repeticiones registradas del tratamiento.

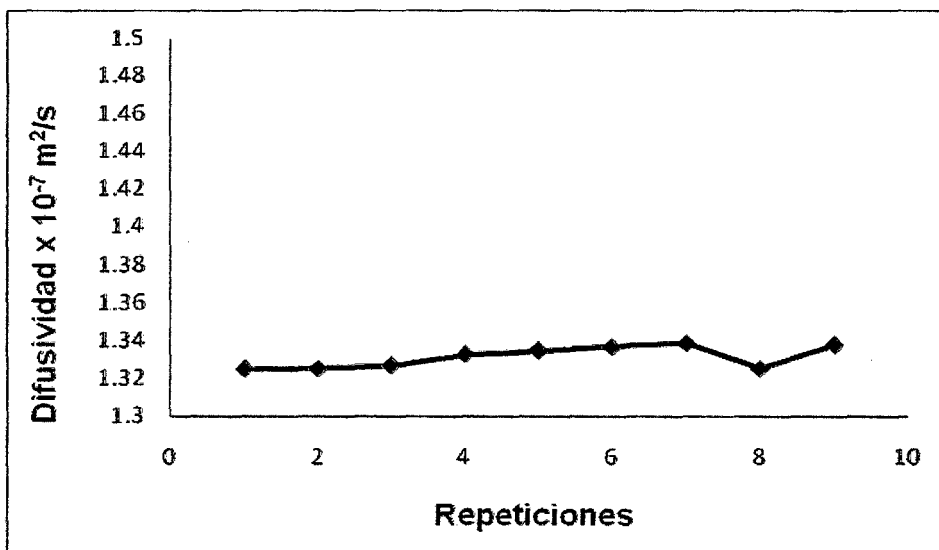


Figura 12. Difusividad de los tratamientos a 77,5% de humedad

c. Difusividad térmica en el tratamiento a 80% de humedad.

El tratamiento a 80%, en las 9 repeticiones, mostró un promedio de $1,34893 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$, con un mínimo de $1,3411 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$ y un máximo de $1,35392 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$. Es importante resaltar que comienza a incrementarse la velocidad de transferencia de calor, en la masa de yuca fermentada, frente a los tratamientos anteriores. En la Figura 13 se grafican las repeticiones del tratamiento.

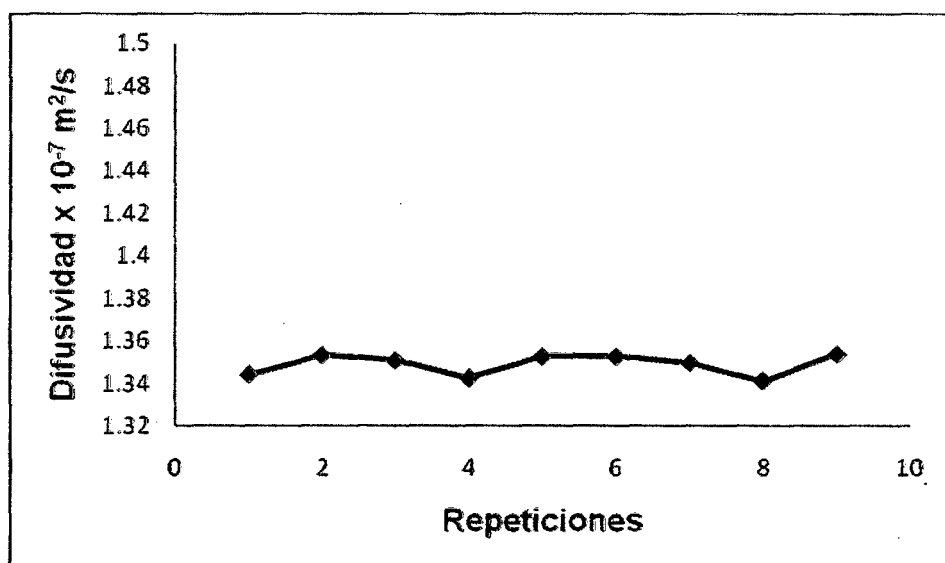


Figura 13. Difusividad de los tratamientos a 80% de humedad

d. Difusividad térmica en el tratamiento a 82,5% de humedad.

El tratamiento a 82,5% de humedad, mostró un promedio de difusividad térmica de $1,36223 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$, con un mínimo de $1,35529 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$ y un máximo de $1,36698 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$, mostrando un aumento de la velocidad de transferencia de calor en la masa de yuca fermentada (Figura 14).

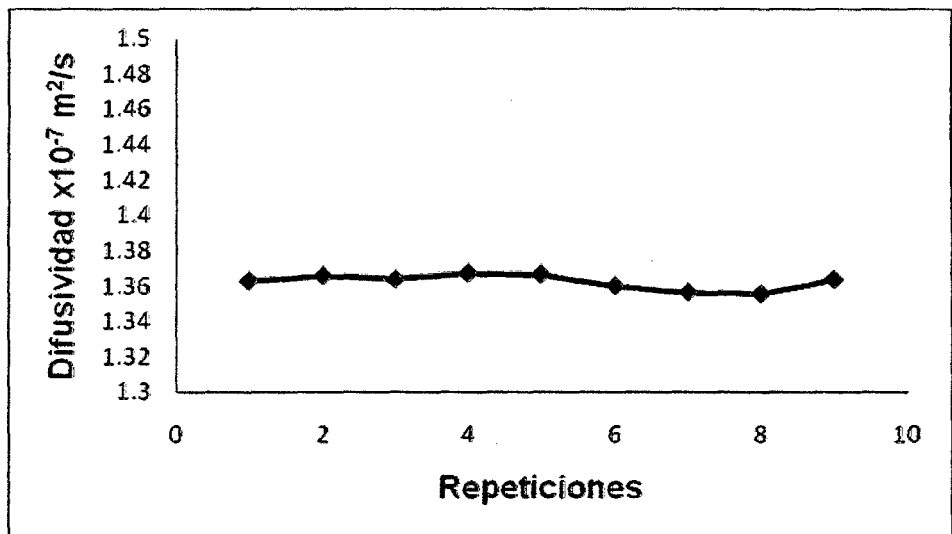


Figura 14. Difusividad de los tratamientos a 82,5% de humedad

e. Difusividad térmica en el tratamiento a 85% de humedad.

El tratamiento a 85%, arrojó un promedio de $1,3808 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$, con mínimo de $1,36839 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$ y máximo de $1,38896 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$ (Figura 15).

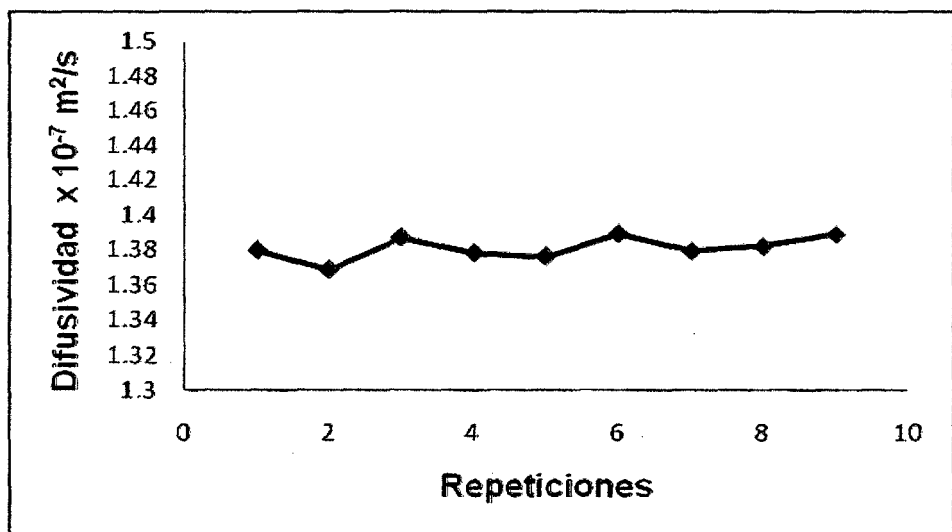


Figura 15. Difusividad de los tratamientos a 85% de humedad

f. Difusividad térmica en el tratamiento a 87,5% de humedad.

El tratamiento a 87,5%, con 9 repeticiones, registró un promedio de $1,40204 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$, con un mínimo de $1,39599 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$ y un máximo de $1,41161 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$, se observa una diferencia entre los promedios de difusividad térmica de los tratamientos, siendo los promedios más altos los cercanos a 95%. Es importante mencionar que el aumento en la difusividad térmica presenta un incremento notorio en lo descrito en los tratamientos anteriores, ver Figura 16.

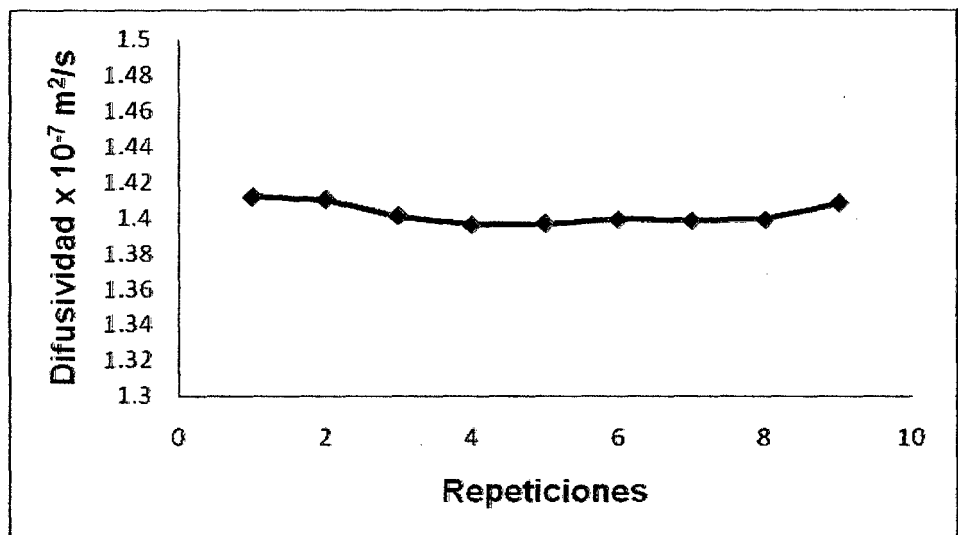


Figura 16. Difusividad de los tratamientos a 87,5% de humedad

g. Difusividad térmica en el tratamiento a 90% de humedad.

Este tratamiento, a 90%, registro un promedio de $1,4156 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$, con un mínimo de $1,41201 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$ y un máximo de $1,41987 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$. En la Figura 17 se muestran las repeticiones y la tendencia de ellas.

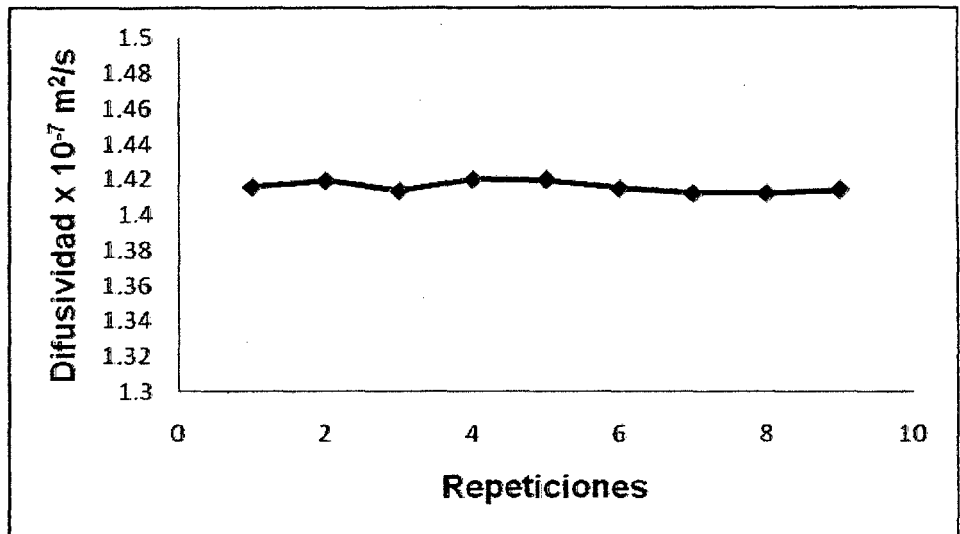


Figura 17. Difusividad de los tratamientos a 90% de humedad

h. Difusividad térmica en el tratamiento a 92,5% de humedad.

Este tratamiento, a 92,5%, registró un promedio de $1,42922 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$, con un mínimo de $1,423 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$ y un máximo de $1,44074 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$. Este promedio de difusividad térmica presentó un aumento notorio frente a los tratamientos anteriores. En la Figura 18 se muestran las repeticiones y la tendencia de ellas.

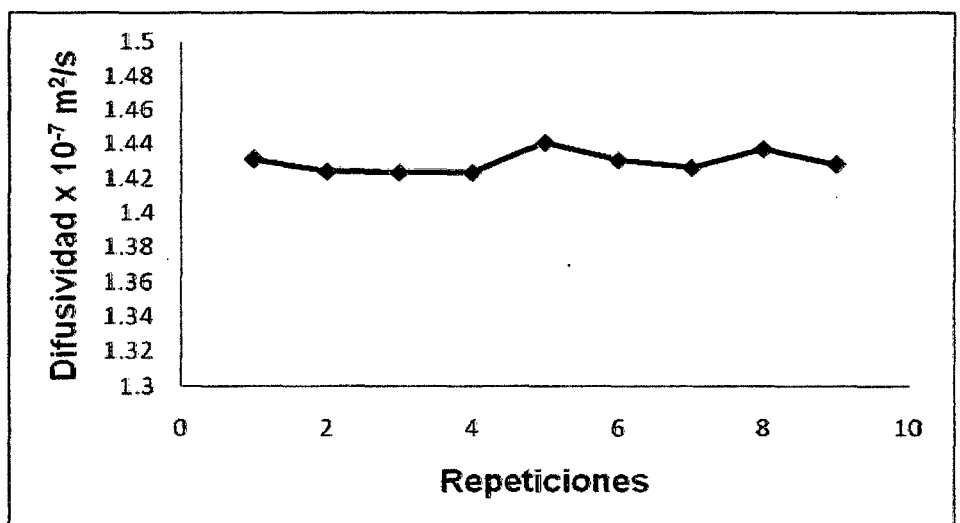


Figura 18. Difusividad de los tratamientos a 92,5% de humedad

i. Difusividad térmica en el tratamiento a 95% de humedad.

El tratamiento, a 95%, registró un promedio de $1,477 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$, con un mínimo de $1,46028 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$ y un máximo de $1,50398 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$. Es importante mencionar que el aumento en la difusividad térmica presenta un incremento a lo descrito en los tratamientos anteriores. En la Figura 19 se muestran las repeticiones y la tendencia de ellas.

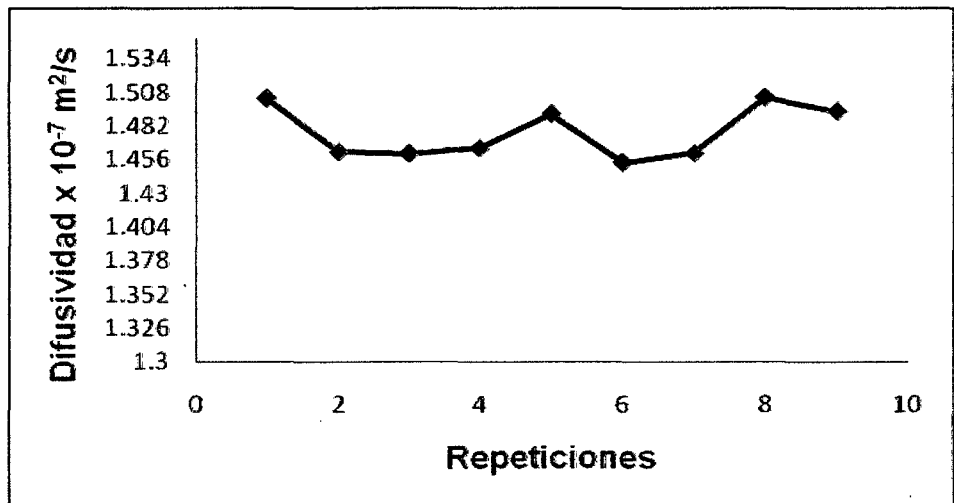


Figura 19. Difusividad de los tratamientos a 95% de humedad

La fuerza impulsora ($T_s - T_c$), juega un rol importante en lo referido al desarrollo del experimento, dado que en las experiencias que presentaron una humedad mayor, presentaban una mayor fuerza impulsora, además se observa que a medida que el tratamiento se hace más drástico disminuye la resistencia a la transferencia del calor, a diferencia de los tratamientos a humedades más bajas donde la resistencia a la transferencia del calor es mayor y el valor de la difusividad disminuye.

Como se presenta en la investigación hay un aumento de la difusividad térmica en la masa de yuca fermentada, con la particularidad que se presenta una velocidad de transferencia de calor, casi constante en los tratamientos con una zona entre las humedades de 77,5 a 82,5%. El aumento más importante se manifiesta entre 85 a 95% y es aquí donde se ve claramente como la transferencia de calor se realiza con mayor rapidez a medida que la oposición de la masa de yuca fermentada diluida es menor por la mayor concentración. En el Cuadro 8 se indican los valores promedio obtenidos.

Cuadro 8. Valores experimentales de difusividad térmica promedio en la masa de yuca fermentada.

Humedad (%)	Difusividad térmica promedio x 10^{-7} m²/s	Desviación estándar x 10^{-10} m²/s
74,36	1,30956	± 8,38781
77,5	1,3312	± 5,80188
80	1,34893	± 5,07779
82,5	1,36223	± 4,24011
85	1,3808	± 6,65302
87,5	1,40204	± 6,07615
90	1,4156	± 3,18002
92,5	1,42922	± 6,27055
95	1,477	± 2,03564

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).

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 (RODRIGUEZ, 2001).

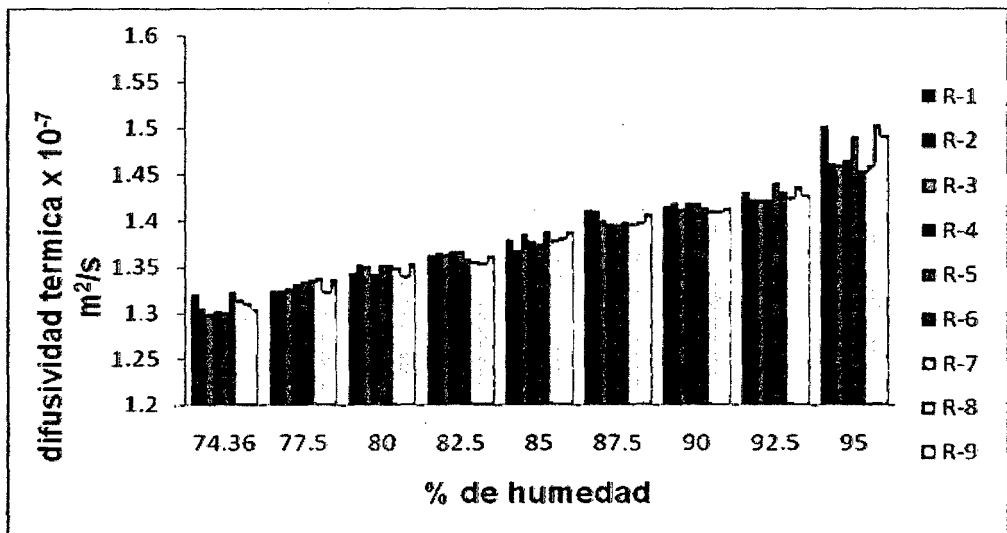
Cuadro 9. Difusividad térmica en diferentes alimentos

FRUTOS	α (x 10 ⁻⁷ m ² /s)	FUENTES
Manzana	1,25	HAYES (1992)
Zumo de manzana	1,37	HAYES (1992)
Compota manzana	1,40	HAYES (1992)
Zumo de cereza	1,37	HAYES (1992)
Agua	1,60	HAYES (1992)
Plátano	1,42	HAYES (1992)
Fresa	1,27	HAYES (1992)
Cereza	1,32	HAYES (1992)
Aguacate	1,54	HAYES (1992)
Judías horneadas	1,68	HAYES (1992)
Zumo de fresa	1,39	HAYES (1992)
Masa de yuca fermentada	1,30956 - 1,477	PRESENTE TRABAJO

Los valores de las difusividades térmicas hallados en la masa de yuca fermentada son valores semejantes comparados con las difusividades térmicas de las pulpas de frutas, hallados en los datos teóricos, según se muestra en el Cuadro 9.

3. Comportamiento de la difusividad térmica frente a las variaciones de humedad.

Como forma de analizar el comportamiento de la difusividad térmica en los 9 tratamientos con sus respectivas repeticiones, se observó el comportamiento que experimenta ésta frente a la variación de la humedad (Figura 20).



R-1, R-2, R-3, R-4, R-5, R-6, R-7, R-8, R-9 son las repeticiones.

Figura 20. Comparación de las repeticiones en la determinación de la difusividad térmica

El gráfico muestra como varía el valor de la difusividad térmica a medida que va aumentando la humedad en cada tratamiento. Mediante este análisis se puede encontrar el rango de fluctuación que

experimenta la masa de yuca fermentada al estar sometida a distintos porcentajes de humedad, de esta forma, se logra encontrar la variación de la difusividad térmica que experimenta la masa de yuca fermentada y el rango donde se encuentra el valor promedio de dicha propiedad. Las experiencias realizadas a diferentes porcentajes de humedad reflejan un comportamiento distinto a medida que va siendo más drástico el tratamiento, llegando a una humedad del 95 % cercano al del agua (Figura 21).

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

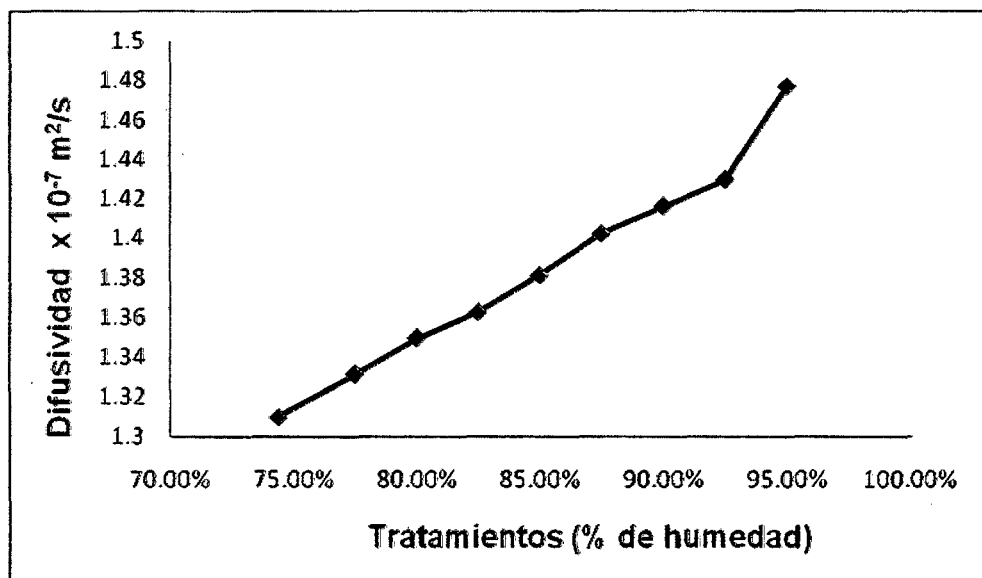


Figura 21. Promedio de la difusividad térmica en función a la humedad del masato.

En relación con la concentración en las soluciones de la masa de yuca fermentada, se observó 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 (Tschubik y Maslow, 1973, citado por MUÑOZ, 2002).

Los tratamientos a humedades de 95 %, presentaron un alza notoria en el valor difusividad térmica. Esto puede deberse a que la masa de yuca fermentada comienza a experimentar un cambio en su consistencia debido, posiblemente, a una modificación en su estructura (posible ruptura molecular); si se asume una ruptura molecular puede que presente características similares al agua y por ende un incremento en la propagación del calor.

Los análisis estadísticos realizados a todas las repeticiones muestran que los valores de difusividad térmica siguen una distribución normal, sin embargo, algunos de estos valores se encontraron fuera del rango por lo que fueron descartados para no alterar la tendencia de los datos, debido a posibles fuentes de errores tal como la acumulación de aire cerca de la sonda. 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 alteró la rapidez de la propagación del calor.

Al realizar un análisis de varianza (ANOVA) se observa que existe diferencia estadísticamente significativa entre los valores de difusividad térmica de las diferentes concentraciones (diluciones), con un rango de confianza del 95 % (Anexo 5); esto se explica que existe una dependencia de la difusividad térmica con la humedad, dado que como se observa en los valores mostrados (Cuadro 9), la difusividad térmica es mayor en soluciones cercanas al 100 % de humedad, con un contenido de sólidos menores (cercaos al 0 %), lo que muestra una relación inversa entre la concentración y la difusividad térmica.

Según la prueba de Tukey LSD con un nivel de confianza del 95 % (Anexo 6), se detectaron diferencias significativas en el valor de difusividad térmica entre los diferentes tratamientos.

Esto corresponde al resultado de los grupos bien definidos. (Con un nivel de confianza del 95%), se detectaron diferencias entre los valores de difusividad térmica, encontrando grupos que correspondieron a las distintas humedades de 74,36%; 77,5%; 80%; 82,5%; 85%; 87,5%; 90%; 92,5% y 95%. Con ello se determina que existe diferencia estadísticamente significativa entre tratamientos. Para efectos prácticos en la masa de yuca fermentada, es importante

rescatar que la transferencia de calor no presenta diferencia en rapidez de calentamiento de 74,36 a 92,5 % de humedad, con lo cual, para tratamientos de escaldado de la masa, se puede recomendar trabajar a diluciones de 80 - 90 %, considerando que se presentaría el mismo efecto con humedades mas altas y, sin mencionar una optimización y reducción de energía en los equipos (al trabajar a menor dilución), teniendo en cuenta la concentración optima.

4. Simulación de la difusividad térmica del masato (masa de yuca fermentada diluida).

Con lo datos de difusividades a diferentes porcentajes de humedad, se obtuvo la ecuación que nos permitiría la determinación de la difusividad térmica del masato en forma teórica (figura 22).

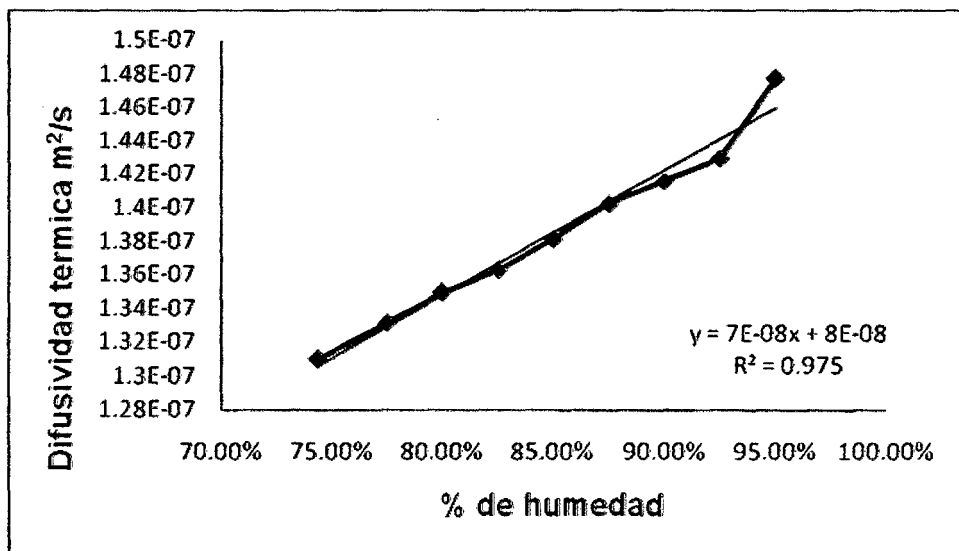
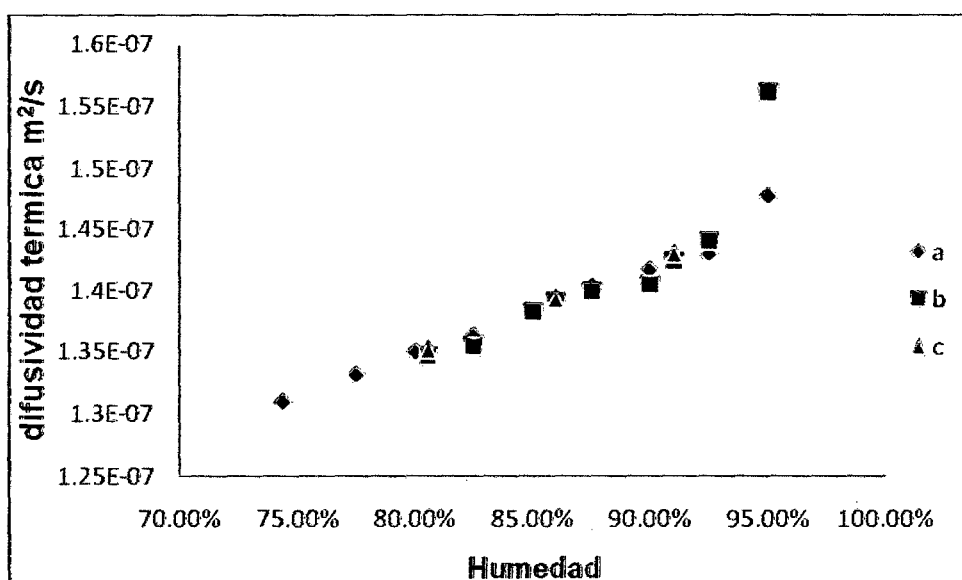


Figura 22. Promedio de la difusividad térmica en función de la humedad para determinar la ecuación.

Esto para condiciones del medio de calentamiento, a temperaturas del agua entre 24-97 °C (ambiente a ebullición).

Es importante destacar que la masa de yuca fermentada diluida, supuestamente va experimentando una alteración en su estructura, a medida que el tratamiento es a humedad más alta, posiblemente con esto la tendencia que experimenta la velocidad de transferencia de calor va en aumento, lo cual es muy semejante a la curva presentada para el agua en donde la distancia de las curvas (externa e interna) es mucho menor según la humedad vaya en aumento.

Se eligieron valores promedios de difusividad térmica a humedades de: 80,56%, 86% y 91% (Anexo 7), (Figura 23) y se simularon datos teóricos de la difusividad térmica con la ecuación de la curva.



Donde: a = Difusividades térmicas para la ecuación de la curva; b = difusividades térmicas a 80,56%, 86%, 91% de humedad; c = difusividades térmicas teóricas obtenidos con la ecuación de la curva a 80,56%, 86%, 91% de humedad.

Figura 23. Comparación de difusividades térmicas con muestras experimentales y el teórico hallado.

La velocidad de la transferencia de calor no presenta diferencia en la rapidez de calentamiento en un medio a humedades entre 85 a 95%, por lo que para tratamientos de escaldado, se recomienda trabajar, por ejemplo, a humedades de 85% en lugar de 95%, considerando que se presentaría el mismo efecto para humedades más altas (semejante al agua) y se evitaría un daño innecesario a la masa; sin mencionar una optimización y reducción de energía en los equipos.

Los análisis estadísticos mostraron que existe diferencia significativa entre los valores de difusividad térmica hallados en la muestra de masa de yuca fermentada a diferentes diluciones.

En el Cuadro 10 se presentan los datos usados para la simulación y la comparación entre los resultados obtenidos de difusividad experimental y teórico (aplicando la ecuación de la recta obtenida).

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 1%, dando validez a la metodología aplicada (GUZMAN, 1975). Una conducta similar fue observado por: Hu y Mallikarjunan (2004), citado por KUROZAWA, (2008) trabajando con ostras; por: Telis *et al.* (1998), citado por KUROZAWA, (2008) para el jugo de naranja brasileña y por: Singh y Goswami (2000), citado por KUROZAWA, (2008) para la semilla del comino.

**Cuadro 10. Valores hallados en la simulación de la difusividad
térmica de la masa de yuca fermentada**

DATOS USADOS Y CALCULADOS EN LA SIMULACIÓN			
Ecuación (línea de tendencia)	$Y = 7,44556 \times 10^{-8}X + 7,51722 \times 10^{-8}$		
Pendiente de la curva	$7,44556 \times 10^{-8}$		
Intersección	$7,51722 \times 10^{-8}$		
% de humedad elegidas	80.56	86	91
α experimental (m ² /s)	$1,34568 \times 10^{-7}$	$1,39021 \times 10^{-7}$	$1,4238 \times 10^{-7}$
α teóricos, (m ² /s)	$1,35154 \times 10^{-7}$	$1,39204 \times 10^{-7}$	$1,42927 \times 10^{-7}$
% de error	0,43341	0,13177	0,38242
% de error absoluto (\pm 5%)	-0,43341	-0,13177	-0,38242

Por consiguiente, se propone la ecuación polinómica obtenida para predecir la difusividad térmica en la masa de yuca fermentada y productos similares.

$$Y = 7,44556 \times 10^{-8}X + 7,51722 \times 10^{-8} \dots\dots\dots (13)$$

Donde:

Y: Difusividad térmica calculada (m²/s)

X: % humedad del producto.

V. CONCLUSIONES

1. En la masa de yuca fermentada, se encontró una humedad de 74,36% con desviación estándar de $\pm 0,19\%$; proteínas, 1,17% con desviación estándar de $\pm 0,0\%$; extracto etéreo, 0,03% con desviación estándar de $\pm 0,0\%$; ceniza, 0,96% con desviación estándar de $\pm 0,012\%$; fibra cruda, 4,18% con desviación estándar de $\pm 0,062\%$; materia orgánica, 24,68%; carbohidratos, 19,3%.
2. La masa de yuca fermentada presentó: $21,83 \pm 0,7638$ °Brix; densidad, $1,07387 \text{ g/cm}^3$ con desviación estándar de $\pm 0,001 \text{ g/ml}$; acidez titulable, 1,1228% en ácido láctico con desviación estándar de $\pm 0,01757$; pH, 4,046, con desviación estándar de $\pm 0,3512$; grados alcohólicos, 9,5 °GL, con desviación estándar de $\pm 0,3606$.
3. La difusividad térmica en la masa de yuca fermentada diluida mostró dependencia con la humedad. La tendencia de la difusividad térmica a porcentajes de humedad mayores es muy similar a la presentada para el agua.
4. Los valores obtenidos de difusividad térmica, se encuentran en el rango especificado para frutas y vegetales. Presentó difusividad térmica de $1,31 \pm 0,0075 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$ a 74.36%; de $1,33 \pm 0,0056 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$ a 77,5%; de $1,35 \pm 0,0045 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$ a 80%; de $1,36 \pm 0,0039 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$ a 82,5%; de $1,38 \pm$

0,006 x 10⁻⁷ m²/s a 85%; de 1,40 ± 0,0059 x 10⁻⁷ m²/s a 87,5%; de 1,42 ± 0,0029 x 10⁻⁷ m²/s a 90 %; de 1,43 ± 0,0057 x 10⁻⁷ m²/s a 92,5%; de 1,48 ± 0,018 x 10⁻⁷ m²/s a 95%.

5. La ecuación polinómica obtenida para predecir la difusividad térmica (Y) en la masa de yuca fermentada en función a la humedad (X) es la siguiente:

$$Y = 7,44556 \times 10^{-8}X + 7,51722 \times 10^{-8}$$

VI. RECOMENDACIONES

- 1. Caracterizar y determinar la vida útil del masato con distintas variedades de yuca para complementar la investigación para una producción a escala industrial.**
- 2. Continuar con la investigación para determinar las propiedades termofísicas del masato elaborado con alfa-amilasa bacteriana y preparaciones de "masato" hechas por comunidades de los diversos departamentos de la Amazonía peruana.**
- 3. Realizar estudios preliminares de factibilidad de la aplicación del presente trabajo en el diseño de maquinarias y procesos para una producción industrial de bebidas fermentadas.**
- 4. Realizar estudios de la sucesión microbiana responsable de la fermentación espontánea de la masa de yuca, base de la preparación del masato, para interpretar adecuadamente el papel de los microorganismos y poder trasladar este conocimiento a fermentaciones dirigidas.**

VII. BIBLIOGRAFÍA

ALBORNOZ, J. 1998. Utilización de una alfa-amilasa bacteriana y levadura de panificación en la elaboración de masato; Tesis de Grado UNAS; Tingo María-Perú; 121 p.

ALBURQUEQUE, M. 1969. *Â Mandioca na Amazonía*. Belem-Brasil. Superrintendencia de Desenvolvimento da Amazonía.

AMIGO, P. 2000. *Termotecnia: Aplicaciones Agroindustriales*. Ediciones Mundi Prensa. Madrid-España. 163 pag.

A.O.A.C. 1980. *Association of Official Analytical Chemists, Official Methods of Analysis of the Association of Official Analytical Chemists*. Washington, D.C., U.S.A, 13 ed.

..... 1995. *Association Of Official Analytical Chemists. Oficial Methods of Analysis*. Ed. Arlington. USA. 37: 2

AZARANG, M. y GARCÍA, D. E. 1996. *Simulación y Análisis de Modelos Estocásticos*. Mc-GrawHill Interamericana. México.

BARBERÁ, O. Y SANJOSÉ, V. 1990. *Juegos de Simulación por Ordenador: un útil para la enseñanza a todos los niveles*. *Enseñanza de las Ciencias*, 8 (1), 46-51.

CHARLEY, H. 1986. *Tecnología de los Alimentos*. Editorial Limusa. México. 767 p.

DENEVAN, W.; TREACY, M. 1990. *Purmas Jóvenes Manejadas en Brillo Nuevo*. En: *Agroforestería Tradicional en la Amazonía Peruana*.

- Documento 11. Lima (Perú): Centro de Investigación y Promoción Amazónica. 31-108 p.
- ECHEVERRY, D.; PAEZ, H. y MESA, H. 2008. Simulación digital de procesos de construcción de estructura en concreto: casos de estudio práctico en Bogotá. Rev. Ing. constr., vol.23, no.2, p.64-71. ISSN 0718-5073.
- EVANGELISTA, I.; De MELO, A.; FEITOSA, R. 2003. Propiedades Termofísicas Da Polpa De Umbu. Revista Brasileira de Produtos Agroindustriais, Campina Grande, Especial, n.1, p.31-42,
- FELLOWS, P., 1988. Tecnología del Procesado de los Alimentos: principio y Practica. Editorial Acribia. Zaragoza-España. 549 p.
- FENNEMA O.; KAREL, M.; LUND, D. 1981. Introducción a la Ciencia de los Alimentos. Editorial Reverte S. A. Barcelona-España. 474 p.
- GUZMAN, M. 1975. El Error Experimental en la Investigación Científica: Cuantificación de Elementos Contribuyentes. División de Estadística, Instituto de Nutrición de Centro América y Panamá (INCAP), Guatemala.
- HART, L.; FISHER, J. 1984. Análisis Moderno de los Alimentos. Editorial Acribia. Zaragoza-España. 620 p.
- HAYES, G. D. 1992. Manual de Datos Para la Ingeniería de los Alimentos. Editorial Acribia. Zaragoza-España. 182 p.
- IBARZ, A.; BARBOSA, G.; GARZA, S. 2000. Métodos Experimentales en la Ingeniería Alimentaria. Editorial Acribia S. A. Zaragoza - España. 250 p
- INSTITUTO DE INVESTIGACIÓN DE LA AMAZONIA PERUANA (IIAP). 2001. Diversidad de Yuca (*Manihot esculenta Crantz*). Documento Técnico N° 28 Febrero 2001. Iquitos - Perú

- JIMENEZ G.; KASAHARA I. 1991. Propiedades Termofísicas de la Pulpa de Merluza en Función del Contenido de Humedad. *Alimentos* 16, v 3: p. 15 - 22.
- KREITH F.; BOHN M. 2001. Principios de transferencia de Calor. Editorial Color S. A. México. 700 Pág.
- KUROZAWA, L.; PARK, K.; HUBINGER, M.; MURR, F.; AZOUBEL, P. 2008. Thermal conductivity and thermal diffusivity of papaya (*Carica papaya* L.) and cashew apple (*Anacardium occidentale* L.). *Braz. J. Food Technol.*, v. 11, n. 1, p. 78-85,
- LEUNG, W.; FLORES, M. 1961. Tabla de Composición de Alimentos Para Uso en América Latina. Instituto de Nutrición de Centroamérica y Panamá. Guatemala. 132 pp.
- MANRIQUE, J. 1978. Flora Microbiana de la Chicha de Jora y Fermentación Experimental de la Levadura Seleccionada. Tesis. Programa de Farmacia. UNMSM. 105 p.
- Mc CABE, W.; SMITH, R.; HARRIOT, P. 1991. Operaciones básicas de Ingeniería Química. Mc Graw-Hill, Inc. Madrid. España. 1112p.
- MEJIAS A.; PALMA J. 2001. Simulación de procesos con disoluciones altamente concentradas (1ª Reunión de Usuarios de EcosimPro, UNED). Madrid-España.
- MONTALDO, A. 1983. Cultivo de Raíces Y Tubérculos Tropicales. Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura. San José – Costa Rica. 300 pp

- MUÑIZ, M.; QUEIROZ J.; FIGUEIRÊDO, R.; DUARTE, M. 2006. Caracterización Termofísica de la Pulpa de *Bacuri*. Ciencia y Tecnología Alimentaria. *Centro de Ciencias y Tecnología de la Universidad Federal de Campiña Grande (UFCG)*. Brasil. 26(2).1-368 pp.
- 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.
- NAAR, C. 1999. Cocinas Regionales Peruanas: Amazonía. Escuela profesional de Turismo y Hotelería. USMP. Lima - Perú
- NUÑEZ, M.; GARCILAZO, J.; RUIZ, A. 2005. Evaluación de Esquemas de Diferencia Finita Para la Construcción de las Cartas de Gurney-Lurie. *Revista Mexicana de Física*, diciembre, año/vol. 51, número enseñanza 2. Sociedad Mexicana de Física. Distrito Federal, México. pp. 74-83
- ORGANISMO MUNDIAL DE LA SALUD (OMS). 1990. Dieta, Nutrición y Prevención de Enfermedades Crónicas. Serie de Informes Técnicos. 797. Graficas Reunidas. España. 223 p.
- POTTER, N. y HOTCHKISS, J., 1995. La Ciencia de los Alimentos. Ediciones Karla. México. 749 p.
- QUEIROZ, G. 2001. Determinação de Propriedades Termofísicas do Pao tipo Francês Durante o Processo de Assamento. Tese do Título de Mestre em Engenharia. Universidade de Sao Paulo. Brasil. P. 179.
- RODRIGUES, A.; RODRIGUES, P.; FREITAS, C.; AYALA, T. 2001. Behavior Evaluation of the Physical and Thermophysical Properties of the Passion

Fruit (*passiflora edulis sims*) Pulp and Pineapple (*ananas comosus l.*) Pulp at Different Temperatures. 2nd Mercosur Congress on Chemical Engineering 4th Mercosur Congress on Process Systems. Universidade Federal do Pará – UFPA. Brasil.

SALAS, S.; GUZMÁN, Y.; AQUINO, S. 1996. La Harina de la Yuca producida en el Perú y sus Perspectivas Para el Desarrollo. Centro Internacional de Agricultura Tropical. Cali-Colombia. p. 25-29.

SANTOS, G. 2004. Propriedades Físicas, Termofísicas y Físico-Químicos de Pure de Banana Adicionado Açucar. Tese de Doutorado em Ciência dos Alimentos. Universidade Federal de Lavras-Minas Gerais. Brasil.

SEDANO, J. 2006. Selección de Cepas Nativas de *Lactobacillus* con Actividad Inhibitoria y Tolerantes al Etanol Aisladas de "Masato". Tesis Para Optar al Título Profesional de Biólogo con Mención en Microbiología y Parasitología. Universidad Nacional Mayor de San Marcos. Lima

SHANNON, R. 2003. Simulación de sistemas diseño, desarrollo e implantación. Editorial Trillas. México. 427 p.

SHARMA, S.; MULVANEY, S.; RIZVI, S., 2003. Ingeniería de los Alimentos: Operaciones Unitarias y Prácticas de Laboratorio. Editorial Limusa-Willey. México. 348 p.

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

SYBASE. 2004. "Nueva herramienta de diseño. sybase power designer 10.0". Notas de Prensa. Madrid. En línea: <http://www.sybase.com/powerdesigner>.

THIEM, M. 1982. Manual del Ingeniero: Termotecnia. Ediciones Urmo S. A. Bilbao-España. 280 p.

VALENTE, M.; NETO, A. 1992. El ordenador y su contribución a la superación de las dificultades del aprendizaje en mecánica. Enseñanza de las Ciencias, 10 (1), p. 80-85.

VASQUEZ, W.; PEZO, N., 1990. Comparativo de Rendimiento de Ocho Clones de Yuca (*Manihot Esculenta Crantz*) En: Estudios Experimentales en Yuca. Iquitos (Perú): Universidad de la Amazonía Peruana. pp. 1-4.

ANEXO

**Anexo 1. Datos de tiempo y temperatura obtenidos en la validación en el
incremento de la temperatura con el tiempo**

TIEMPO (Minutos)	PRIMERA PRUEBA		SEGUNDA PRUEBA	
	Temperatura acumulada (°C)	Temperatura requerida (°C)	Temperatura acumulada (°C)	Temperatura requerida (°C)
0	24,5	24,5	23,9	23,9
1	27,8	27,5	27,0	26,9
2	31,0	30,5	30,1	29,9
3	34,5	33,5	33,0	32,9
4	37,0	36,5	36,0	35,9
5	40,8	39,5	39,2	38,9
6	43,8	42,5	42,2	41,9
7	46,8	45,5	45,5	44,9
8	49,9	48,5	48,0	47,9
9	53,0	51,5	51,2	50,9
10	55,9	54,5	54,1	53,9
11	58,9	57,5	57,1	56,9
12	61,8	60,5	60,0	59,9
13	64,8	63,5	63,0	62,9
14	67,8	66,5	65,9	65,9
15	70,5	69,5	68,5	68,9
16	73,0	72,5	71,1	71,9
17	75,9	75,5	73,8	74,9
18	78,5	78,5	76,0	77,9
19	81,0	81,5	78,7	80,9
20	83,5	84,5	81,0	83,9
21	86,0	87,5	83,5	86,9
22	88,5	90,5	85,5	89,9
23	90,8	93,5	87,8	92,9
24	92,8	96,5	89,8	95,9
25	94,5	99,5	91,8	98,9
26	96,0	102,5	93,2	101,9
27	97,0	105,5	95,0	104,9
28			96,2	107,9

Anexo 2. Valores de difusividad térmica para las soluciones de sacarosa (60 °Brix) para la validación

Tratamientos	Concentración (°Brix)	Difusividad Térmica ($\times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$)	Difusividad Térmica Promedio ($\times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$)
1	60	2,4633	
2	60	2,5593	2,57
3	60	2,6796	

Anexo 3. Disminución de humedad en la masa de yuca fermentada

Repeticiones	Humedad promedio (%)	Desviación estándar (%)
1	74,36	
2	74,31	
3	74,25	
4	73,93	
5	73,72	$\pm 0,54$
6	73,51	
7	73,28	
8	73,05	
9	72,98	

Anexo 4. Valores de difusividad térmica halladas en el masato (masa de yuca fermentada diluida) para la validación (prueba preliminar)

DIFUSIVIDADES TERMICAS (m²/s) EN MASA DE YUCA FERMENTADA

Tratamientos	Diluciones (% de humedad)	Difusividad térmica (x 10 ⁻⁷ m ² /s)
1	74,36	1,32327
2	77,5	1,32335
3	80,0	1,35424
4	82,5	1,35462
5	85,0	1,39137
6	87,5	1,3914
7	90,0	1,41179
8	92,5	1,45351
9	95,0	1,54916

Anexo 5. Análisis estadístico de las difusividad térmica de la masa de yuca fermentada (anova)

Fuentes de Variación (F.V.)	Grados de Libertad (G.L.)	Suma de Cuadrados (S.C.)	Cuadrados Medios (C.M.)	F ₀
Tratamientos	8	1,98547E-15	2,48184E-16	322,4216696
Error	72	5,5422E-17	7,6975E-19	
Total	80	2,0409E-15		

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

**Anexo 6. Prueba rango Múltiple Tukey LSD para valores de difusividad
térmica del masato (masa de yuca fermentada diluida).**

COMPARACIÓN MÚLTIPLE DE DIFUSIVIDAD POR % DE HUMEDAD MÉTODO: 95,0% LSD			
% de humedad	Cuenta	LS media	Grupos homogéneos
74,36%	9	1,30956E-7	a
77,50%	9	1,33120E-7	b
80,00%	9	1,34893E-7	c
82,50%	9	1,36223E-7	d
85,00%	9	1,38081E-7	e
87,50%	9	1,40205E-7	f
90,00%	9	1,41560E-7	g
92,50%	9	1,42922E-7	h
95,00%	9	1,47700E-7	i

Anexo 7. Valores de difusividad térmica del masato (masa de yuca fermentada diluida) de la segunda muestra utilizada para la simulación.

% HUMEDAD	R1	R2	R3	PROMEDIOS (m²/s)
80,56%	1,34769E-07	1,34523E-07	1,34327E-07	1,346E-07
82,50%	1,35629E-07	1,3515E-07	1,3567E-07	1,355E-07
85,00%	1,38252E-07	1,37954E-07	1,38439E-07	1,382E-07
86,00%	1,38613E-07	1,39008E-07	1,39441E-07	1,39E-07
87,50%	1,39486E-07	1,40199E-07	1,39957E-07	1,399E-07
90,00%	1,41136E-07	1,40407E-07	1,40024E-07	1,405E-07
91,00%	1,42404E-07	1,42416E-07	1,42321E-07	1,424E-07
92,50%	1,42769E-07	1,44103E-07	1,45029E-07	1,44E-07
95,00%	1,69506E-07	1,47615E-07	1,51221E-07	1,561E-07