



# INSTITUTO POLITECNICO NACIONAL

ESCUELA NACIONAL DE CIENCIAS BIOLÓGICAS

MAESTRIA EN CIENCIAS EN ALIMENTOS

## TERMOPROCESAMIENTO DE UN PURE DE MANGO EN INTERCAMBIADOR DE CALOR DE SUPERFICIE RASPADA Y EL EFECTO SOBRE SUS COMPONENTES BIOQUÍMICOS

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL GRADO DE

MAESTRO EN CIENCIAS  
CON ESPECIALIDAD EN ALIMENTOS

P R E S E N T A :  
ING. JUAN PASCUAL RAMIREZ

DIRECTORES:

DR. TEODORO SANTIAGO PINEDA

DR. RAMÓN ARANA ERRASQUIN



MEXICO, D.F.

DICIEMBRE, 2010

El presente trabajo se realizó bajo la dirección del Dr. Teodoro Santiago Pineda y el Dr. Ramón Arana Errasquin, en las instalaciones de la Escuela Nacional de Ciencias Biológicas y las siguientes áreas del Departamento de Graduados e Investigación en Alimentos:

- Laboratorio de Ingeniería de Alimentos.
- Laboratorio de Enzimología
- Laboratorio de Evaluación Sensorial

Así como en el Departamento de Ingeniería de Alimentos de la UNAM (FES-Cuautitlán).

Durante el desarrollo de este trabajo se contó con el apoyo económico del proyecto SIP-20090715 "Caracterización integral de un intercambiador de calor de superficie raspada de escala piloto utilizando como fluido de trabajo puré de mango variedad Manila".

También se contó con las siguientes becas para estudios de maestría:

- Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT) con número de becario 219099.
- Programa Institucional de Formación de Investigadores.

## INDICE GENERAL

Indice de cuadros.....	iv
Indice de figuras.....	v
RESUMEN / ABSTRACT.....	1
I. INTRODUCCIÓN.....	2
II. ANTECEDENTES.....	4
2.1 Transferencia de calor.....	4
2.2 Intercambiador de calor de superficie raspada (ICSR).....	5
2.3 Reología de fluidos.....	8
2.3.1 Fluidos pseudoplásticos.....	9
2.4 Propiedades térmicas de los alimentos.....	11
2.4.1 Capacidad calorífica.....	11
2.4.2 Conductividad térmica.....	12
2.5 Estado del arte.....	12
2.6 Mango Manila (Manguifera indica L.).....	15
2.7 Parámetros de calidad del puré de mango.....	17
2.7.1 Acido ascórbico.....	18
2.7.2 Carotenoides y carotenos.....	19
2.7.3 Pectinmetilesterasa.....	20
III.JUSTIFICACIÓN.....	22
IV.OBJETIVOS.....	23
4.1 Objetivo general.....	23
4.2 Objetivos específicos.....	23
V.MATERIALES Y METODOS.....	24
5.1 Desarrollo experimental.....	24
5.2 Materia prima.....	27

5.3 Material de laboratorio y reactivos.....	27
5.4 Equipo.....	28
5.4.1 Intercambiador de calor de superficie raspada piloto (ICSR).....	28
5.5 Métodos.....	29
5.5.1 Determinación de vitamina C (Método de Robinson Stock, citado por Rangana 1986).....	29
5.5.2 Cuantificación de carotenos (AOAC 941.15, 1995).....	31
5.5.3 Actividad enzimática de pectinmetilesterasa (Hultin, 1948).....	32
5.5.4 Determinación teórica del coeficiente interno de transferencia de calor.....	33
5.5.5 Determinación experimental del coeficiente interno de transferencia de calor.....	34
5.5.6 Determinación de la densidad aparente.....	35
5.5.7 Determinación de la viscosidad aparente (Viscosímetro Haake RT 20).....	35
5.5.8 Determinación de la capacidad calorífica (Siebel, 1982).....	35
5.5.9 Determinación de la conductividad térmica.....	35
5.5.10 Determinación de los °Bx (NMX-F-103-1965).....	36
5.5.11 Determinación de la acidez titulable (AOAC 22.060, 1995).....	36
5.5.12 Determinación del pH (AOAC 10.035, 1995).....	37
5.5.13 Determinación de humedad (AOAC 22.013, 1995).....	37
VI. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	38
6.1 Operaciones preliminares.....	38
6.1.1 Diseño y colocación de termopares.....	38
6.1.2 Acoplamiento del cuerpo de preenfriamiento al ICSR.....	40
6.1.3 Calibración de los ejes de rotación.....	42
6.1.4 Manejo de flujos máximos y mínimos.....	45
6.2 Resultados finales.....	47

6.2.1 Caracterización de la materia prima.....	47
6.2.2 Determinación de la viscosidad.....	48
6.2.3 Temperaturas de tratamiento del puré.....	51
6.2.4 Retención de carotenos.....	52
6.2.5 Inactivación de la enzima pectinmetilesterasa.....	54
6.2.6 Cambios ocurridos en ácido ascórbico.....	56
6.2.7 Coeficiente interno de transferencia de calor experimental.....	58
6.2.8 Coeficiente interno de transferencia de calor teórico.....	62
VII. CONCLUSIONES.....	64
VIII. BIBLIOGRAFÍA.....	66
Anexo I Diagrama Ishikawa para la obtención de puré de mango Manila.....	72
Anexo II Comparación económica entre un Diseño Factorial (DF) y un Diseño Factorial Fraccionado (DFF).....	73
Anexo III Diseño factorial fraccionado obtenido con el software Minitab versión 13.....	74
Anexo IV Ejemplo de la determinación de coeficientes de transferencia de calor experimentales para el tratamiento 1.....	75
Anexo V Ejemplo de la determinación del coeficiente de transferencia de calor teórico para el tratamiento 1.....	77
Anexo VI Datos de viscosidad aparente para cada uno de los tratamientos térmicos.....	78
Anexo VII Análisis estadístico de las variables de respuesta.....	84

## INDICE DE CUADROS

<b>Cuadro 1.</b> Clasificación de los tipos de fluidos.....	8
<b>Cuadro 2.</b> Composición química del mango Manila por cada 100 g de pulpa....	17
<b>Cuadro 3.</b> Clasificación de los principales carotenoides.....	20
<b>Cuadro 4.</b> Diseño de las variables experimentales.....	25
<b>Cuadro 5.</b> Diseño experimental.....	26
<b>Cuadro 6.</b> Valores de “rpm1” para cada uno de los 3 ejes de rotación desde el 15% hasta el 100% de su capacidad de funcionamiento.....	43
<b>Cuadro 7.</b> Lecturas reales (rpm) de cada uno de los ejes de rotación con paletas raspadoras acopladas.....	44
<b>Cuadro 8.</b> Condiciones de funcionamiento de los ejes con raspadores para las condiciones de rotación planteadas en el diseño experimental.....	45
<b>Cuadro 9.</b> Caracterización del puré de mango Manila.....	48
<b>Cuadro 10.</b> Viscosidad efectiva del puré de mango Manila para cada tratamiento.....	50
<b>Cuadro 11.</b> Condiciones experimentales alcanzadas durante los diferentes tratamientos térmicos del puré de mango.....	51
<b>Cuadro 12.</b> Coeficiente interno de transferencia de calor experimental (h) para la etapa de calentamiento.....	59
<b>Cuadro 13.</b> Coeficiente interno de transferencia de calor experimental (h) para la etapa de preenfriamiento.....	60
<b>Cuadro 14.</b> Coeficiente interno de transferencia de calor experimental (h) para la etapa de enfriamiento.....	61
<b>Cuadro 15.</b> Coeficiente interno de transferencia de calor teórico (h).....	63

## INDICE DE FIGURAS

<b>Figura 1.</b> Corte transversal de un ICSR (Brennan, 1980).....	5
<b>Figura 2.</b> % de participación de los principales países productores de mango (promedio de los años 2000 a 2006).....	15
<b>Figura 3.</b> Producción nacional de mango en México para el año 2008 (participación en % de producción).....	15
<b>Figura 4.</b> Variedades de mango de mayor importancia en México para el 2008 (% de participación).....	16
<b>Figura 5.</b> Estructura del fruto de mango Manila (Samson, 1991).....	16
<b>Figura 6.</b> Molécula de ácido ascórbico.....	18
<b>Figura 7.</b> Mecanismo de acción de la PME (Whitaker, 1994).....	21
<b>Figura 8.</b> Diagrama de flujo experimental.....	24
<b>Figura 9.</b> Tipos de raspadores utilizados durante el experimento.....	25
<b>Figura 10.</b> Intercambiador de calor de superficie raspada a nivel piloto.....	29
<b>Figura 11.</b> Esquema de los termopares para tuberías de conducción de refrigerante y tuberías de conducción de aceite térmico.....	38
<b>Figura 12.</b> Ubicación de los termopares instalados para la toma de temperaturas del aceite térmico ( $t_1$ y $t_2$ ) y para las temperaturas del refrigerante etilenglicol ( $t_3$ y $t_4$ ).....	39
<b>Figura 13.</b> Instalación de termopares para la medición de las temperaturas de procesamiento del puré de mango.....	39
<b>Figura 14.</b> Scanner marca Cole Parmer, modelo Thermocouple Thermometer utilizado para la lectura de temperaturas.....	40
<b>Figura 15.</b> Acoplamiento del cuerpo de preenfriamiento al intercambiador de calor de superficie raspada.....	41
<b>Figura 16.</b> Lectura de datos para la calibración de los ejes de rotación.....	42
<b>Figura 17.</b> Perilla de funcionamiento para un eje de rotación con raspadores acoplados.....	43
<b>Figura 18.</b> Temperaturas de calentamiento alcanzadas en el cuerpo 1 y de enfriamiento en el cuerpo 3 a diferentes flujos de alimentación.....	46
<b>Figura 19.</b> Rendimiento en puré de mango Manila.....	47
<b>Figura 20.</b> Comportamiento pseudoplástico del puré de mango Manila.....	49

<b>Figura 21.</b> Ajuste del fluido a la Ley de la Potencia.....	49
<b>Figura 22.</b> Porcentaje de retención de carotenos a la salida del ICSR.....	52
<b>Figura 23.</b> Gráfica de Pareto para el porcentaje de retención de carotenos posterior al tratamiento térmico.....	53
<b>Figura 24.</b> Gráfica normal para las variables experimentales y la retención de carotenos.....	53
<b>Figura 25.</b> Porcentaje de actividad residual de la enzima PME.....	54
<b>Figura 26.</b> Gráfica de interacciones para el procesamiento de puré de mango Manila.....	55
<b>Figura 27.</b> Porcentaje de pérdida de ácido ascórbico en cada tratamiento.....	56
<b>Figura 28.</b> Gráfica de efectos principales para el ácido ascórbico.....	57
<b>Figura 29.</b> Gráfica de efectos principales para el coeficiente interno de transferencia de calor experimental.....	62

## RESUMEN

Se usó un ICSR a nivel piloto fabricado en acero inoxidable y con capacidad de procesamiento de  $0.02\text{m}^3/\text{h}$  y  $0.0615\text{ m}^2$  de superficie interna. Como fluido de trabajo se utilizó puré de mango variedad Manila, aceite térmico como medio de calentamiento y etilenglicol como refrigerante. Las variables experimentales fueron: temperatura de calentamiento del ICSR, flujo de alimentación, velocidad de rotación de los raspadores y configuración de las unidades de raspado, cada uno de estos factores se evaluó a dos niveles mediante un diseño factorial fraccionado de la forma  $2^{4-1}$  y tres repeticiones en el punto central. Como variables respuesta se consideró: temperatura del puré de mango a la salida, porcentaje de retención de ácido ascórbico, grado de inactivación de la enzima pectinmetilesterasa, retención de carotenos, coeficiente interno de transferencia de calor experimental y teórico. El tratamiento 1 (flujo de  $300\text{ mL}/\text{min}$ , temperatura de calentamiento de  $155^\circ\text{C}$ , velocidad de agitación de raspadores de  $300\text{ rpm}$  y un raspador con doble hilera de unidades de raspado) fué el mejor tratamiento térmico específicamente para puré de mango Manila. Y mostró un coeficiente interno de transferencia de calor experimental de  $395.49\text{ W}/\text{m}^2\text{C}$  y de manera teórica  $855.37\text{ W}/\text{m}^2\text{C}$ .

## ABSTRACT

A surface scraped heat exchanger was used in this work, it have  $0.02\text{m}^2$  of internal surface. Mango puree was used as work fluid, thermal oil and etilenglicol were used as transfer agent. Temperatures of treatment, flow, speed of scrap and scraper type were considered as experimental factors. These factors were evaluated at two levels and in the central points with a factorial fraccionate3d model  $2^{4-1}$ . Temperatures of mango puree; lost of carotene, ascorbic acid and pectinmetilesterase; internal coefficient of heat transfer theoretical and experimental was used has response variables. Treatment 1(flow of  $300\text{mL}/\text{min}$ , oil temperature of  $155^\circ\text{C}$ , scraped speed of  $300\text{rpm}$  and two files of scrapers) show the best conditions for treatment mango puree. This condition had  $395.49\text{ W}/\text{m}^2\text{C}$  of experimental coefficient and  $855.37\text{ W}/\text{m}^2\text{C}$  of theoretical coefficient.

## I. INTRODUCCIÓN

El Intercambiador de Calor de Superficie Raspada (ICSR) es un aparato muy usado en la industria de los alimentos para procesar líquidos muy densos como puré, jugos concentrados y mermeladas, donde es posible utilizar operaciones de manera continua. A diferencia de los recipientes enchaquetados en donde la operación se hace únicamente por lotes.

El ICSR es una modificación del intercambiador de calor de tubos concéntricos, solo que en este caso se incorporó un eje con unidades de raspado. Con este raspado se evita la formación de una capa aislante evitando que el alimento se queme debido a la acción de mezclado que se genera y mejorando la transferencia de calor. Este mecanismo de transporte convectivo inducido favorece la transferencia de calor. El producto es alimentado a través de un tubo central mientras que el medio de calentamiento o de enfriamiento circula en el espacio anular entre el cilindro y el enchaquetado.

Diversos autores, como Van Boxtel (1982), Harrod (1989) y Lee (1991) consideran que el efecto de raspado ocasiona la renovación de la película en contacto con el material sólido que transfiere la propiedad, al ocurrir esta renovación se ocasiona que nuevo material entre en contacto, y así sucesivamente; de esta manera se mejora la transferencia de calor.

Se han propuesto algunas teorías para la evaluación del coeficiente interno de transferencia de calor, entre ellas la teoría de la penetración y la ecuación de Skelland. Con este tipo de trabajos se puede evaluar el coeficiente interno de transferencia de calor tanto teórico como experimental.

Debido a que la mayoría de los alimentos poseen características no newtonianas se vuelve necesario establecer comportamiento de los alimentos ante un procesamiento térmico.

En este caso se consideró al puré de mango Manila como un alimento susceptible de ser usado como alimento modelo para estudiar su comportamiento, ya que el mango Manila es el cuarto fruto de mayor producción en nuestro país y conocer sus características para manejo industrial proporciona datos que puede ayudar a mejorar su explotación económica.

Se evaluó el coeficiente interno de transferencia de calor experimental y teórico del puré de mango Manila, considerando al mismo tiempo la retención de sus parámetros bioquímicos como indicadores de calidad. Esto con la finalidad de determinar las mejores combinaciones de las variables experimentales que favorezcan la transferencia de calor y obtener un alimento con la mejor calidad bioquímica posible.

## II. ANTECEDENTES

### 2.1 Transferencia de calor

La transferencia de energía calorífica es muy común en muchos procesos químicos y de otros tipos de proceso. Suele ir acompañada de otras operaciones unitarias, tales como el secado, la destilación, evaporación, etc (Geankoplis, 1999).

La convección es un mecanismo de transmisión de calor que tiene lugar en los fluidos, lo que no implica que solo exista convección en los fluidos como mecanismo de transmisión de calor. Es difícil que en un fluido exista solamente conducción ya que, aunque se halle inicialmente en reposo, un gradiente de temperaturas originará un movimiento en el fluido por la aparición de las fuerzas de flotación debidas a variaciones de la densidad del fluido. Así, al enfriar o al calentar un líquido en un recipiente cerrado, solo cuando la conductividad térmica y la viscosidad del líquido sean grandes y el gradiente de densidad sea pequeño se evitará la convección. A mayor viscosidad del fluido mayor será el rozamiento y, por lo tanto, la resistencia al movimiento del mismo. Si la conductividad térmica es alta se logra con mayor rapidez una homogeneización térmica del fluido, con lo que una fracción de fluido que se encuentre a diferente temperatura intercambiará con mayor velocidad energía térmica con sus alrededores igualándose sus densidades (Costa, 2002).

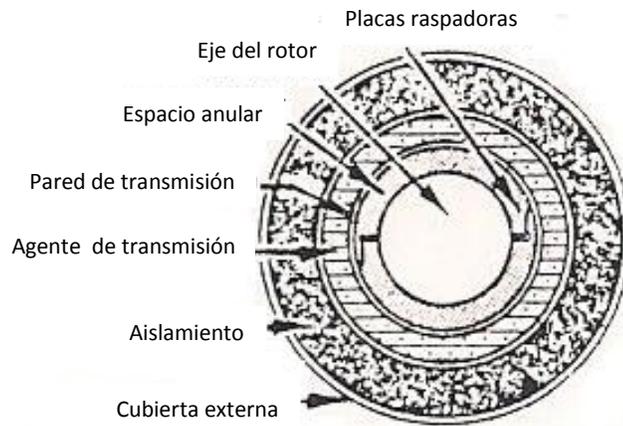
Se presenta a continuación la descripción más antigua y más obvia del significado de los coeficientes de transferencia de masa; está tomada de un concepto similar utilizado para la transferencia de calor por convección y se denomina teoría de la película. Cuando un fluido fluye turbulentamente a través de una superficie sólida, la primera transferencia se atribuye a la difusión molecular dentro de una película efectiva de espesor. Esta película debe ser muy delgada a fin de que la cantidad de soluto dentro de la película fuese muy pequeña en relación con la cantidad que pasa a través de ella. Este gradiente es característico del estado estacionario y para algunos autores no llega a desarrollarse el gradiente de concentración. Una teoría alternativa a la de la película es la teoría de la penetración, teoría concebida para

describir el contacto entre dos fluidos. Una burbuja de gas asciende a través de un líquido que absorbe al gas, una partícula del líquido “b” que se encuentra inicialmente en la parte superior de la burbuja, está en contacto con el gas durante el tiempo “ $\theta$ ” que la burbuja requiere para ascender una distancia igual a su diámetro, mientras que la partícula líquida resbala a lo largo de la superficie de la burbuja, condiciones que permiten la transferencia de propiedad entre el líquido y el gas por medio de la penetración de una partícula sobre un fluido (Treybal, 1993).

## **2.2. Intercambiador de calor de superficie raspada (ICSR).**

El calentamiento de productos de alta viscosidad en la industria alimentaria se hacía primeramente en marmitas calentadas con vapor saturado, donde la posibilidad de controlar y optimizar el tratamiento era muy limitada. El aumento de la demanda para optimizar la eficiencia y ahorrar mano de obra durante los procesos en la industria favorecieron la implementación del calentamiento con intercambiadores de calor; para el manejo de productos de alta viscosidad el más adecuado es el Intercambiador de Calor de Superficie Raspada (ICSR) (Harrod, 1986).

El intercambiador de calor de superficie raspada es un equipo de transferencia de calor que fue patentada en 1926 por Clarence Vogt en un esfuerzo por desarrollar un congelador más eficiente para la elaboración de helados. El diseño incorporó una acción de raspado para evitar la acumulación de crema congelada en la superficie de transferencia de calor, tal como se muestra en la Figura 1. El concepto fue un éxito, se mejoró la eficiencia térmica y la capacidad de producción aumentó (Hui, 1992). Estos tipos de intercambiadores se pueden utilizar para la cristalización de azúcares en leche condensada, como reactores químicos, para la cocción de confituras, carnes, jarabes, el enfriamiento de pastas, para féculas comestibles, para la pasteurización de cremas, concentrados de frutas y hortalizas (Harrod, 1986), entre muchas otras aplicaciones.



**Figura 1. Corte transversal de un ICSR (Brennan, 1980).**

En el ICSR, el producto es alimentado a través de un tubo central mientras que el medio de calentamiento o de enfriamiento circula en el espacio anular entre el cilindro y el enchaquetado (Hui, 1992). El tubo central está equipado con un rotor central giratorio que arrastra por la superficie caliente un dispositivo raspador. Esto impide que los alimentos se quemen y se peguen a las superficies calientes, a la vez que agita y mezcla el producto (Shafiur, 2003). Este mecanismo de transporte convectivo inducido favorece la transferencia de calor (Van Boxtel y De Fiellietaz, 1983).

Al eliminar continuamente el producto de las paredes del cilindro, la capa de producto se reduce al mínimo, lo cual permite largas sesiones de trabajo sin que el producto se acumule en las paredes del intercambiador de calor. Sus ventajas son: a) es capaz de procesar productos sensibles al calor, b) es versátil para procesamiento aséptico, c) los productos pueden ser procesados en un amplio intervalo de temperaturas y viscosidades y d) puede usarse en serie con intercambiadores de calor de otro tipo (Shafiur, 2003).

Para ser capaces de entender y predecir el funcionamiento de los ICSR, es necesario tener conocimiento de los efectos de mezclado para varios patrones de flujo y conocer como los efectos de mezclado controlan las condiciones de tiempo y temperatura para las moléculas durante el proceso (Harrod, 1986). El patrón de flujo depende de los números de Reynolds. El número de Reynolds axial ( $Re_a$ ), que se

basa en la velocidad media axial (cantidad de flujo volumétrico dividido por la sección transversal) y el número de Reynolds rotacional ( $Re_r$ ) que se basa en la velocidad tangencial del cilindro interior o los raspadores o paletas del intercambiador. Cuando la velocidad de rotación incrementa, aparecen los vórtices de Taylor, dando lugar a la aparición de un número de Reynolds rotacional crítico para el cual Beber y Kaye (1962) proponen que depende de la relación entre el diámetro del rotor y el diámetro del tubo. Cuando la velocidad de rotación se incrementa, los vórtices pueden perturbar y finalmente permitir la aparición de turbulencia (Lakhdar, 2005).

Los otros factores que determinan el patrón de flujo en un ICSR son: longitud del equipo, tiempo, diferencias de temperaturas radiales, el tipo de fluido (newtoniano o no newtoniano) y los raspadores internos (el número y la distancia entre estos y la pared del intercambiador) (Harrod, 1986; Lakhdar et al., 2005). Skelland y colaboradores (1962), propusieron la ecuación (1) para poder predecir el coeficiente interno de transferencia de calor ( $h$ ) teórico para el ICSR (citado por Van Boxtel, 1983).

$$\frac{hD}{k} = \alpha \left[ \frac{C_p \mu}{k} \right]^\beta \left[ \frac{(D - D_s) v \rho}{\mu} \right]^{1.0} \left[ \frac{DN}{v} \right]^{0.62} \left[ \frac{D_s}{D} \right]^{0.55} |n_B|^{0.53} \quad (1)$$

$\alpha = 0.014$  y  $\beta = 0.96$  para fluidos viscosos

$\alpha = 0.039$  y  $\beta = 0.70$  para fluidos no viscosos

Donde:

D	Diámetro interno del recipiente (m)	$\mu$	Viscosidad del fluido (Pa.s)
$D_s$	Diámetro del eje giratorio (m)	$\rho$	Densidad del fluido ( $\text{kg/m}^3$ )
V	Velocidad axial de flujo del fluido (m/s)	$C_p$	Capacidad calorífica del fluido ( $\text{J/kg}^\circ\text{C}$ )
$n_B$	Número de raspadores	k	Conductividad térmica del fluido ( $\text{W/m}^\circ\text{C}$ )
N	Velocidad de rotación de los raspadores (rps)	h	Coefficiente de transferencia de calor ( $\text{w/m}^2\text{C}$ )

Los datos cubren un intervalo de velocidades de flujo axial de 0.076 a 0.38 m/min y velocidades de rotación entre 100 y 750 rpm. Para manejar esta ecuación fue necesario conocer las propiedades reológicas y térmicas del fluido.

### 2.3. Reología de fluidos.

Hay una distinción entre alimentos con comportamiento newtoniano y no newtoniano, dependiendo si su comportamiento reológico cumple o no con la ley de la viscosidad de Newton, ecuación (2). Estos tipos de fluidos se encuentran clasificados en el Cuadro 1 (Ibarz, 2005).

$$\tau = -\mu \frac{dv}{dr} \quad (2)$$

Donde:

$\tau$  : Esfuerzo cortante

$\mu$  : Viscosidad

$\frac{dv}{dr}$  : Velocidad de corte

En fluidos newtonianos hay una relación lineal entre  $\tau$  y  $\frac{dv}{dr}$ , esto significa que la viscosidad es constante e independiente de la velocidad de corte (Geankoplis, 1999).

**Cuadro 1. Clasificación de los tipos de fluidos.**

1) Fluido Newtoniano	
2) Fluido no Newtoniano	
a). Independientes del tiempo	
	Fluidos plásticos de Bingham
	Fluidos pseudoplásticos
	Fluidos dilatantes
b). Dependientes del tiempo	
	Fluidos tixotrópicos
	Fluidos antitixotrópicos o reopéticos
c). Fluidos viscoelásticos	

Ibarz, 2005

Existen alimentos en los que dicho comportamiento depende del tiempo de acción del esfuerzo realizado sobre ellos. Los fluidos cuyo comportamiento es únicamente

función del esfuerzo cortante se denominan independientes del tiempo, y su viscosidad aparente, a una determinada temperatura, solo depende de la velocidad de deformación. Los fluidos dependientes del tiempo son aquellos en los que su viscosidad aparente depende, no solo del gradiente de velocidad, sino también del tiempo que actúa dicho gradiente. Además, existen alimentos que presentan conjuntamente comportamientos de fluido viscoso y sólido elástico, es decir, son fluidos viscoelásticos (Ibarz, 2005).

Para los fluidos newtonianos la función viscosidad es constante, siendo precisamente su valor el de la viscosidad newtoniana. En los fluidos no newtonianos esta función ya no es constante, pero puede ser independiente o dependiente del tiempo. La función viscosidad recibe el nombre de viscosidad aparente, y es función de la velocidad de deformación (Bhattacharya, 1999).

La mayoría de los fluidos no newtonianos pertenecen a los fluidos pseudoplásticos e incluyen las soluciones o fusiones de polímeros, las grasas, las suspensiones de almidón, la mayonesa, las suspensiones de detergentes, las pinturas y los purés de frutas (Geankoplis, 1999).

La reología de pulpas y jugos tiene gran importancia en la industria del procesamiento de frutas, incluyendo aplicaciones tecnológicas, sensoriales y de ingeniería, como por ejemplo, diseño de capacidad de bombas a instalar, tuberías, intercambiadores de calor y tanques de mezclado (Torrales, et al., 2006).

### **2.3.1. Fluidos pseudoplásticos**

El 90% de los alimentos se encuentran en este grupo, los cuales responden a la Ley de la Potencia, ecuación (3):

$$\tau_w = k \left( -\frac{dv}{dr} \right)^n \quad (3)$$

Donde:

$\tau_w$  = Esfuerzo de corte

$k$  = Índice de consistencia

$n$  = Índice de comportamiento

$\left( -\frac{dv}{dr} \right)$  = Velocidad de deformación

Para los fluidos pseudoplásticos  $n < 1$  y la viscosidad aparente disminuye al aumentar el esfuerzo de corte. Para flujo de fluidos no newtonianos en ductos circulares esta ecuación se convierte en la ecuación (4):

$$\tau_w = \left( \frac{D\Delta P}{4L} \right) = k \left( \frac{8V}{D} \right)^{n'} \quad (4)$$

Donde  $k'$  y  $n'$  tienen significados semejantes a los de la ecuación (3), sin embargo, no son iguales. Se puede demostrar que la relación que existe entre  $k'$  y  $n'$  con  $k$  y  $n$  es la siguiente (5):

$$k' = k \left( \frac{3n'+1}{4n'} \right)^n \quad (5)$$

Y (6)

$$n = \frac{n'}{1 - \frac{1}{3n'+1} \left( \frac{dn'}{d(\log \tau_w)} \right)} \quad (6)$$

En el intervalo de velocidades de deformación en el que la ley de la potencia aplica (gráfica de  $\tau_w$  vs  $\left( \frac{8V}{D} \right)$  lineal)  $k'$  y  $n'$  por lo que la derivada de  $\frac{dn'}{d(\log \tau_w)} = 0$  y por lo tanto  $n = n'$ . Entonces, conociendo a  $k$  y a  $n$  a cualquier flujo de velocidad ( $V$ ) se podrá conocer la viscosidad efectiva ( $\mu_e$ ) en el ducto por la ecuación (7).

$$\mu_e = k \left( \frac{3n'+1}{4n'} \right)^n \left( \frac{8V}{D} \right)^{n-1} \quad (7)$$

Donde D es el diámetro equivalente dado por la ecuación (8):

$$D = 4x \frac{\text{área del flujo}}{\text{perímetro mojado}} = \frac{\pi / 4(D^2 - d^2)}{\pi(D + d)} \quad (8)$$

Donde:

D= Diámetro interno del rotor (m)

d= diámetro externo del área anular (m)

La ecuación (8) se aplica a fluidos en tubos circulares y es de manejo más conveniente para situaciones de flujo de tubería para determinar las propiedades de un fluido no newtoniano.

## **2.4. Propiedades térmicas de los alimentos**

### **2.4.1. Capacidad calorífica (Cp)**

La capacidad calorífica es el calor ganado o perdido por unidad de peso necesario para establecer un incremento de la temperatura sin que tenga lugar un cambio de estado, sus unidades son (kJ/kg°C) o (kCal/kg°C). Existen modelos desarrollados para conocer el Cp en alimentos compuestos cuando no se tiene la manera física de poder determinarlo.

Uno de los primeros modelos para calcular la capacidad calorífica de los alimentos fue propuesto por Siebel (1982) considerando solo el contenido de agua, ecuación (9):

$$C_p = 0.837 + 3.349X_w \quad (9)$$

Existen otros modelos que no se citarán debido a que no se aplicarían a la naturaleza de la materia prima utilizada. La ecuación (9) es usada para la determinación del cp en frutas y hortalizas debido a la naturaleza de su composición.

### **2.4.2. Conductividad térmica**

La conductividad es una propiedad esencial para determinar la cinética de penetración de calor en cuerpos sólidos, además de otros muchos problemas de transmisión de calor. Esta propiedad se encuentra extensamente tabulada en la bibliografía para muchos alimentos. Sin embargo, es conveniente a menudo poder obtenerla de la composición del alimento.

La mayoría de los alimentos tienen un contenido en agua tan elevado que las propiedades del alimento se acercan mucho más a las del agua. Existen diversas correlaciones que se utilizan para calcular la conductividad térmica de los alimentos.

Para frutas y vegetales con contenido en agua superior al 60%, Sweat (1974) propone la ecuación (10):

$$k=0.148 + 0.00493X_w \quad (10)$$

Las otras correlaciones se utilizan cuando se está trabajando con carnes, oleaginosas, etc. En este caso se utilizó mango y con la ecuación (10) fué suficiente para la determinación de la conductividad térmica.

### **2.5. Estado del arte.**

Se han realizado investigaciones en un ICSR utilizando diversos materiales como fluidos de experimentación, algunos newtonianos, otros no newtonianos. Existe literatura básica acerca de los ICSR como el aporte de Abichandani (1987) en el que se mencionan los cálculos y revisiones básicas para la hidrodinámica y transferencia de calor.

Awuah (1993) determinó el coeficiente de transferencia de calor asociado con calentamiento y enfriamiento de cubos de papa y zanahoria en una solución de carboximetilcelulosa. En este trabajo se determinó que la temperatura de tratamiento

y la concentración de CMC fueron los dos factores decisivos en los resultados obtenidos de transferencia de calor.

Harrod (1986) realizó una revisión bibliográfica de los efectos de mezclado, distribución de tiempos de residencia y el papel del flujo utilizado. Determinó que cuando ocurre el efecto de raspado y existe turbulencia la transferencia de calor fue mayor comparado cuando no se consideraron estas variables experimentales.

Lakhdar (2005) utilizó una mezcla agua-etanol como medio de enfriamiento y una solución de sacarosa como fluido de trabajo. Se encontró que cuando la separación espas-pared fue mayor a 1 mm se formó una capa de hielo que dificultó el efecto de raspado. Consecuentemente la separación espas-pared a mayor distancia de 1 mm ocasiona problemas de potencia.

Lee (1991) en un intercambiador de calor de superficie raspada estudió la distribución de tiempos de residencia utilizando cubos de papa en una solución de CMC y encontró que la DTR depende de la concentración de las partículas presentes en la solución.

Mabit (2004) demostró el efecto paletas raspadoras y el flujo. Los vórtices de Taylor mejoraron el mezclado radial renovando el producto y aumentando la transferencia de calor.

Qin (2006) describió la transferencia de calor y el uso de potencia durante el enfriado de una solución. Modeló el consumo de potencia ante la resistencia al desplazamiento.

Van Boxtel (1983) investigó la transferencia de calor en alimentos no newtonianos. Concluyó que para alimentos con base de almidón no existió correlación entre el flujo másico y el coeficiente interno de transferencia de calor.

Flores (2005) realizó el termoprocesamiento de puré de zanahoria y el efecto sobre sus carotenoides. El mejor tratamiento térmico se hizo con el medio de calentamiento a 145°C, rotación a 100 rpm y un flujo de 240mL/min.

Llano (2007) reporta el termoprocesamiento de mezclas de puré de zanahoria papaya y su efecto sobre componentes bioquímicos y sensoriales. Los parámetros bioquímicos se conservaron mejor con un flujo de 250mL/min, temperatura de calentamiento de 145°C, 100 rpm como velocidad de rotación y una mezcla 40z/60p.

López (2007) concluye que el tratamiento óptimo a 145°C en el medio de calentamiento, rotación a 100 rpm, flujo de 200 mL/min para mezclas de puré de zanahoria-papaya y la inactivación de peroxidasa y pectinemetilesterasa que ocasionan su degradación.

Ortiz (2003) obtuvo una pasta de aguacate mediante tratamiento térmico para la inactivación de la polifenoloxidasas. El mejor tratamiento se realizó a 84 y 85°C utilizando tiempos de 6 y 4.6 min, respectivamente. El medio de enfriamiento del cuerpo 2 estuvo a 25°C y el del tercer cuerpo a 2°C.

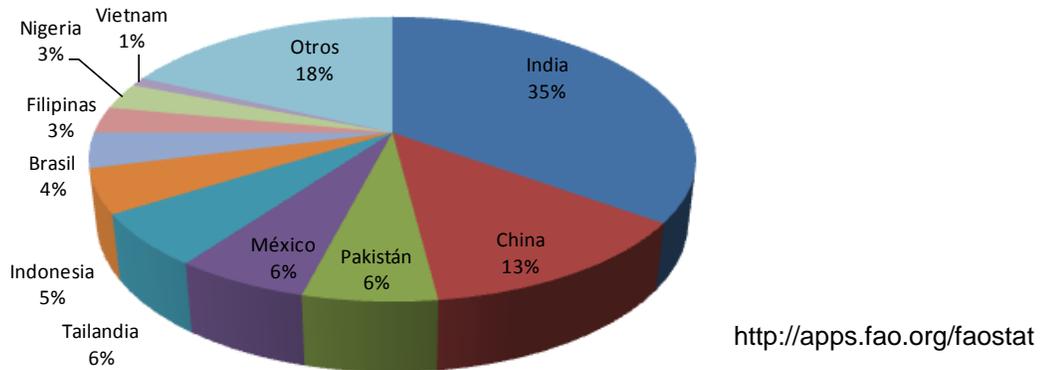
Finalmente, Quintanar (2008) realizó la caracterización y capacidad de enfriamiento de un ICSR utilizando puré de papaya. El mejor tratamiento ocurrió utilizando temperatura de enfriamiento de -6°C, flujo de alimentación de 1 L/min y rotación de raspadores de 300 rpm.

Como podrá verse, la mayoría de los trabajos que se han realizado para un ICSR se enfocan a la etapa de calentamiento o al enfriamiento de manera independiente. Los estudios se han desarrollado con un solo tipo de configuración de las unidades de raspado, por lo general con raspadores en configuración alterna. Además, de acuerdo a Trommelen 1971, se dice que no todos los fluidos alimenticios son viables de trabajar en las mismas condiciones de operación, y por lo tanto, es necesario llevar a cabo la caracterización del ICSR con el alimento específico a fin de determinar las condiciones de proceso.

Se puede utilizar el ICSR para abatir los problemas de estacionalidad de algunos frutos mediante procesamiento térmico, al mismo tiempo en que se conserva su calidad bioquímica. El mango al ser uno de los frutos de mayor producción en México (el cuarto fruto de mayor producción después de la naranja, limón persa y plátano) y a la alta demanda que tiene en el extranjero se convierte en un fruto con potencial de investigación para su explotación industrial en forma de pulpa. Entonces, es importante determinar las condiciones de operación para realizar el tratamiento térmico de puré de mango en un ICSR.

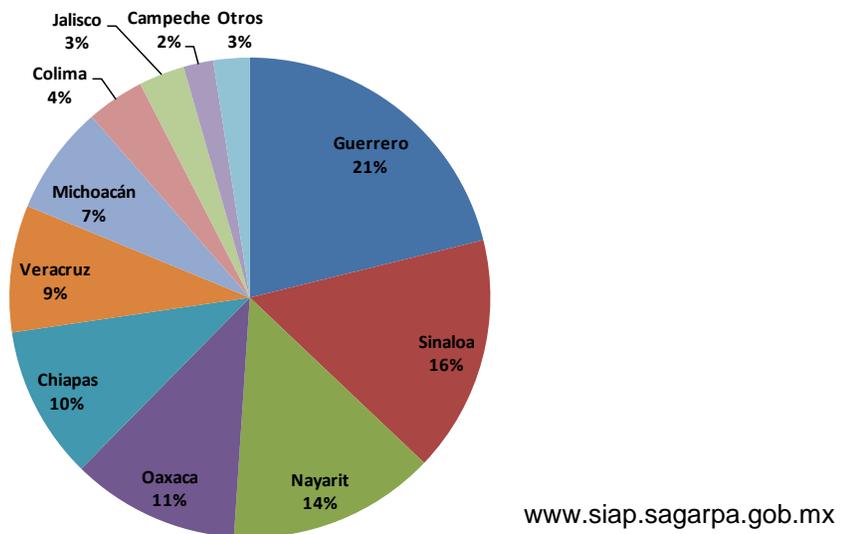
## 2.6. Mango Manila (*Manguifera indica* L.)

El origen del mango se ubica en el continente asiático, entre la zona geográfica del noreste de la India. Los portugueses lo llevaron primero al continente africano y posteriormente a las costas de Brasil, y de ahí se distribuyó al resto de América (Coveca, 2006). Actualmente el principal productor de mango es India mientras que México ocupa el cuarto lugar mundial, figura 2.



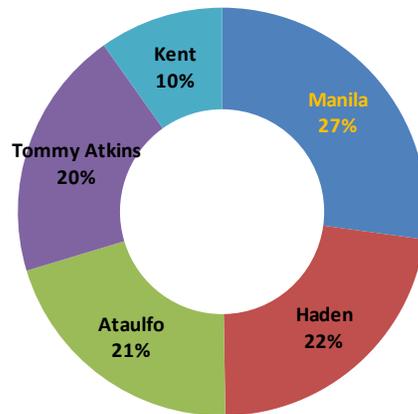
**Figura 2. Participación de los principales países productores de mango (promedio de los años 2000 a 2006).**

A nivel nacional la producción de mango se concentra en los estados de Guerrero, Sinaloa y Nayarit, estados que comparten poco más del 50% de la producción nacional figura 3.



**Figura 3. Producción nacional de mango en México para el año 2008 (participación en % de producción).**

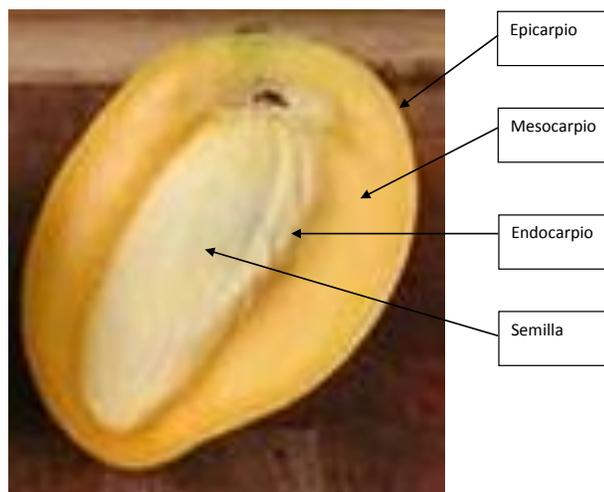
Existen diferentes variedades de mango que se cultivan en México, los de mayor importancia durante el 2008 fueron los que se muestran en la figura 4. El mayor volumen producido de mango corresponde a la variedad Manila, que se aprovecha principalmente para la elaboración de jugos y néctares. Después del mango Manila, las variedades Haden y Ataulfo también representan cierta importancia económica, aunque en este caso principalmente se destinan para su consumo como fruto fresco.



[www.siap.sagarpa.gob.mx](http://www.siap.sagarpa.gob.mx)

**Figura 4. Variedades de mango de mayor importancia en México para el 2008 (% de participación).**

El mango (*Mangifera indica* L.) es un árbol perennifolio, bien ramificado y con una densa copa, pertenece a la familia de las Anacardiaceas. El fruto (figura 5) es una drupa carnosa con un mesocarpio comestible y endocarpio fibroso alrededor de la semilla (Samson, 1991).



**Figura 5. Estructura del fruto de mango Manila (Samson, 1991).**

La semilla del mango abarca del 9 al 27% aproximadamente del peso total del fruto. Su contenido de carotenoides aumenta durante la madurez, es buena fuente de provitamina A. La parte comestible del fruto total representa entre el 60% y el 75% del peso total del fruto. El componente mayoritario es el agua en un 84% (Harvey, 1983). En el Cuadro 2 se muestra el contenido de nutrientes en promedio por cada 100 g de fruta fresca.

**Cuadro 2. Composición química del mango Manila por cada 100 g de pulpa.**

<b>Componente</b>	<b>Cantidad</b>	<b>Componente</b>	<b>Cantidad</b>
Agua	81.7%	Hierro	0.4 mg
Calorías	66 cal	Acido ascórbico	35 mg
Proteína	0.7 g	Potasio	189 mg
Grasa	0.4 g	Vitamina A	4800 UI
Carbohidratos	16.8 g	Tiamina	0.05 mg
Fibra	0.9 g	Riboflavina	0.05 mg

Harvey, 1983

El ácido ascórbico, al igual que los carotenoides y la enzima pectinmetilesterasa se encuentran presentes en el mango en cantidades considerables y son indicadores de calidad. La evaluación de estos factores son indicadores de calidad. El comportamiento de estos componentes bioquímicos, al ser los más sensibles durante el procesamiento térmico deben ser considerados para la evaluación de la calidad del puré de mango procesado.

### **2.7. Parámetros de calidad del puré de mango**

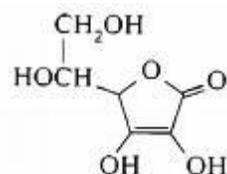
La pulpa de mango es extraída por calentamiento del fruto al vapor durante 2 o 3 minutos, seguido por una extracción física que rompa a la fruta pero no a la semilla. El mango triturado es pasado a través de una malla fina para eliminar el material fibroso de la semilla. Esto produce una pulpa que puede necesitar acidificación para preservarlo (Arthey y Ashurst, 2001).

La pulpa de mango posee un contenido de sólidos de 20.8% (16°Bx promedio). La composición del puré de mango Manila es de: 79.2% de agua, 0.6% de proteína, 0.3% de lípidos, 0.4% de cenizas, 1.1% de fibra cruda, 18.4% de carbohidratos y el contenido de almidón de 2.6% (Bhattacharya, 1999).

### 2.7.1. Acido ascórbico.

Fue aislado en 1928 por Sent.-Gyorgyi. Su actividad antioxidante deriva del desplazamiento de ácido L-ascórbico a su forma oxidada L-dehidroascórbico. La deficiencia de vitamina C sucede cuando la dieta es insuficiente en cítricos, vegetales y jitomates. El déficit de vitamina C origina la enfermedad conocida como escorbuto (Vázquez, 2005).

De todas las vitaminas el ácido ascórbico (Figura 6) es la más inestable y lábil, por lo que algunos investigadores han propuesto usar su contenido residual en los alimentos como un índice de retención de nutrimentos: se considera que si resiste el procesamiento y el almacenamiento indica que todos los demás nutrimentos se verán poco afectados. Las estructuras de enediol son poco estables y presentan una reactividad alta; como ruta principal de degradación, el ácido ascórbico se oxida a ácido dehidroascórbico en una reacción reversible, estableciendo un sistema de oxidación-reducción. A su vez, el ácido dehidroascórbico se sigue oxidando y se transforma en ácido 2,3-dicetogulónico que no tiene actividad biológica (Liao, 1987).



**Figura 6. Molécula de ácido ascórbico.**

Según sean las condiciones del sistema, y por medio de una degradación de Strecker el ácido 2,3-dicetogulónico se cicla y produce anhidrocarbónico y furfural; este último se polimeriza y forma las melanoidinas, de manera semejante a las que

ocasionan el oscurecimiento no enzimático. En su destrucción el ácido ascórbico provee algunos grupos carbonilos para que continúe la reacción. En esta serie de transformaciones también se generan diversos compuestos, algunos de bajo peso molecular, que contribuyen al olor característico de los alimentos que han sufrido esta modificación. Este mecanismo se complica considerablemente si hay azúcares reductores y aminoácidos que favorecen diversas rutas de degradación. La pérdida del ácido ascórbico, además de las consecuencias nutricionales, también lleva consigo (sobre todo en frutas cítricas y sus derivados) la generación de olores indeseables y de oscurecimiento (Liao, 1987).

Esta oxidación está en función de muchas variables, principalmente la temperatura, el pH, la disponibilidad de oxígeno, los metales de transición y las radiaciones electromagnéticas; además, también influyen los azúcares reductores, algunas sales, la actividad acuosa, los peróxidos, ciertas enzimas y la presencia de otras vitaminas, sobretodo de la riboflavina. El ácido ascórbico es más estable a pH ácidos y en actividades acuosas bajas; en ausencia de oxígeno resiste temperaturas de esterilización, aunque se llega a destruir térmicamente por vía no oxidativa de poca importancia que alcanza su máximo a pH 4 (Daves, 1991).

### **2.7.2. Carotenoides y carotenos**

Los carotenoides se encuentran embebidos en las membranas de cloroplastos y cromoplastos. El color se debe a la clorofila en tejidos fotosintéticos, pero en periodos posteriores del desarrollo de la planta, estos pigmentos proporcionan el color de las flores, frutos y algunas raíces como la zanahoria. Los carotenoides se absorben a través de la dieta y a menudo se metabolizan en otros compuestos; son los responsables de los colores familiares de los algunos animales, como la langosta, flamencos y pescados como el salmón (Glenn y Scolnik, 1995).

La estructura básica de los carotenoides es un tetraterpeno de 40 carbonos, simétrico y lineal formado a partir de ocho unidades isoprenoides de 5 carbonos

unidas de manera tal que el orden se invierte al centro. Los carotenoides hidrocarbonados se denominan colectivamente como carotenos (Cuadro 3) y aquellos que contienen oxígeno se denominan xantofilas (Rodríguez - Amaya, 1999). El papel más importante de los carotenoides en la dieta humana y de otros animales es su capacidad para funcionar como precursores de la vitamina A. Aunque el  $\beta$ -caroteno posee la mayor actividad pro-vitamina A, otros carotenoides como el  $\alpha$ -caroteno y la  $\beta$ -criptoxantina, también poseen actividad de provitamina A (Fennema, 2000).

**Cuadro 3. Clasificación de los principales carotenoides.**

Carotenoides (representativo de los terpenos)	
Sin oxígeno: Carotenos	Con oxígeno: Xantofilas
<ul style="list-style-type: none"> <li>• <math>\beta</math>-caroteno</li> <li>• <math>\alpha</math>-caroteno</li> <li>• Licopeno</li> <li>• Criptoxantina</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Luteína</li> <li>• Zeaxantina</li> <li>• Capsantina</li> </ul>

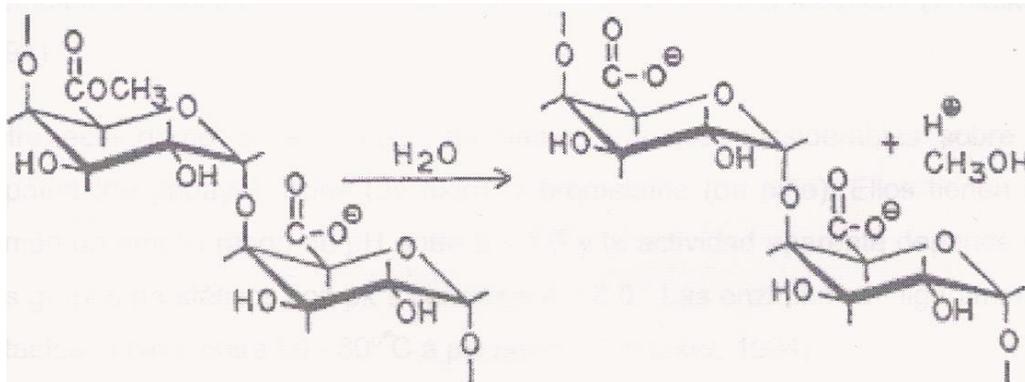
Badui, 2003

La pulpa de mango debe su color a los carotenos y xantofilas, siendo el de mayor importancia el  $\beta$ -caroteno.

### 2.7.3. Pectin Metil Esterasa

La pectina es un componente principal de la pared celular de las plantas. Durante la maduración normal de los frutos, las pectinas son degradadas, lo cual contribuye a cambios en textura como el ablandamiento y la liberación de jugo. Esta degradación ocurre por la acción de la enzima pectinmetilesterasa (PME) que desesterifica las pectinas y cataliza la desmetilación de las mismas, removiendo pequeñas ramificaciones de las cadenas pectídicas, altera la solubilidad de este y se vuelve sensible al ataque de las pectinasas endógenas como la poligalacturonasa que hidroliza el enlace de las pectinas y libera ácido galacturónico (Awad y Young, 1980).

La pectinmetilesterasa remueve los grupos metoxilo de las sustancias pecticas metiladas como la pectina, que es un coloide reversible de tipo liofílico; se le considera como una larga cadena de moléculas de ácido poligalacturónico con grupos carboxilo parcialmente esterificados por alcohol metílico (Braverman, 1967): de modo que la PME pertenece a la subdivisión de enzimas que hidrolizan esteres de ácido carboxílico (Figura 7). Se le conoce también como pectasa, pectinmetoxilasa, pectindemetoxilasa, pectolipasa y pectinmetilesterasa (Whitaker, 1994).



**Figura 7. Mecanismo de acción de la pectinmetilesterasa (Whitaker, 1994)**

Se ha encontrado que la enzima actúa sobre la pectina de manera continua a un pH cercano a 7.5, liberándose un protón cuando se hidroliza el enlace éster. Se cree que la pectinmetilesterasa ataca a la pectina en la posición adyacente a un grupo carboxilo libre; si se considera que en la pectina únicamente el 65-75% de los grupos carboxilo están esterificados, existe una serie de puntos a lo largo de la cadena en los cuales la enzima puede empezar a remover los grupos metoxilo. El ácido poligalacturónico totalmente metilado no es adecuado para que actúe la PME pues requiere de grupos carboxilo libre para iniciar el ataque (Whitaker, 1994).

El mango al ser un fruto altamente perecedero representa una oportunidad para realizar un procesamiento que conserve al máximo su calidad para lograr su disposición en buen estado durante todo el año. Bajo este panorama, se puede señalar que es necesario realizar un trabajo de investigación en un ICSR para realizar su caracterización integral utilizando como fluido este fruto en forma de puré.

### III. JUSTIFICACIÓN

En el ICSR se han realizado estudios de transferencia de calor considerando el proceso de calentamiento o de enfriamiento de manera independiente, utilizado un solo tipo de unidades de raspado. Cabe señalar que no se encontraron investigaciones reportando las condiciones de operación específicas para el tratamiento térmico de pulpa de mango en un ICSR.

Por lo anterior, existe la necesidad de realizar la caracterización del ICSR mediante el tratamiento térmico de puré de mango variedad Manila para determinar las condiciones específicas de operación, considerando como factores de proceso la temperatura de calentamiento, el flujo volumétrico, la velocidad de agitación y el ensayo con tres diferentes configuraciones de las unidades de raspado (para identificar que configuración contribuye a un mejor efecto de mezclado del fluido de proceso).

La finalidad es determinar las mejores condiciones de transferencia de calor logrando la máxima retención de carotenos, evitando pérdidas mínimas de ácido ascórbico e inactivando totalmente la enzima pectinmetilesterasa. Dicha transferencia de calor se debe determinar por el coeficiente interno de transferencia de calor teórico y experimental y poder comparar los valores obtenidos por ambos métodos.

## **IV. OBJETIVOS**

### **4.1. Objetivo general**

Caracterizar el comportamiento de la transferencia de calor en un ICSR mediante el tratamiento térmico de pulpa de mango Manila, estableciendo las condiciones de tratamiento que conserven al mismo tiempo la máxima calidad bioquímica.

### **4.2. Objetivos específicos**

a). Evaluar la conservación de la calidad mediante la cuantificación de ácido ascórbico, carotenos y pectinmetilesterasa realizando la comparación antes y después del tratamiento térmico.

b). Cuantificar las características fisicoquímicas (densidad, °Bx, y viscosidad) y térmicas (capacidad calorífica y conductividad térmica), elementos indispensables para el cálculo teórico de h.

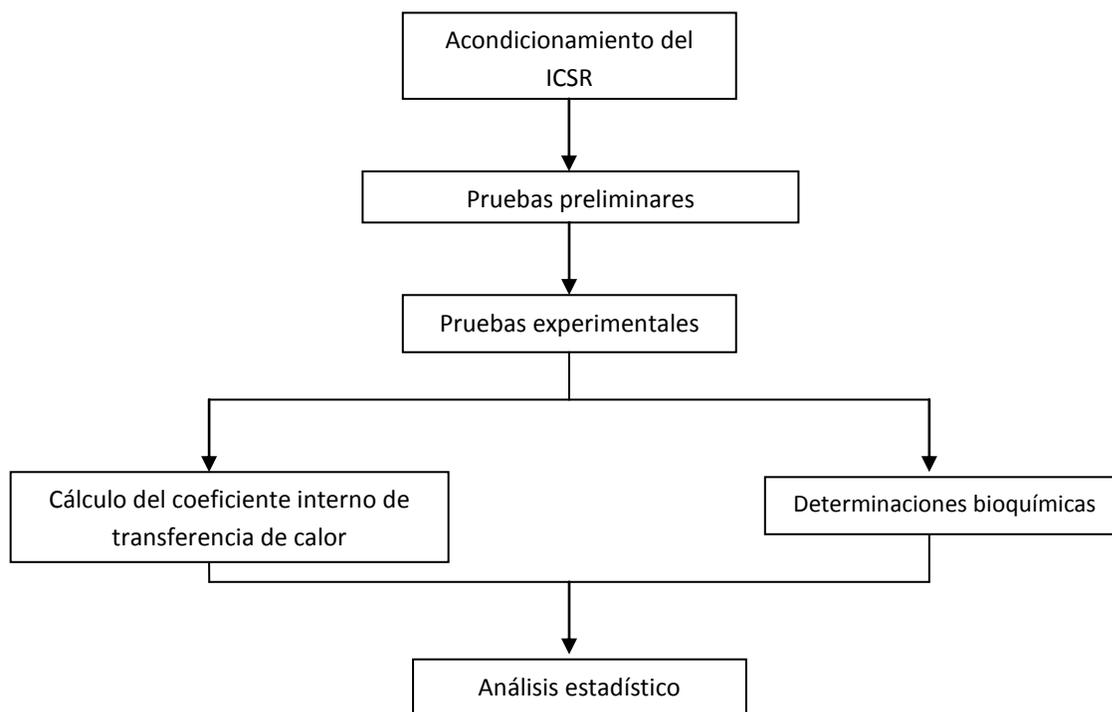
c). Calcular el coeficiente interno de transferencia de calor experimental (utilizando las temperaturas de proceso) y teórico (mediante la ecuación de Skelland).

d). Realizar la comparación entre los coeficientes teóricos y experimentales con la finalidad de la aplicación práctica de alguno de los métodos de manera independiente.

## V. MATERIALES Y METODOS

### 5.1. Desarrollo experimental

El diseño para el desarrollo del presente proyecto se resume en la figura 8, en la que se muestran los principales bloques experimentales.



**Figura 8. Diagrama de flujo experimental**

Para hacer el diseño experimental se consideraron los factores más importantes que pudieran tener efecto en los resultados, basándose en la revisión de literatura se determinó que para este caso las variables serían las que se mencionan enseguida.

#### **Variables experimentales:**

Velocidad de rotación (rpm)  
Flujo de alimentación (mL/min)  
Tipo de raspador (A, B, C)  
Temperatura de proceso (°C)

#### **Variables de respuesta:**

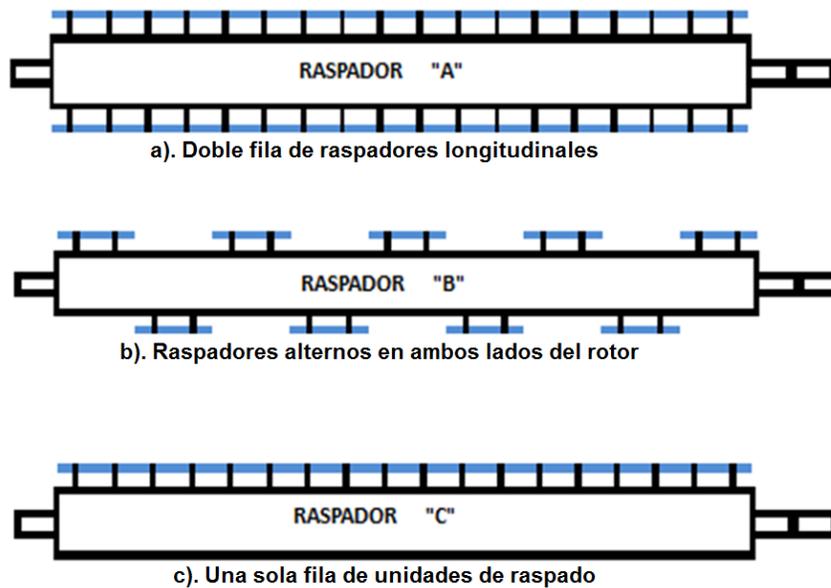
Conservación del ácido ascórbico (%)  
Actividad de pectinmetiltransferasa (%)  
Retención de carotenos (%)  
Coeficiente interno de transferencia de calor ( $W/m^2\text{°C}$ )

Las investigaciones realizadas por Abichandani, 1987; Flores, 2005; Llano, 2007; y Quintanar, 2008; así como las pruebas preliminares y el Diagrama Ishikawa (Anexo I) sentaron las bases para poder realizar el diseño experimental del cuadro 4.

**Cuadro 4. Diseño de las variables experimentales.**

Nivel	Temperatura (°C)	Velocidad de rotación (rpm)	Tipo de raspador (A, B, C)	Flujo de alimentación (mL/min)
Alto	155	300	A	500
Medio	150	250	B	400
Bajo	145	200	C	300

En la figura 9 se ilustra la diferencia que existe entre un tipo de raspador y otro.



**Figura 9. Tipos de raspadores utilizados durante el experimento.**

Se tienen 4 variables a 2 niveles (alto y bajo) cada uno, mediante el Diseño Factorial (DF) de la ecuación (11) se generaron 16 tratamientos.

$$DF=2^4 =16 \text{ tratamientos} \tag{11}$$

Para un mínimo de dos repeticiones el total de tratamientos cambió a 32. Pero, para ubicar el efecto de las condiciones medias se deben realizar 3 tratamientos en el punto central, entonces los 32 tratamientos cambian a un total de 35 corridas experimentales. Debido a que la materia prima es cara y a la estacionalidad de la

misma, se prefirió optar por una alternativa que permitiera ahorrar costos, el diseño que ofreció esta ventaja fue un Diseño Factorial Fraccionado (DFF). Utilizando un DFF se pueden eliminar interacciones repetitivas, un DFF de la forma  $2^{k-p}$  ocasiona la reducción a la mitad del número de tratamientos originales de un DF. Entonces, si el DF con dos repeticiones había generado 32 tratamientos, con un DFF esto se reduce a 16 tratamientos, más los 3 en el punto central. Finalmente, se generó un total de 19 corridas experimentales (cuadro 5), ya que se realizaron por duplicado los tratamientos del 1 al 8 además de los 3 tratamientos en el punto central. El ahorro económico puede visualizarse en el Anexo II, mientras que el Diseño Factorial Fraccionado con duplicados obtenido del programa Minitab versión 13 se puede consultar en el Anexo III.

**Cuadro 5. Diseño experimental.**

Tratamiento	Fo (mL/min)	Tc (°C)	RR (rpm)	TR (A, B, C)
1	300	155	300	A
2	500	155	300	C
3	500	155	200	A
4	300	155	200	C
5	500	145	300	A
6	300	145	300	C
7	300	145	200	A
8	500	145	200	C
9	400	150	250	B
10	400	150	250	B
11	400	150	250	B

Definiciones:

**Fo:** Flujo de alimentación

**Tc:** Temperatura de calentamiento

**RR:** Velocidad de rotación de los raspadores

**TR:** Tipo de raspador (ver Figura 9)

Las condiciones experimentales del Cuadro 5 se utilizaron considerando las siguientes observaciones:

1. Dado que se trabajó en forma continua, el flujo utilizado fué el mismo en todas las etapas.

2. La rotación de las unidades de raspado programó bajo las mismas condiciones en los tres cuerpos.
3. El tipo de raspador utilizado fué igual en cada uno de los cuerpos.
4. La etapa de calentamiento se llevó a cabo utilizando aceite mineral como medio de transmisión de calor y se calentó previamente hasta una temperatura  $T_c$  de acuerdo al diseño del Cuadro 6.
5. Para realizar el preenfriamiento en el cuerpo intermedio se utilizó agua a temperatura ambiente ( $20^{\circ}\text{C}$ ) realizando la toma directa del suministro general, no se realizó recirculación.
6. El proceso de enfriamiento se realizó utilizando etilenglicol como agente refrigerante a una temperatura fija de  $-10^{\circ}\text{C}$ .

## **5.2. Materia prima**

Se utilizó puré de mango variedad Manila con  $20^{\circ}\text{Bx}$  de madurez. Adquirido de un proveedor externo (Ingeniería de frutas procesadas S. A. de C. V.). Para la elaboración del puré dicho proveedor utilizó mango Manila procedente del estado de Guerrero debido a su bajo costo y a su cercanía con la Ciudad de México.

## **5.3. Material de laboratorio y reactivos**

Los materiales y reactivos utilizados fueron los de uso común de laboratorio y algunos reactivos específicos para las determinaciones bioquímicas, se mencionan a continuación:

- Ácido ascórbico Sigma
- Ácido metafosfórico grado analítico Baker
- 2,6-diclorofenolindofenol Sigma
- Acido acético glacial Merk
- Pectina cítrica Sigma
- Hidróxido de sodio Baker
- Acetona Baker
- Hexano Baker
- Tierra de diatomeas Merk
- Sulfato de sodio anhidro Merk
- Carbonato de magnesio Baker

## 5.4. Equipo

El equipo utilizado para las corridas y las determinaciones bioquímicas se menciona en una lista a continuación, cabe señalar que únicamente se mencionan los aparatos cuyo uso fué imprescindible para el desarrollo experimental y analítico.

- Intercambiador de calor de superficie raspada marca Jersa
- Congelador Nieto
- Espectrofotómetro Spectro 23
- Potenciómetro Hanna
- Balanza analítica Explorer Pro
- Termopares tipo T de cobre-constantano
- Viscosímetro Haake-RT20
- Tacómetro manual MT-200

### 5.4.1. Intercambiador de calor de superficie raspada piloto (ICSR)

El intercambiador de calor de superficie raspada corresponde a un intercambiador de calor a nivel piloto (figura 10) con capacidad de proceso de 20L/h y está construido en acero inoxidable grado alimenticio. Fue diseñado en la ENCB y construido por la empresa Maquinaria Jersa. Este intercambiador de calor cuenta con tres cuerpos de 51.5 cm de largo y volumen de 634 cm<sup>3</sup>, de tipo horizontal, conectados en serie, que permiten tres etapas: calentamiento, preenfriamiento y enfriamiento en orden ascendente. En el interior gira un rotor de 2.57 cm de diámetro con las unidades raspadoras elaboradas en teflón para resistir altas temperaturas. El diseño original contempla unidades de raspado únicamente de forma alternada, sin embargo, existen posibilidades de mejorar la eficiencia de transferencia de calor mediante un arreglo distinto de las paletas raspadoras. La alimentación se hace a través de la tolva y una bomba de desplazamiento positivo, con un diámetro de entrada de 1.57 cm y potencia de 0.5 HP. El tablero eléctrico permite controlar la velocidad de alimentación, temperatura de calentamiento y velocidad de rotación de los raspadores. Maneja un flujo en contracorriente.

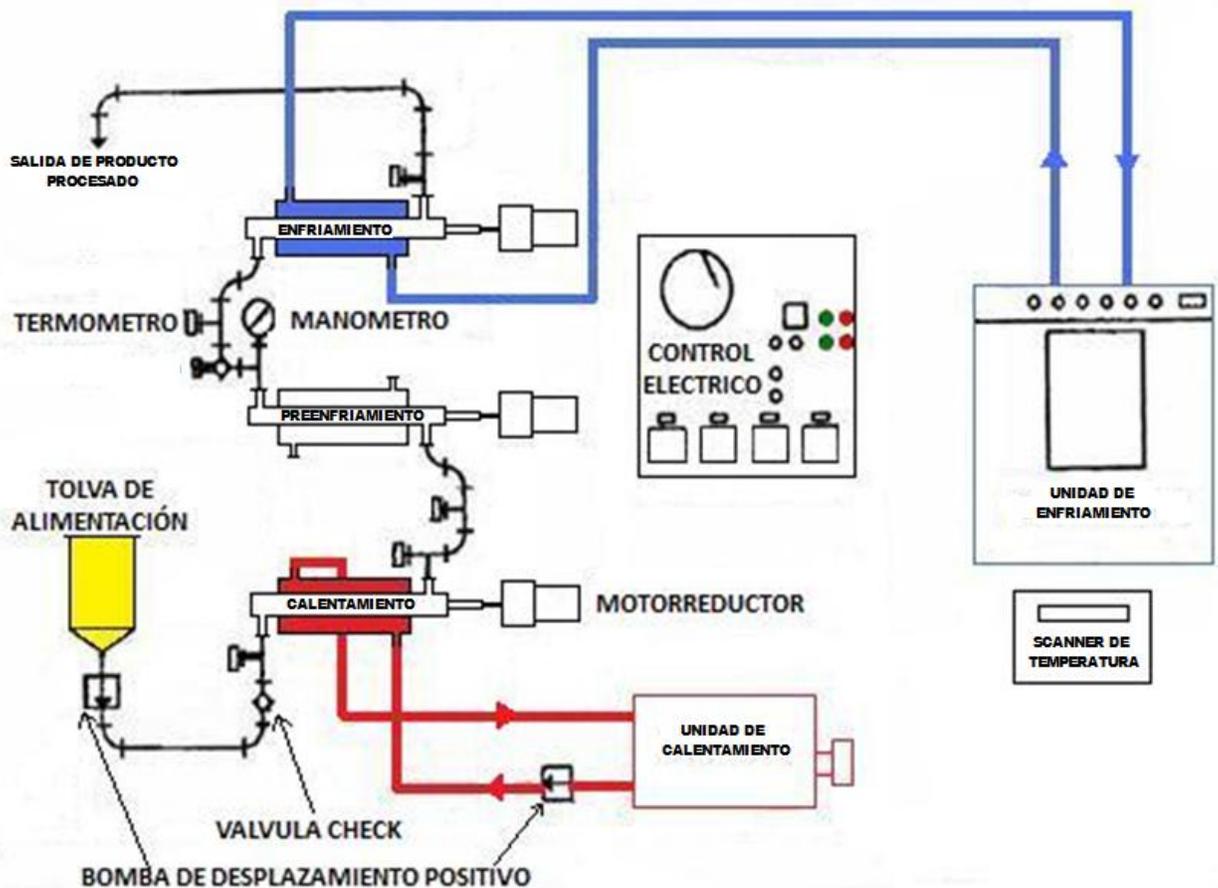


Figura 10. Intercambiador de calor de superficie raspada a nivel piloto.

## 5.5. Métodos

### 5.5.1. Determinación de Vitamina C (Método de Robinson Stock, citado por Rangana, 1986).

El método de determinación directo está basado en la cuantificación del exceso de 2,6-diclorofenol-indofenol, el cual disminuye la intensidad de su color debido al ácido ascórbico presente en la muestra y en la solución de los estándares.

#### ➤ Reactivos:

1. Solución de ácido metafosfórico al 2%.
2. Solución indicadora: Se disolvieron 100 mg de 2,6-diclorofenol indofenol y 4 mg de bicarbonato de sodio en agua destilada caliente (85-95°C), se enfrió y

se aforó a 100 mL. Se filtró y diluyeron 25 mL a 500 mL con agua destilada.

3. Soluciones estándares de ácido ascórbico: Se pesó exactamente 100 mg de ácido ascórbico y se aforó hasta 100 mL con HPO<sub>3</sub> al 2%. Se diluyeron 4 mL de esta solución hasta 100 mL con HPO<sub>3</sub> al 2% (1 mL = 40 µg de ácido ascórbico).

➤ **Procedimiento:**

1. Preparación de la muestra: Se pesaron 10 g de muestra y se aforó hasta 100 mL con HPO<sub>3</sub> al 2 %.
2. Curva estándar: En tubos de vidrio se colocaron los siguientes volúmenes de la solución estándar de ácido ascórbico 1, 2, 3, 4 y 5 mL y se llevaron a 5 mL totales con HPO<sub>3</sub> al 2%. Se adicionaron 10 mL de la solución indicadora y se tomó la lectura dentro de los 15 a 20 segundos de reacción. Se llevó el equipo al 100% de transmitancia con un blanco de 5 mL de HPO<sub>3</sub> al 2% y 10 mL de agua. Se tomó la medición a la longitud de onda de 518 nm, obteniendo la curva tipo absorbancia contra concentración.
3. Muestra: Se tomaron 5 mL del extracto (o menos y se llevaron a 5 mL con HPO<sub>3</sub> al 2%) y se adicionó 10 mL de la solución indicadora y se procedió a leer su absorbancia a 518 nm con un blanco de 5 mL del extracto y 10 mL de HPO<sub>3</sub> al 2%.

Cálculos:

La concentración de ácido ascórbico de la curva estándar y de la muestra se realizó a través de la ecuación (12):

$$\frac{\text{mg de ácido ascórbico}}{100 \text{ g o mL de muestra}} = \frac{A \times B \times 100}{C \times 1000 \times D} \quad (12)$$

Donde:

A = Contenido de ácido ascórbico estimado en la curva tipo

B = Volumen de aforo (1000 mL).

C = mL de solución tomados para la estimación (5 mL).

D = Peso de la muestra.

### 5.5.2. Cuantificación de carotenos (AOAC 941.15, 1995).

La cuantificación de carotenos está basada en la medición de su color amarillo naranja (absorción espectral) a la longitud de onda de 450 nm.

Pesar 4 g de muestra triturada en un mortero con ayuda de 0.5 g de tierra de diatomeas, 0.1 g de carbonato de magnesio y 0.1 g de sulfato de sodio anhidro. Agregar un total de 40 ml de acetona y 60 ml de hexano, moler hasta que se obtenga una solución amarilla intensa. Recuperar cuantitativamente el extracto filtrado en un embudo de separación cubierto de papel aluminio para protegerlo de la luz. Repetir la operación con el sólido en dos porciones más de 25 ml de acetona y dos porciones de 25 ml de hexano, añadiéndose los extractos al embudo de separación. Separar y remover la acetona del extracto lavando el total de extracto con 5 porciones de 100 ml de agua destilada, sin agitar vigorosamente, para evitar la formación de emulsión. Desechar la fase acuosa (inferior) y recuperar la fase orgánica (superior) lo más rápido posible en un matraz aforado de 100 ml y llevar al volumen con hexano.

Para la cuantificación, leer la absorbancia del extracto a 450 nm el mismo día de la extracción, calibrando el espectrofotómetro con blanco de hexano. Realizar la cuantificación de cada muestra por triplicado. Posteriormente calcular los  $\mu\text{m}$  de carotenos/g de puré con fórmula (13):

$$\frac{\mu\text{g de carotenos}}{\text{g de puré}} = \frac{A_{450\text{ nm}} \times V \times 10^6}{A^{100\%} \times 100 \times \text{g de muestra}} \quad (13)$$

Donde:

$A_{450\text{ nm}}$  = Lectura de la absorbancia de la muestra

$A^{100\%}$  = Constante de la tabla de identificación de carotenos (2592)

V = Volumen del aforo

### 5.5.3. Actividad enzimática de pectinmetilesterasa (Hultin, 1948).

La determinación de la actividad de esta enzima está en función de la disminución de pH durante la reacción, lo cual indica que la enzima está actuando sobre los grupos metilados de la pectina, dando lugar a la formación de grupos carboxilos que son neutralizados con NaOH a 0.01 M hasta nuevamente alcanzar el pH de 8.0.

El potenciómetro se calibró a pH 8.0, a temperatura ambiente. En un vaso de precipitados se adicionaron 5 mL de solución de pectina al 1%, 4mL de agua destilada, 0.2 mL de NaOH 0.4 N, se coloca sobre un agitador magnético, se sumergió el electrodo y se encendió el agitador y el potenciómetro. Utilizando una pipeta se adicionaron 0.8 mL del extracto enzimático que debe estar a temperatura ambiente, en el instante en que se inicia la adición, se registra el tiempo cero. Durante 5 min exactos se mantiene constante el pH de 8.0, mediante la adición de NaOH 0.01 N, contenido en una bureta. Una vez transcurridos 5 minutos, se registra el gasto de NaOH y se da por terminada la reacción. Con los datos obtenidos del gasto de NaOH 0.01 N, se realizan los cálculos que se describen para reportar la actividad de PME usando la ecuación (14).

Una unidad de pectinmetilesterasa (UPME) se define como la cantidad de enzima que libera un microequivalente ( $\mu\text{em}$ ) de grupos carboxilos, a pH 8.0, por minuto, a temperatura ambiente (25°C).

$$UPME = \frac{N \times V \times 1000}{A \times t} \quad (14)$$

Donde:

UPME = Unidades de pectinmetilesterasa (M sust / mL min)

M sust = Moles de sustrato transformado

N = Normalidad de NaOH (meq/mL)

V = Volumen de NaOH (mL)

A = Volumen de extracto enzimático utilizado (mL)

t = Tiempo de reacción (min)

Para determinar la APME se debe usar la fórmula (15):

$$APME = \frac{UPME \times V}{m} \quad (15)$$

Donde:

APME = Actividad de pectin-metil-estearasa (M sust / 100g puré min)

UPME = Unidades de pectin-metil-esterasa

V = Volumen del aforo (20 mL)

M = Masa de la muestra (100 g)

t = Tiempo de reacción (5 min)

#### 5.5.4. Determinación teórica del coeficiente interno de transferencia de calor.

La determinación del coeficiente interno de transferencia de calor teórico ( $h_t$ ) se realizó mediante la aplicación de la ecuación de Skelland y colaboradores (1962), ver ecuación (1). Se utilizaron las constantes  $\alpha = 0.014$  y  $\beta = 0.96$  para líquidos viscosos.

Para manejar la ecuación fue necesario determinar el flujo axial mediante la ecuación (16) y el área anular mediante la ecuación (17).

$$V = G/A \quad (16)$$

$$A = (\pi/4)(D^2 - d^2) \quad (17)$$

Donde:

G= gasto volumétrico ( $m^3/s$ )

V= velocidad axial del flujo del fluido (m/s)

A= área anular ( $m^2$ )

D= diámetro interno del intercambiador (m)

d= diámetro del rotor (m)

### 5.5.5. Determinación experimental del coeficiente interno de transferencia de calor.

De manera experimental el coeficiente interno de transferencia de calor ( $h_e$ ) se puede calcular mediante la metodología que se describe enseguida (Geankoplis, 1999).

1.- Temperatura promedio ( $T_w$ ) de la pared interna del intercambiador de calor ( $^{\circ}\text{C}$ ), ecuación (18):

$$T_w = \frac{\frac{t_1 + t_2}{2} + \frac{T_1 - T_2}{\ln \frac{T_1}{T_2}}}{2} \quad (18)$$

Donde:

T= Temperatura del fluido de proceso

t= Temperatura del medio de calentamiento

En ambos casos 1 implica entrada y 2 indica salida de un cuerpo del intercambiador de calor.

2.- Cálculo de temperatura media logarítmica ( $^{\circ}\text{C}$ ), ecuación (19):

$$T_{ml} = \frac{T_1 - T_2}{\ln \frac{T_1}{T_2}} \quad (19)$$

3.- Calor absorbido por el fluido de proceso al pasar por el intercambiador (J/s), ecuación (20):

$$Q = mCp(T_1 - T_2) \quad (20)$$

4.- Cálculo del coeficiente interno de transferencia de calor ( $\text{W}/\text{m}^2\text{^{\circ}\text{C}}$ ) usando (21):

$$h = \frac{Q}{A(T_{ml} - T_w)} \quad (21)$$

#### **5.5.6. Determinación de la densidad aparente.**

La densidad aparente se determinó de la siguiente manera; se tomaron dos matraces aforados de 100 mL, se pesaron y posteriormente se aforó uno con agua y el otro con puré de mango y se pesaron nuevamente, al resultado del peso final se le restó el peso inicial del matraz vacío. El peso final del agua debe ser lo más cercano posible a  $1000 \text{ kg/m}^3$ , para así obtener resultados más confiables.

#### **5.5.7. Determinación de la viscosidad aparente (Viscosímetro Haake RT20).**

La medición de la viscosidad del alimento se llevó a cabo en un viscosímetro Haake RT20 de placas paralelas.

Para la determinación de la viscosidad se colocó aproximadamente 100 mL de muestra de puré de mango dentro del cilindro el cual se ajustó al equipo, así como la temperatura de trabajo ( $20^\circ\text{C}$ ) y se activó el equipo para hacer girar la aguja en un margen de 0 a 500 rpm durante 300 s. De los datos obtenidos se elaboraron gráficas para obtener el comportamiento reológico, el esfuerzo de corte y la viscosidad efectiva ( $\mu_e$ ).

#### **5.5.8. Determinación de la capacidad calorífica (Siebel, 1982).**

La capacidad calorífica se determinó por la ecuación de Siebel 1982, la cual se basa en el agua como componente principal de frutas y hortalizas, ver ecuación (9).

#### **5.5.9. Determinación de la conductividad térmica (Sweat, 1974).**

Este parámetro se cuantificó mediante la propuesta de Sweat (1974) utilizando la ecuación (10). Esta cuantificación también considera la humedad presente en el fruto como principal variable que define la conductividad térmica.

#### **5.5.10. Determinación de °Brix (NMX-F-103-1965)**

La determinación de °Bx se realizó en el puré antes y después del tratamiento. Se realizó la calibración del refractómetro Abbé con escala de 0 a 32°Bx colocando unas gotas de agua destilada a 20°C sobre el prisma, enseguida se ajustó la escala a cero, y se secó con algodón. Después se colocaron unas gotas de la muestra sobre el prisma, se cerró y ajustó la perilla hasta que el campo visual se dividió en dos partes, una luminosa y una oscura. La línea divisora entre esas dos partes es conocida como línea margen y se lee directamente el por ciento de sólidos en la escala de grados Brix.

#### **5.5.11. Determinación de acidez titulable (AOAC 22.060, 1995).**

El porcentaje de acidez titulable se expresa como porcentaje de ácido cítrico debido a que se encuentra en mayor proporción. Se determinó por el método de titulación ácido base empleando hidróxido de sodio al 0.1 N en presencia de fenolftaleína como indicador.

Se pesaron 10 g de muestra y se llevaron a 100 mL con agua destilada, posteriormente se filtró y se tomó una alícuota de 10 mL por triplicado y a cada una se le adicionaron 3 gotas de fenolftaleína al 1% y se tituló con hidróxido de sodio al 0.1 N. Para obtener el porcentaje de acidez titulable reportado como porcentaje de ácido cítrico se utilizó la ecuación (22):

$$\% \text{ ácido cítrico} = ((G \times N \times \text{meq} \times V) \times 100) / (P \times A) \quad (22)$$

Donde:

G= Gasto de NaOH en la titulación (mL)

N= Normalidad del NaOH (0.1N)

meq= Miliequivalentes del ácido cítrico (0.0064 g/mL)

V= Volumen total (mL)

P= Peso de la muestra (g)

A= Alícuota (mL)

#### **5.5.12. Determinación de pH (AOAC 10.035, 1995).**

La determinación de pH es la medida de la actividad del ión  $H^+$  e índices ácidos. Puede medirse por la determinación del potencial eléctrico entre el vidrio y el electrodo. Para la cuantificación de pH, se pesaron 10 g de muestra y se le adicionaron 100 mL de agua destilada, se filtró y se agitó la muestra, posteriormente se midió el pH con la introducción directa del electrodo al filtrado previamente calibrado con las soluciones amortiguadoras de pH 4 y 7.

#### **5.5.13. Determinación de humedad (AOAC 22.013, 1995).**

La determinación de humedad de la pulpa se realizó por el método de la termobalanza (Ohaus MB 200) a 110°C programada con una variación de humedad de 0.01 g en 60 segundos, usando 10 mL de la pulpa de mango y una cama de arena (lavada y secada) usada como soporte para aumentar la superficie de contacto y reducir el tiempo de la determinación por formación de costras, ya que las costras impiden la salida de humedad.

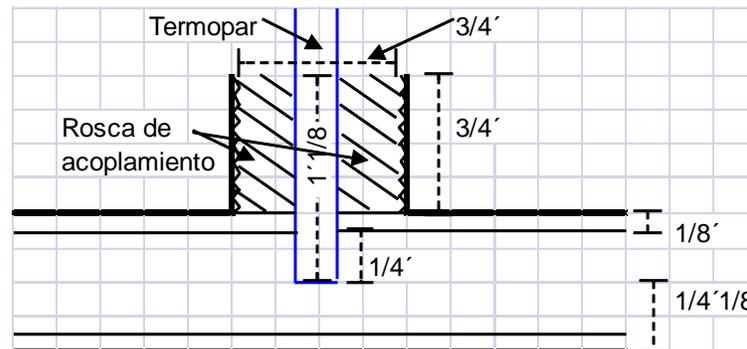
## VI. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### 6.1. Operaciones preliminares

#### 6.1.1. Diseño y colocación de termopares

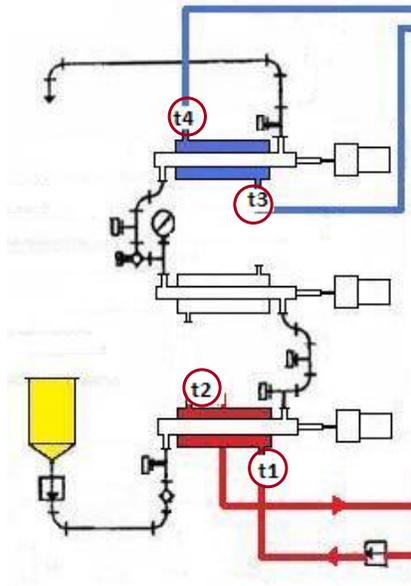
La lectura de datos de temperatura en el ICSR comúnmente se realizaba mediante termómetros de mercurio o utilizando termopares fijados de manera provisional. Para este proyecto se colocaron termopares fijos en los ductos para el transporte de los fluidos con la finalidad de realizar lecturas de temperaturas reales, disminuyendo así el riesgo de error por lectura.

Se realizó el diseño de los termopares que fueron colocados: dos para la zona de calentamiento y dos para la zona de enfriamiento. Se realizaron cuatro diseños con estructura similar al corte longitudinal que se muestra en la Figura 11 y se construyeron en un taller externo.



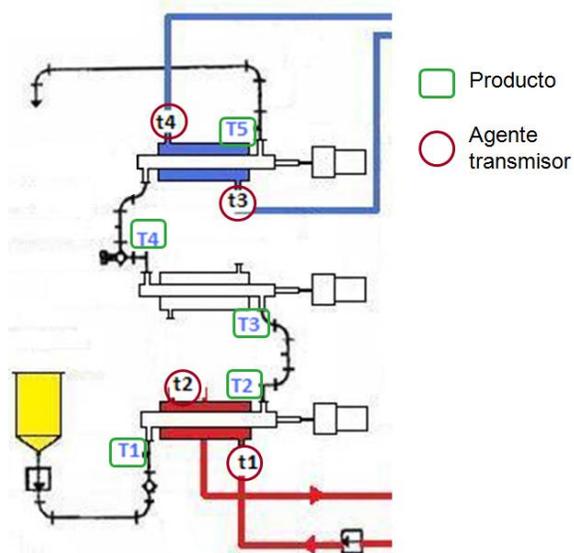
**Figura 11. Corte longitudinal de los termopares para tuberías de conducción de refrigerante y tuberías de conducción de aceite térmico.**

Cabe señalar que la “rosca de acoplamiento” y el “termopar” fueron unidos mediante soldadura de plata. De esta manera ambas piezas formaron un solo cuerpo que se pudo enroscar al sistema de tuberías y se puede cambiar cuando se desee sin dificultad. Teniendo los termopares instalados, éstos fueron colocados en la entrada y salida tanto del cuerpo de calentamiento como de enfriamiento (Figura 12).



**Figura 12. Ubicación de los termopares instalados para la toma de temperaturas del aceite térmico (t1 y t2) y para las temperaturas del refrigerante etilenglicol (t3 y t4).**

Para cuantificar la temperatura del fluido de trabajo (pulpa de mango) se procedió a colocar termopares en cinco puntos estratégicos que se ubican en la Figura 13 y están señalados en color verde.



**Figura 13. Instalación de termopares para la medición de las temperaturas de procesamiento del puré de mango.**

Los termopares instalados fueron utilizados para medir la temperatura:

- ❖ Antes de la entrada del primer cuerpo, para medir la temperatura de alimentación, (T1).
- ❖ Inmediato a la salida del primer cuerpo para medir la temperatura máxima alcanzada en la etapa de calentamiento (T2).
- ❖ Justo a la entrada al cuerpo de preenfriamiento (T3).
- ❖ Antes de entrar al tercer cuerpo, temperatura a la que ingresa la pulpa antes de ser sometido al frío, (T4).
- ❖ Saliendo del tercer cuerpo, temperatura a la que fue enfriado el producto, (T5).

Cada uno de estos termopares fueron conectados a un lector de temperaturas, Figura 14, este lector se programó para que indique la temperatura del sensor correspondiente durante 3 segundos al término de los cuales pasó al siguiente termopar hasta tomar la lectura de todos los termopares y repetir el ciclo de manera continua.

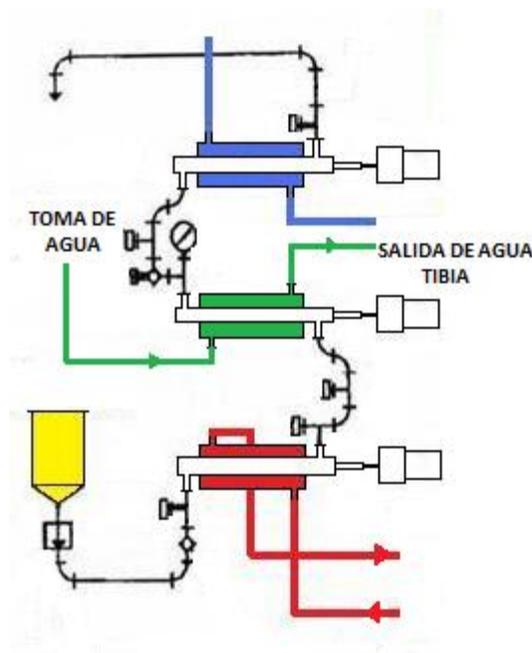


**Figura 14. Scanner marca Cole Parmer, modelo Thermocouple Thermometer utilizado para la lectura de temperaturas.**

### 6.1.2. Acoplamiento del cuerpo de preenfriamiento al ICSR.

Se realizó la unión del cuerpo número 2 (cuerpo intermedio en el que se lleva a cabo el preenfriamiento) al cuerpo 1 y 3. La temperatura promedio utilizada para el medio de calentamiento fue de 150°C, mientras que la de enfriamiento se ubicó en -10°C. Entonces, usar agua a temperatura ambiente (20°C) se convirtió en una opción como fluido de preenfriamiento.

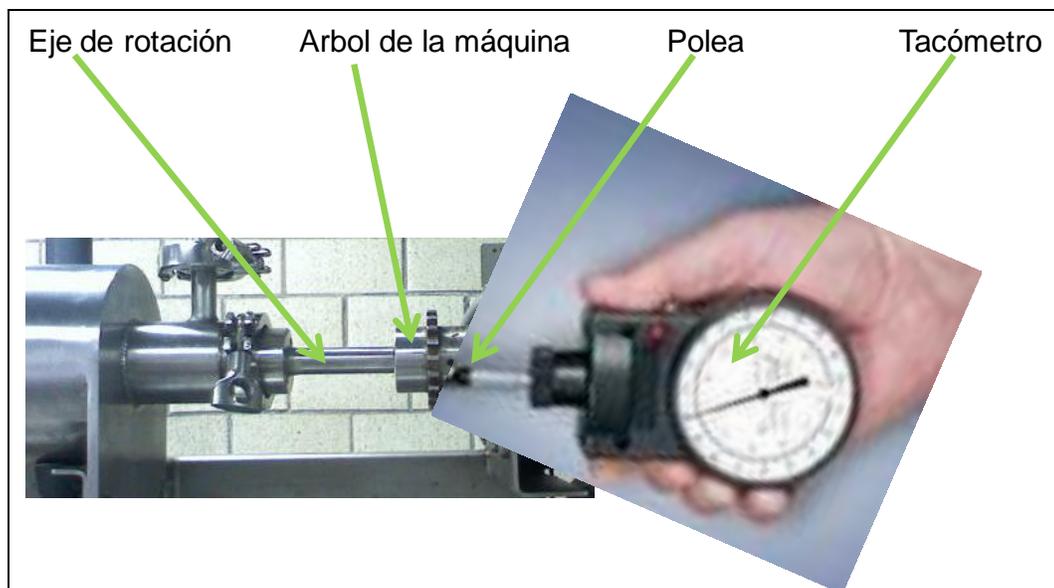
Al no contar con las piezas metálicas para la unión integral de ICSR se utilizó un poliducto de plástico para llevar agua de una de las tomas de la red de suministro general hacia la entrada inferior del cuerpo de preenfriamiento. El agua circuló desde la parte inferior, llenó el cuerpo y salió por la parte superior (Figura 15). Para evitar que el agua fuera desperdiciada, ésta se colectó en recipientes y se utilizó para el lavado del equipo al final de cada uno de los tratamientos.



**Figura 15. Acoplamiento del cuerpo de preenfriamiento al intercambiador de calor de superficie raspada.**

### 6.1.3. Calibración de los ejes de rotación

Durante el manejo del intercambiador de calor se pudo observar que las flechas con las paletas raspadoras no giraban de acuerdo a las revoluciones que indicaban las perillas de medición de velocidad de agitación en revoluciones por minuto (rpm). Por lo anterior se midieron las rpm de los ejes mediante el uso de un tacómetro de contacto y después de realizar algunos cálculos se obtuvo a calibración de los ejes de rotación. La figura 16 muestra el procedimiento utilizado para realizar la lectura de velocidad de rotación de los ejes de cada uno de los tres cuerpos.



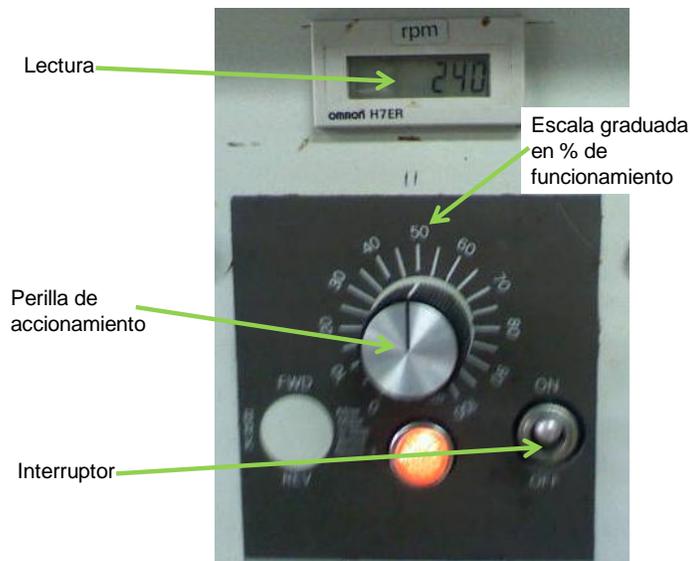
**Figura 16. Lectura de datos para la calibración de los ejes de rotación.**

Se realizó la cuantificación de las revoluciones por minuto de los ejes, pieza que en este caso se denominó “árbol de máquina”, estas rotaciones fueron colectados mediante el acoplamiento del tacómetro manual utilizando para esto la pieza llamada “polea” (de 16 mm de diámetro), de esta manera se puso en contacto físico la “polea” para cuantificar la rotación que el “árbol de máquina” (de 50 mm de diámetro) generó sobre la “polea” del tacómetro. En el Cuadro 6 se pueden observar las lecturas tomadas como resultado de este proceso, a estos valores se les denominó “rpm1”.

**Cuadro 6. Valores de “rpm1” para cada uno de los 3 ejes de rotación desde el 15% hasta el 100% de su capacidad de funcionamiento.**

ROTOR	CAPACIDAD DE FUNCIONAMIENTO PARA CADA EJE DE ROTACIÓN																			
	15%	20%	25%	30%	35%	40%	45%	50%	52%	55%	60%	63%	65%	70%	75%	80%	85%	90%	95%	100%
1	110	185	270	330	440	520	640	760	780	860	960	1026	1070	1180	1270	1320	1440	1520	1600	1660
2	180	260	340	420	530	620	700	800	824	860	940	988	1020	1100	1200	1260	1340	1420	1500	1580
3	130	210	305	380	440	560	630	720	748	790	880	940	980	1070	1130	1220	1320	1450	1540	1600

Los datos del Cuadro 6 fueron tomados utilizando los porcentajes de funcionamiento de la perilla de accionamiento de los ejes de rotación. Como se observa en la figura 17, para cada cuerpo existe una perilla con una escala graduada que va del 0 al 100% de capacidad de funcionamiento, en cada una de las etapas de graduación se fueron colectando datos, excepto en funcionamiento menor al 15%. En la práctica, valores por debajo de esta capacidad generan movimientos muy lentos y se consideró que tendría poca importancia para los objetivos de este trabajo.



**Figura 17. Perilla de funcionamiento para un eje de rotación con raspadores acoplados.**

Los datos llamados “rpm1” representan la rotación que el árbol de máquina efectuó sobre la polea del tacómetro utilizado. Para conocer las rpm de los ejes de rotación con raspadores acoplados se procedió a transformar los valores de “rpm1” a valores llamados “rpm”, siendo estos últimos los valores físicos de funcionamiento de los ejes raspadores. Para esta transformación se utilizó la ecuación (23).

$$\text{rpm} = \frac{(\text{rpm1})(d)}{D} \quad (23)$$

Donde:

d= Diámetro de la polea utilizada (16 mm)

D= Diámetro del árbol de la máquina (50 mm)

rpm1= Número de rpm generadas en la polea del tacómetro

Los resultados de la transformación de los datos del tacómetro indican la rotación real los ejes raspadores en cada uno de los porcentajes de funcionamiento de la perilla de accionamiento. En el Cuadro 7 se hace un resumen de estas observaciones.

**Cuadro 7. Lecturas reales (rpm) de cada uno de los ejes de rotación con paletas raspadoras acopladas.**

ROTOR	CAPACIDAD DE FUNCIONAMIENTO PARA CADA EJE DE ROTACIÓN																			
	15%	20%	25%	30%	35%	40%	45%	50%	52%	55%	60%	63%	65%	70%	75%	80%	85%	90%	95%	100%
1	35	60	86	106	141	166	205	243	251	275	307	328	342	377	406	422	461	436	512	531
2	58	83	109	134	170	199	224	256	264	275	301	316	326	352	384	403	429	454	480	505
3	42	67	98	122	141	179	202	230	239	253	282	301	314	342	362	390	422	464	493	512
rpm																				

Para generar las 200, 250 y 300 rpm planteadas para el experimento se deben accionar las perillas de acuerdo a los porcentajes de funcionamiento que se indican en el Cuadro 8.

**Cuadro 8. Condiciones de funcionamiento de los ejes con raspadores de acuerdo a la velocidad de rotación planteadas en el diseño experimental.**

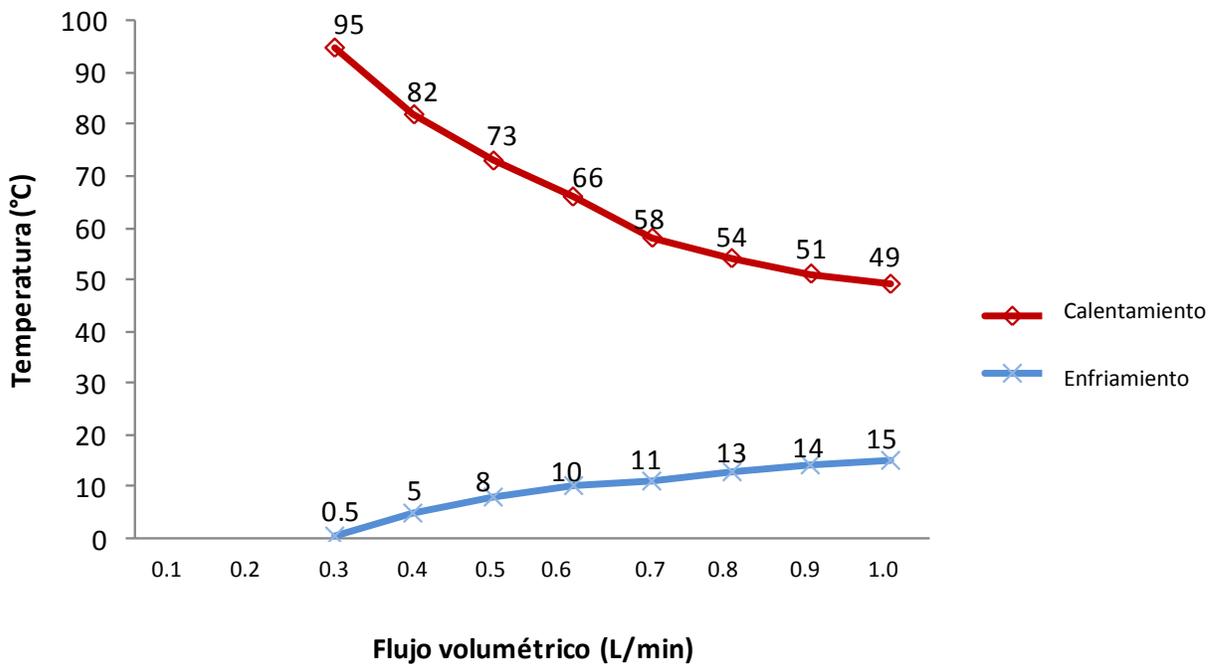
ROTOR	CAPACIDAD DE FUNCIONAMIENTO (%)		
	1	45	52
2	40	50	60
3	45	55	63
EFFECTO (rpm)	200	250	300

Por ejemplo, para realizar un tratamiento experimental utilizando 250 rpm como velocidad de rotación se debe accionar el eje del cuerpo 1 al 52% de su capacidad, el eje del cuerpo 2 deberá estar al 50% y finalmente, el eje 3 deberá estar funcionando en un 55 % de su capacidad.

De esta manera, quedaron calibrados cada uno de los ejes garantizando así que la velocidad de agitación se realizaría de acuerdo al diseño experimental.

#### **6.1.4. Manejo de flujos máximos y mínimos**

Se procedió a realizar pruebas preliminares para el tratamiento térmico pero utilizando agua como fluido de trabajo. Se utilizó agua debido a que cuando se realizaron estas pruebas no había producción de mango. Con estas corridas se pudieron ubicar los flujos máximos y mínimos permisibles por el sistema para el caso del agua y sirvieron para ubicar los flujos deseados por el diseño experimental y verificar de esta manera si era posible manejar los flujos del diseño considerando la capacidad del equipo. Se utilizaron 200 rpm como velocidad de rotación; es decir, si esos flujos fueron posibles a 200 rpm, a mayor velocidad de agitación también serían posibles, ya que el efecto de la agitación contribuye a mejorar la velocidad del flujo volumétrico, ver figura 18. Se utilizó temperatura del aceite térmico a 150°C y alimentación constante a 20°C.



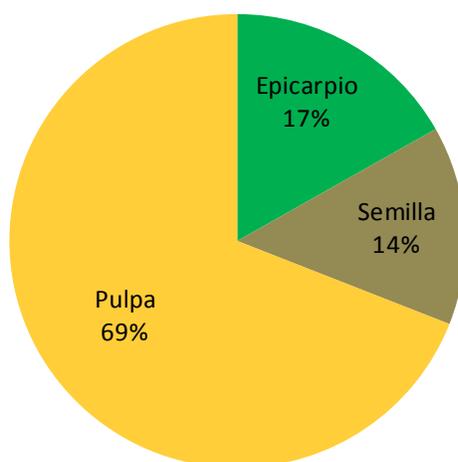
**Figura 18. Temperaturas de calentamiento alcanzadas en el cuerpo 1 y de enfriamiento en el cuerpo 3 a diferentes flujos de alimentación.**

El medio de enfriamiento se acondicionó a una temperatura fija de  $-10^{\circ}\text{C}$ . Se observa que al variar el flujo de alimentación los cambios de temperatura son muy grandes. Esto significa que se debe tener mucho cuidado al manejar un flujo en específico, ya que un flujo incorrecto podría llevar a datos erróneos de temperatura. Y por ello, es necesario considerar el establecimiento a régimen permanente, considerando un mismo nivel de alimentación, esto ocasiona una presión de alimentación constante. Cuando se haya llegado al régimen constante se está en posibilidad de poder continuar con las demás operaciones, de lo contrario no debe proseguirse, ya que el flujo aún no se ha estabilizado.

## 6.2 Resultados finales

### 6.2.1. Caracterización de la materia prima

Con la finalidad de identificar la cantidad de puré que se puede obtener debido a la composición fisiológica se realizó la cuantificación del volumen de la pulpa por fruto. En la figura 19 se muestra la composición porcentual de las principales partes que componen un fruto de mango Manila, con esto se puede obtener el rendimiento en planta para la elaboración de puré.



**Figura 19. Rendimiento en puré de mango Manila**

Se observa que la parte comestible ocupa el 69% para el caso de mango Manila. Laksminarayana y col. (1975) reportaron un rendimiento de 72.83% para mango Manila, pese a lo anterior el resultado de este trabajo es similar al reportado por Espinosa (2005) en el que se obtiene un rendimiento del 67.7% de pulpa.

Como actividad rutinaria se realizó a cada lote de puré la caracterización para identificar la calidad que presentaba el producto.

El Cuadro 9 muestra los resultados de la caracterización fisicoquímica realizada a la materia prima antes de haber sido sometido a procesamiento térmico.

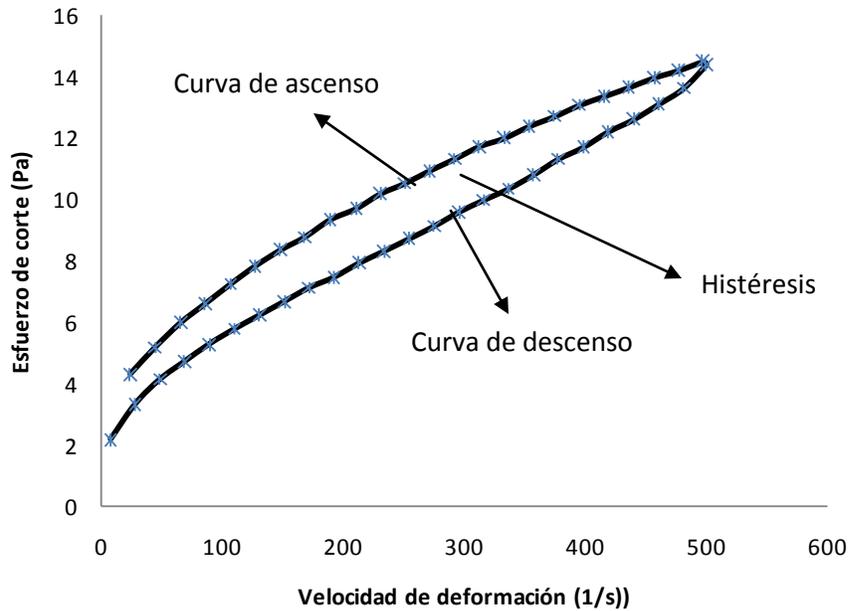
**Cuadro 9. Caracterización del puré de mango Manila.**

Parámetro	Cuantificación
pH	4.2±0.2
Acidez titulable (%ácido cítrico)	0.58±0.15
Humedad (%)	82.1±1.1
Sólidos solubles (°Bx)	19±0.5
Densidad (kg/m <sup>3</sup> )	1037.00
Capacidad calorífica (J/kg°C)	3573.13
Conductividad térmica (W/m°C)	0.503

Aunque estas mismas cuantificaciones se realizaron antes y después de los tratamientos experimentales se comprobó que no existió modificación alguna entre la materia prima con o sin tratamiento, motivo por el cual se consideraron como variables constantes durante toda la etapa experimental. Los resultados son congruentes con lo que indica la bibliografía, tales como Harvey (1983) y Heldman (2007). Se afirma que el puré de mango utilizado para este proyecto cumplió con los requerimientos homogéneos de calidad requeridos.

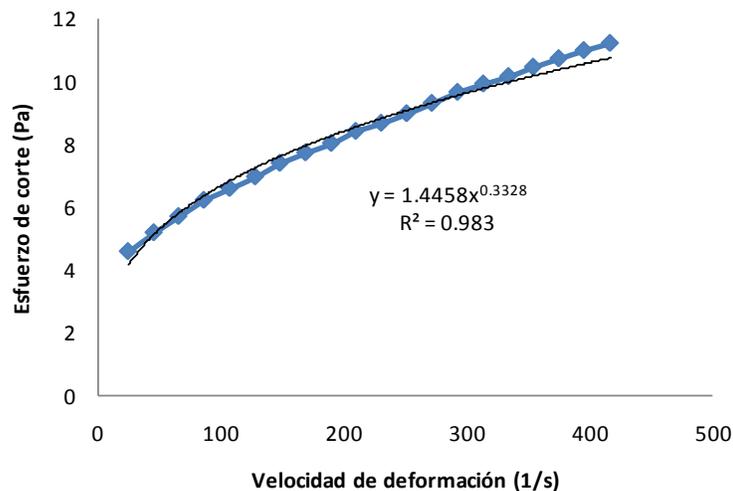
### **6.2.2. Determinación de la viscosidad.**

Se realizó la caracterización reológica del puré de mango Manila para identificar el tipo de fluido de acuerdo a las características que presentó al ser sometido a esfuerzos. La figura 20 muestra los resultados obtenidos con muestras testigo para esta prueba que se realizó en un viscosímetro modelo Haake RT20. Mientras que en el Anexo VI se encuentran tabulados los datos de viscosidad aparente para cada uno de los tratamientos, datos con los que se calcularon los valores de viscosidad efectiva.



**Figura 20. Comportamiento pseudoplástico del puré de mango Manila.**

Se observa que la viscosidad aparente del mango cambia a medida que aumenta la velocidad de deformación y el esfuerzo de corte. Llega a un máximo y cuando el esfuerzo comienza a disminuir la curva que se describe no es la igual a la de ascenso, esto indica la presencia de histéresis. Este comportamiento indica que el puré presentó ruptura de sus partículas por el esfuerzo que sufrió al realizar la curva de ascenso. Un fluido de tipo pseudoplástico se ajusta perfectamente a la Ley de la Potencia y tal como se muestra en la figura 21 se pueden obtener los valores  $k$  y  $n$ .



**Figura 21. Ajuste del fluido a la Ley de la Potencia.**

Se realizó la cuantificación de las muestras antes y después del procesamiento. Sin embargo, al medir la viscosidad de ambas se encontró que estas eran similares y solo en algunos casos hubieron variaciones de 0.2 y 0.15 Pa.s (tratamiento 1 y 7, respectivamente), observación que se consideró nula para efectos de variaciones de viscosidad. Esto se debe a que las determinaciones se realizaron a una misma temperatura (20°C) y a que no se realizó alguna operación de concentración (por ejemplo evaporación), por lo tanto, los grados Brix se mantuvieron constantes. En el Cuadro 10 se relaciona cada uno de los tratamientos con los valores k y n obtenidos, estos valores fueron utilizados para calcular la viscosidad efectiva con el uso de la ecuación (7).

**Cuadro 10. Viscosidad efectiva del puré de mango Manila para cada tratamiento.**

Tratamiento	Fo (mL/min)	Tc (°C)	RR (rpm)	TR (A, B, C)	k	n	V (m/s)	8V/D	$\mu_e$ (Pa.s)
1	300	155	300	A	1.44	0.33	0.00406	1.50	1.26
2	500	155	300	C	2.32	0.36	0.00677	2.50	1.48
3	500	155	200	A	0.94	0.35	0.00677	2.50	0.59
4	300	155	200	C	1.87	0.37	0.00406	1.50	1.65
5	500	145	300	A	1.09	0.41	0.00677	2.50	0.72
6	300	145	300	C	1.61	0.38	0.00406	1.50	1.43
7	300	145	200	A	2.32	0.28	0.00406	1.50	1.99
8	500	145	200	C	1.44	0.38	0.00677	2.50	0.93
9	400	150	250	B	1.28	0.39	0.00542	2.00	0.95
10	400	150	250	B	1.04	0.37	0.00542	2.00	0.76
11	400	150	250	B	1.18	0.35	0.00542	2.00	0.86

Quintero (2010) encontró que la viscosidad de un puré comercial es de 0.477 Pa.s (posteriormente de haber sido sometido a un tratamiento enzimático para disminuir la viscosidad y aumentar la facilidad de manejo industrial). En este caso la pulpa no fue sometida a ningún tipo de tratamiento con la finalidad de disminuir la viscosidad, por ello, la viscosidad efectiva presentada se debe únicamente a la composición fisiológica de los frutos. Se observa que la viscosidad efectiva es diferente entre un tratamiento y otro, misma que se puede deber a un mayor o menor grado de

refinamiento en planta, es decir, algunos lotes llegaron con mayor o con menos contenido de fibra, también podría deberse a un homogeneizado incorrecto. Cabe señalar que a medida que se extrae la pulpa de la parte más cercana al endocarpio el contenido de fibra aumenta (Battacharya, 1999), por este motivo se debe pasar el producto a través de una malla de 1 mm de abertura para eliminar todas aquellas partículas grandes y posterior a esta operación se debe dar un homogeneizado completo. Si no se realizan estas operaciones correctamente los lotes pueden presentar diferencias entre uno y otro, como en este caso.

### 6.2.3. Temperaturas de tratamiento del puré

Durante la corrida experimental de cada uno de los tratamientos se colectaron las temperaturas que el medio de transmisión (aceite térmico o refrigerante) generó sobre el fluido de trabajo. En el cuadro 11, se puede observar que las temperaturas más elevadas se originaron a menores flujos volumétricos y las temperaturas más bajas a mayor volumen transportado. La nomenclatura TS1 corresponde a la temperatura inmediata al salir del cuerpo de calentamiento (cuerpo 1), mientras que TS3 indica la temperatura cuando el producto salió de la zona de enfriamiento (cuerpo 3).

**Cuadro 11. Condiciones experimentales alcanzadas durante los diferentes tratamientos térmicos del puré de mango.**

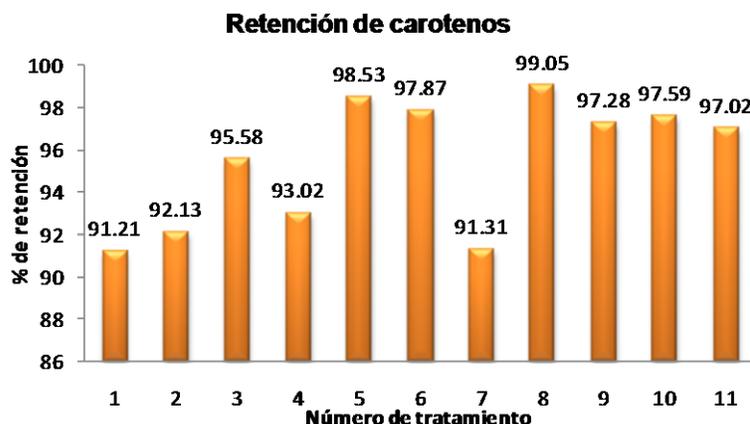
Tratamiento	Fo (mL/min)	Tc (°C)	RR (rpm)	TR (A, B, C)	TS1	TS3
1	300	155	300	A	90.6	10.0
2	500	155	300	C	69.3	11.5
3	500	155	200	A	68.1	12.3
4	300	155	200	C	89.9	9.3
5	500	145	300	A	64.9	11.0
6	300	145	300	C	81.0	8.9
7	300	145	200	A	82.6	9.3
8	500	145	200	C	62.1	10.8
9	400	150	250	B	75.0	10.5
10	400	150	250	B	74.7	10.5
11	400	150	250	B	76.9	10.4

Se alcanzaron mayores temperaturas usando 155°C en el medio de calentamiento, cuando se manejó el flujo de 500 mL/min la temperatura disminuyó notablemente, ya que como lo menciona Abichandani (1987) las temperaturas que se alcancen en un proceso dependen en gran medida del flujo que se esté utilizando.

No existió variación notable en las temperaturas de enfriamiento, en promedio la temperatura de salida fue de 10°C, ya que el medio de enfriamiento fue fijado a -10°C y las variaciones que se reportan en el cuadro 11 se deben al flujo utilizado.

#### 6.2.4. Retención de carotenos

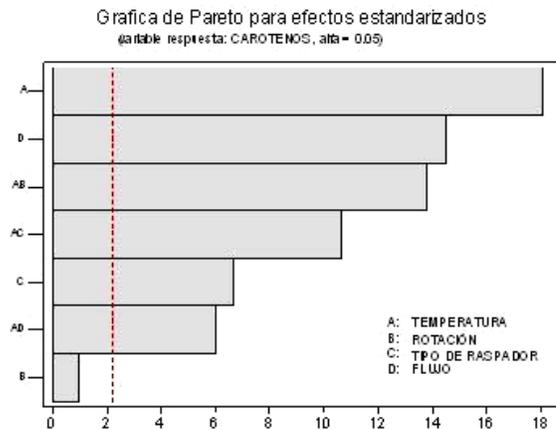
Se sabe que los carotenos son altamente sensibles a factores como el oxígeno, la luz y el calor. En la Figura 22 muestra los cambios ocurridos en la retención de carotenos, se graficaron los resultados promedio de las dos repeticiones.



**Figura 22. Porcentaje de retención de carotenos a la salida del ICSR.**

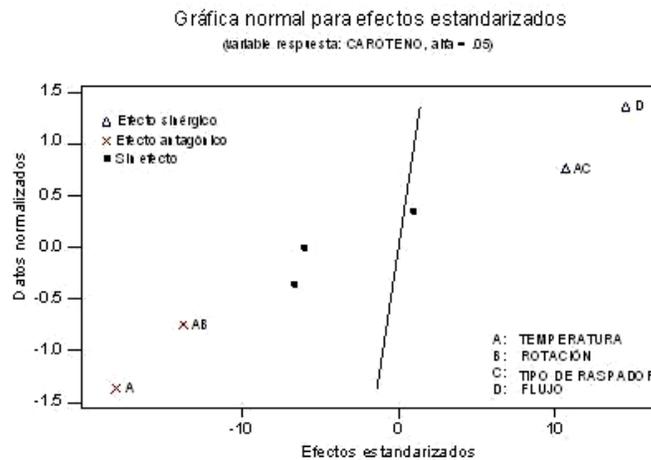
Se observa que los tratamientos 8, 5 y 6 son los que ocasionaron mejores condiciones de retención de carotenos comparados contra los demás tratamientos. El tratamiento que tuvo menor cantidad de carotenos perdidos fue el tratamiento 8, con menos del 1% de pérdidas, mientras que el tratamiento con mayor porcentaje de pérdida correspondió al tratamiento 1 en el cual se perdió 8.79%. En ambos tratamientos el factor determinante fue la temperatura de procesamiento, ya que cuando se usó la temperatura alta la pérdida de carotenos fue mayor y viceversa. Es importante señalar que cuando se manejó el flujo a menor velocidad (300 mL/min) el

alimento fluyó más lento dentro del cuerpo de calentamiento, por lo tanto, hubo mayor tiempo de exposición al calor, esto trajo como consecuencia mayor pérdida de este componente. Al analizar los datos mediante un análisis de varianza (Anexo VII y Figura 23) se observa que la velocidad de rotación fue la única variable experimental que no afectó la retención de carotenos.



**Figura 23. Gráfica de Pareto para el porcentaje de retención de carotenos posterior al tratamiento térmico.**

Todas las demás variables fueron decisivas para la cantidad de carotenos retenidos. El efecto que tuvo cada variable se muestra de manera más clara en la Figura 24.

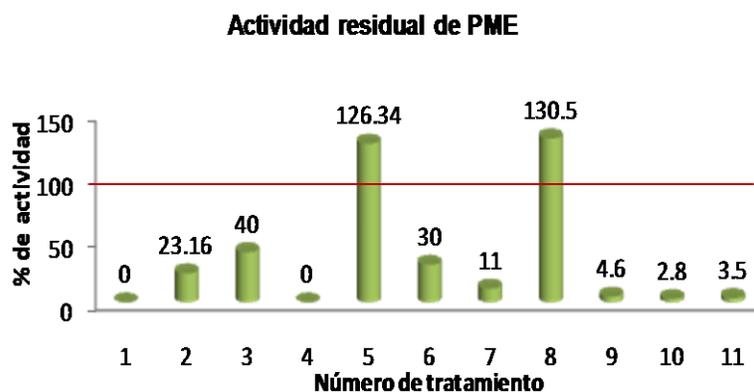


**Figura 24. Gráfica normal para las variables experimentales y la retención de carotenos.**

Las variables que contribuyeron a la mejor retención de carotenos fue en primer lugar el flujo utilizado y en segundo lugar la combinación temperatura\*tipo de raspador. Como efectos antagónico, la temperatura es el factor que ocasionó mayor cantidad de carotenos perdidos, de igual manera, la combinación de temperatura\*velocidad de rotación fue el segundo elemento con mayor contribución a la pérdida de carotenos. Flores (2005) encontró que la temperatura del medio de calentamiento a 155°C no es adecuada para el tratamiento de puré de zanahoria, ya que provoca olor y sabor a cocido. En este caso, cuando se usó la temperatura en su nivel alto (155°C) ocasionó que se perdiera la mayor cantidad de carotenos. Sin embargo, la prueba de Tukkey ( $q_{\alpha=0.05}$ ) indicó que no existe diferencia significativa entre un tratamiento y otro. Por lo tanto, cualquiera de los tratamientos mantuvo una buena calidad posterior a su procesamiento.

### 6.2.5. Inactivación de pectinmetilesterasa

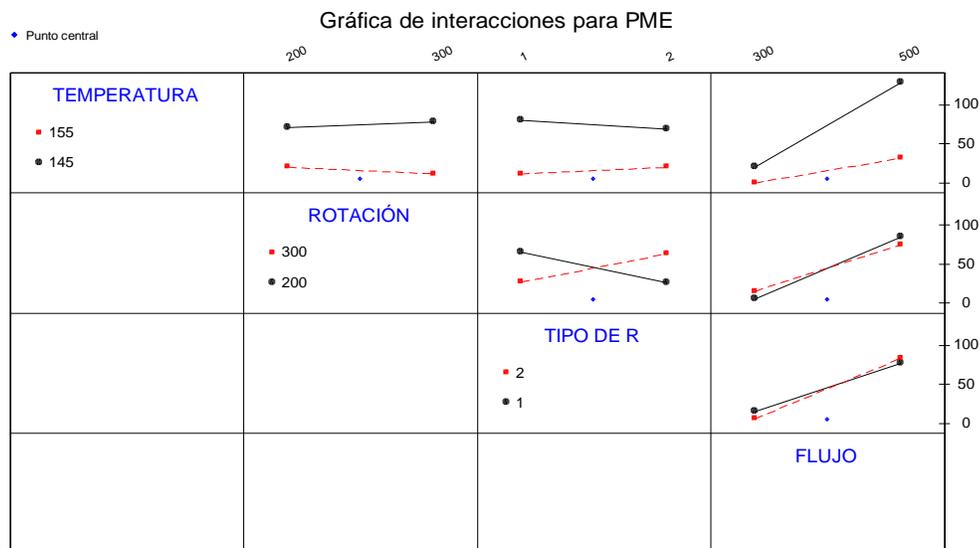
De acuerdo a la Figura 25, se observa que en los tratamientos 1 y 4 se obtuvo la inactivación total de la enzima PME, en estos tratamientos las temperaturas que se generaron en el puré fueron de 90.6°C y 89.9°C. Esta enzima empieza a ser termolábil a temperaturas cercanas a 74°C (Awad, 1980), en estos casos las temperaturas de tratamiento fueron mayores a las que tolera la PME, lo anterior ocasiona que se inactive totalmente la enzima ya que al realizar las cuantificaciones no se detectó actividad enzimática.



**Figura 25. Porcentaje de actividad residual de la enzima PME.**

En los tratamientos 5 y 8 no se inactivó la enzima, al contrario, se ocasionó que ésta se manifestara con mayor intensidad posterior al procesamiento térmico. En ambos tratamientos las temperaturas máximas alcanzadas fueron de 64.9 y de 62.1, estas temperaturas no fueron suficientes para poder inactivar esta enzima. Los aumentos en la actividad de la enzima PME se deben a que el tratamiento térmico ocasionó la ruptura de las estructuras externas de protección, con ello, las partes internas quedaron expuestas manifestando mayor actividad comparada con la inicial. Llano (2007) menciona que para inactivar PME en mezclas de zanahoria – papaya fueron necesarias temperaturas superiores a 85°C. Por otra parte, Vivar y colaboradores (2007) encontraron que a temperaturas entre 50 y 60°C se tiene un máximo de actividad enzimática de PME en pulpa de tejocote comparada con la cantidad inicial.

Para efectos del procesamiento térmico tiene gran importancia aquellos elementos que contribuyan a disminuir la retención de esta enzima, entre menor sea la cantidad retenida hay una mejor consistencia del puré de mango. De acuerdo al análisis estadístico del Anexo VII, se observa que la temperatura en su nivel alto ocasiona menor cantidad de la enzima PME residual. En la Figura 26 se aprecia que la interacción “alta temperatura\*bajo flujo” es un factor que mejora la calidad de los purés con respecto a esta enzima, pues la actividad residual se disminuye.



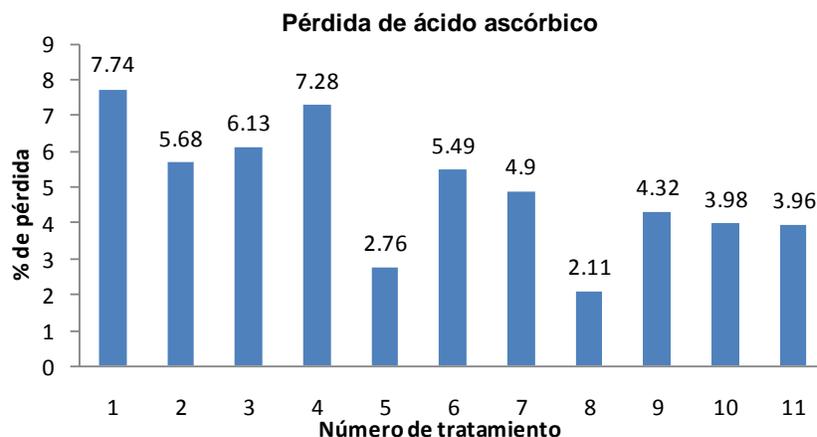
**Figura 26. Gráfica de interacciones para el procesamiento de puré de mango Manila.**

Entonces, durante el procesamiento térmico deben evitarse flujos altos, ya que se ocasiona que el puré permanezca con bajas temperaturas y la enzima no se inactive por completo. En este caso, los flujos de 300mL/min ocasionaron que el puré fuera sometido a altas temperaturas. Y en el caso del tratamiento 1, hubo un mejor mezclado por efecto de los ejes de rotación con doble fila de unidades de raspado. Estas condiciones, como lo menciona Van Boxtel (1983), mejoraron el efecto de mezclado y la exposición del fluido al calor.

### 6.2.6. Cambios ocurridos en ácido ascórbico

La cuantificación inicial de 3 muestras por triplicado indicó que la materia prima llegó con 28.4 mg/100 g de pulpa en contenido de ácido ascórbico. Las mismas muestras después de haber sido congeladas durante tres meses a -15°C indicaron la presencia de 18.08 mg/100 g. Esto indica que existió una pérdida por congelamiento del 36% de ácido ascórbico.

Este valor de pérdidas por congelamiento se utilizó para realizar la corrección por congelamiento, de tal manera que los resultados de pérdida de ácido ascórbico por efectos del tratamiento térmico corregidos se muestran en la Figura 27.

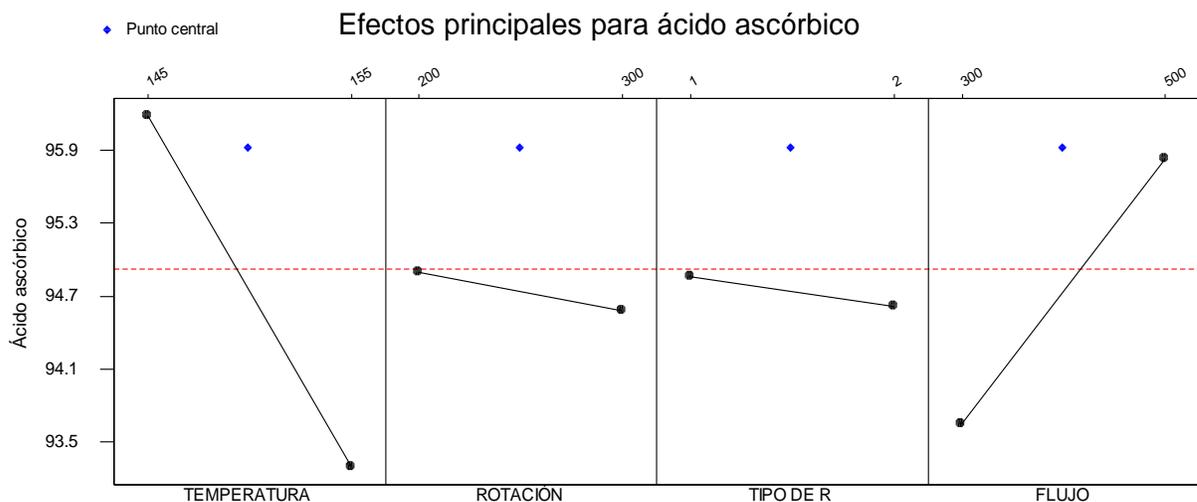


**Figura 27. Porcentaje de pérdida de ácido ascórbico en cada tratamiento.**

Como se trata de datos corregidos por congelamiento, los resultados mostrados indican que los cambios únicamente se deben a la acción del tratamiento térmico.

Se observa que en el tratamiento 1 se generó la mayor cantidad de pérdida de ácido ascórbico (7.74%). Este tratamiento fue sometido a 155°C (temperatura máxima alcanzada por el medio de calentamiento), 300 rpm como velocidad de agitación, se usó un eje raspador con doble hilera de paletas raspadoras y un flujo de 300 mL/min. El puré fue sometido a una temperatura elevada (90.6°C en el puré) ocasionando la pérdida de ácido ascórbico.

Al realizar el análisis de varianza (Anexo VII), se observa que el principal factor que afecta la retención del ácido ascórbico fué la temperatura (Figura 28), ya que cuando se utilizó esta variable en su nivel alto la retención de ácido ascórbico fue mínima y cuando se usó a un nivel bajo hubo mayor retención. En esta misma figura se aprecia que si se utiliza el flujo volumétrico en su nivel alto la retención de ácido ascórbico también es alta. Todo esto coincide con el carácter termosensible de esta vitamina, ya que al exponer el fluido a las altas temperaturas se ocasionó mayor pérdida de este componente. Carrillo (2009) reporta que para el caso del secado de pimiento morrón la temperatura representó un efecto antagónico al ocasionar la desnaturalización del ácido ascórbico.



**Figura 28. Gráfica de efectos principales para el ácido ascórbico.**

Por otra parte, en el tratamiento 8 la degradación de este componente fue menor comparado con los demás tratamientos, se tienen como resultado de las cuantificaciones que en este caso se perdió únicamente el 2.11% de ácido ascórbico

con respecto a la cantidad que tenía la muestra antes de ser sometida a tratamiento térmico. Las condiciones bajo las cuales se realizó este tratamiento fueron para el medio de calentamiento a 145°C, agitación a 200 rpm, el raspador utilizado fue a una sola hilera y el flujo de alimentación de 500 mL/min. Bajo estas condiciones la temperatura del alimento pasó de 20.8°C a 62.1°C.

La velocidad de rotación y el tipo de raspador ocasionaron efectos mínimos sobre esta variable respuesta (ver efectos de rotación y tipo de raspador en la Figura 28). Y las variables que tuvieron efectos fueron la temperatura y el flujo utilizado. A pesar de estos resultados, la prueba de Tukkey ( $q_{\alpha=0.05}$ ) demostró que las diferencias no fueron estadísticamente significativas entre un tratamiento y otro.

#### **6.2.7. Coeficiente interno de transferencia de calor experimental.**

Los cálculos para determinar el coeficiente interno de transferencia de calor experimental se muestran en el Anexo IV.

De acuerdo al cuadro 12, se observa que los datos de transferencia para la etapa de calentamiento tienen un máximo de 433.01 W/m<sup>2</sup>°C y un mínimo de 361.63 W/m<sup>2</sup>°C. La menor transferencia ocurrió en el tratamiento 6, para el cual se manejaron 145°C para el medio de calentamiento, rotación de 300 rpm, ejes de rotación con una sola hilera de raspadores y el flujo utilizado fue de 300 mL/min.

Durante el calentamiento, la mejor transferencia de calor ocurrió en el tratamiento 3, las condiciones de éste fueron 155°C del medio de calentamiento, rotación de 200 rpm, unidades de raspado acopladas en doble hilera y el flujo manejado de 500 mL/min.

**Cuadro 12. Coeficiente interno de transferencia de calor experimental ( $h_e$ ) para la etapa de calentamiento.**

Tratamiento	Fo (mL/min)	Tc (°C)	RR (rpm)	TR (A, B, C)	t1	t2	T1	T2	$h_e$ (W/m <sup>2</sup> °C)
1	300	155	300	A	155.37	152.08	20.68	90.57	395.49
2	500	155	300	C	155.06	150.58	20.55	69.20	421.68
3	500	155	200	A	155.18	150.52	20.55	68.10	433.01
4	300	155	200	C	155.43	151.83	20.33	89.93	392.31
5	500	145	300	A	145.79	141.86	20.74	64.59	418.20
6	300	145	300	C	145.89	142.76	20.91	80.95	361.62
7	300	145	200	A	145.60	142.35	20.99	83.98	384.87
8	500	145	200	C	146.19	142.72	20.84	62.15	388.71
9	400	150	250	B	150.73	147.16	20.81	75.06	408.35
10	400	150	250	B	151.1	147.21	20.54	74.08	400.15
11	400	150	250	B	149.30	145.70	20.70	76.90	431.03
Promedio					150.51	146.8			403.22

Las condiciones del tratamiento 3 favorecieron una mejor transferencia de calor, la velocidad de agitación permitió exponer totalmente la interacción alimento-calor, mezclado que fue beneficiado por una doble hilera de unidades de raspado.

Los datos de temperatura que se colectaron permitieron calcular el coeficiente interno de transferencia de calor para la etapa de preenfriamiento. El Cuadro13 muestra dichos resultados.

**Cuadro 13. Coeficiente interno de transferencia de calor experimental ( $h_e$ ) para la etapa de preenfriamiento.**

Tratamiento	Fo (mL/min)	Tc (°C)	RR (rpm)	TR (A, B, C)	t1	t2	T1	T2	$h_e$ (W/m <sup>2</sup> °C)
1	300	155	300	A	20	37	90.57	33.83	1173.34
2	500	155	300	C	20	32	69.20	37.94	1205.92
3	500	155	200	A	20	35	68.10	38.33	1229.59
4	300	155	200	C	20	32	89.93	35.00	1026.90
5	500	145	300	A	20	33	64.59	37.50	1165.60
6	300	145	300	C	20	34	80.95	34.38	1024.08
7	300	145	200	A	20	33	83.98	33.13	1086.93
8	500	145	200	C	20	33	62.15	38.00	1072.89
9	400	150	250	B	20	32	75.06	34.13	1267.04
10	400	150	250	B	20	35	74.08	36.00	1209.82
11	400	150	250	B	20	35	76.90	35.80	1256.69
Promedio					20	33.72			1156.25

Para este caso se manejó agua potable como medio de enfriamiento, la cual presentó una temperatura constante de 20°C (temperatura en día soleado). Los tratamientos en el punto central mostraron la mejor transferencia de calor, pese a ello, el tratamiento 3 nuevamente demostró ser el mejor de entre los 8 tratamientos del diseño experimental.

Para la etapa de enfriamiento (Cuadro 14) el tratamiento 8 es el que tuvo mayor capacidad de transferencia de calor, ya que se alcanzó 875.45 W/m<sup>2</sup>°C, y fue el valor más alto alcanzado en toda la etapa experimental. Las condiciones del tratamiento 8 corresponden a una temperatura del medio de enfriamiento de -9.85°C, rotación de 200 rpm, se utilizó un eje con paletas raspadoras acopladas en una sola hilera y el flujo utilizado fue de 500 mL/min.

**Cuadro 14. Coeficiente interno de transferencia de calor experimental ( $h_e$ ) para la etapa de enfriamiento.**

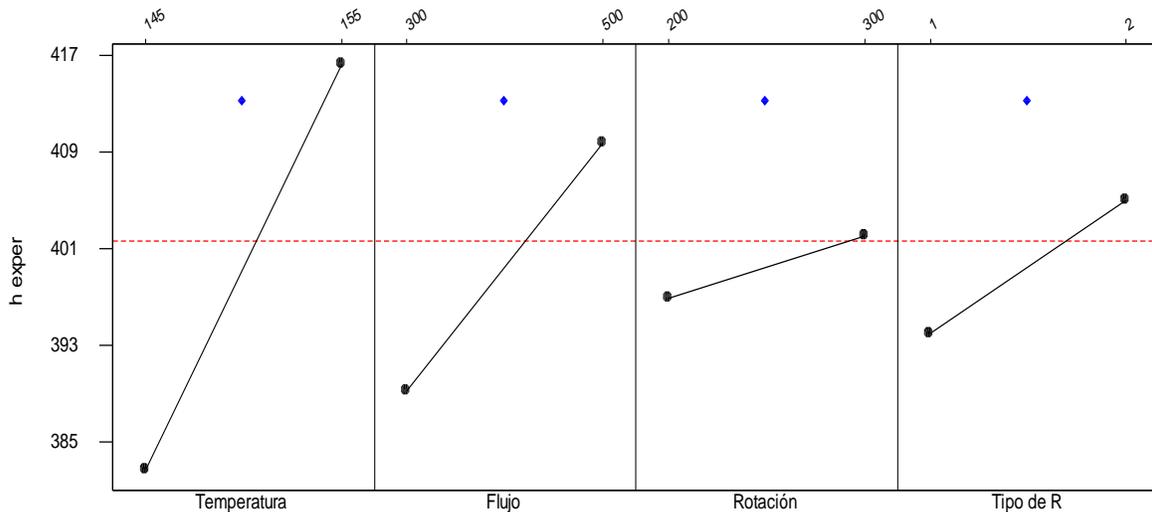
Tratamiento	Fo (mL/min)	Tc (°C)	RR (rpm)	TR (A, B, C)	t1	t2	T1	T2	$h_e$ (W/m <sup>2</sup> °C)
1	300	155	300	A	-9.55	-8.00	33.83	10.00	506.52
2	500	155	300	C	-9.24	-8.60	37.94	11.50	853.98
3	500	155	200	A	-8.85	-8.40	38.33	12.30	828.59
4	300	155	200	C	-9.53	-9.13	35.00	09.30	538.78
5	500	145	300	A	-9.60	-9.10	37.50	11.00	859.05
6	300	145	300	C	-8.92	-7.30	34.38	8.88	569.77
7	300	145	200	A	-8.99	-7.43	33.13	9.31	531.69
8	500	145	200	C	-9.85	-9.19	38.00	10.82	875.45
9	400	150	250	B	-9.55	-8.95	34.13	10.50	647.56
10	400	150	250	B	-9.00	-8.75	36.00	10.50	692.31
11	400	150	250	B	-9.50	-8.80	35.80	10.40	686.65
Promedio					-9.32	-8.51			690.03

Mediante un análisis de varianza con  $\alpha=0.05$  se determinó que los coeficientes calculados para cada uno de los cuerpos son diferentes entre sí. Por este motivo se realizó una prueba de Tukey [ $q_{\alpha=0.05, (3,2)}$ ] mediante la que se pudo establecer que los valores numéricos para el calentamiento y para el enfriamiento no fueron diferentes estadísticamente, mientras que el coeficiente interno de transferencia de calor para la etapa de preenfriamiento fue la que tuvo mayor diferencia con respecto a las demás.

Cabe señalar que el agua de alimentación para el medio de preenfriamiento no fue recirculado, por esta razón siempre ingresó al proceso a 20°C y debido a que se encontraba en fluidez constante el puré se pudo enfriar notablemente. Sin embargo, este enfriamiento ocasionó ganancia de calor para el agua de preenfriamiento, el gradiente térmico entre la entrada y la salida fue muy grande (13.72°C) comparado con el gradiente del aceite térmico (3.71°C) o del etilenglicol (0.81°C), este gradiente es uno de los factores con los que se justifica el alto coeficiente interno de transferencia de calor experimental para el cuerpo de preenfriamiento.

Quintanar (2008) determinó que los coeficientes de transferencia de calor aumentan a mayor flujo y a mayor revolución de los raspadores, ya que el fluido tiene más movimiento y los raspadores no permiten que se adhiera el puré a la superficie del área de transferencia. Para este caso, se puede observar en la Figura 29 que para el calentamiento (al igual que en los otros dos cuerpos) los factores que mayor efecto tuvieron sobre la variable respuesta fueron en primer lugar la temperatura y en segundo lugar el flujo y el tipo de raspador, con respecto a este último se observa que cuando se usó doble hilera de unidades de raspador el coeficiente interno de transferencia de calor fue mayor comparado cuando solo se usó una fila.

Gráfica de efectos principales para  $h$  experimental



**Figura 29. Gráfica de efectos principales para el coeficiente interno de transferencia de calor experimental.**

### 6.2.8. Coeficiente interno de transferencia de calor teórico.

El coeficiente interno de transferencia de calor teórico es independiente de las temperaturas que se estén manejando, es decir, aquí no se considera si se trata de calentamiento o de enfriamiento. Es dependiente de factores tales como el número de raspadores, velocidad de rotación de los raspadores, viscosidad del fluido, conductividad térmica, flujo axial (calculado a partir del flujo volumétrico). En el Anexo IV se muestra un ejemplo del cálculo de  $h$  de manera teórica. Y se hace caso

omiso de la temperatura del medio de calentamiento o de enfriamiento. Se trata de un cálculo que generaliza los resultados para cada uno de los tres cuerpos.

En el cuadro 15 se observan los resultados del cálculo teórico para el coeficiente interno de transferencia de calor.

**Cuadro 15. Coeficiente interno de transferencia de calor teórico ( $h_t$ ).**

Tratamiento	$v$ (m/s)	RR(rps)	$n_B$	$\mu_e$ (Pa.s)	$h_t$ (W/m <sup>2</sup> °C)
1	0.00406	5	2	1.26	855.37
2	0.00677	5	1	1.48	714.81
3	0.00677	3.33	2	0.59	832.38
4	0.00406	3.33	1	1.65	455.64
5	0.00677	5	2	0.72	1062.21
6	0.00406	5	1	1.43	589.38
7	0.00406	3.33	2	1.99	653.10
8	0.00677	3.33	1	0.93	566.25
9	0.00542	4.16	1.5	0.95	740.00
10	0.00542	4.16	1.5	0.76	746.66
11	0.00542	4.16	1.5	0.86	743.04
Promedio					723.53

**Definiciones:**

$v$ = Velocidad axial del flujo.

RR=Velocidad de rotación de los raspadores.

$n_B$ = Número de raspadores por eje en cada giro.

$\mu_e$  = Viscosidad efectiva.

$h_t$ = Coeficiente interno de transferencia de calor teórico.

Este coeficiente no muestra exactitud en congruencia con las condiciones que se estén manejando en el momento. De acuerdo a los cálculos, el tratamiento 5 es el que mejoró la transferencia de calor debido a la exposición total del alimento al calor, los factores que ocasionaron esta homogeneización fueron el flujo utilizado, alta rotación de los raspadores y la mayor cantidad de raspadores, combinación que no ocurrió de la misma manera en ninguno de los otros tratamientos.

Es importante notar que al obtener el promedio de  $h_e$  para la etapa de calentamiento, preenfriamiento y enfriamiento el resultado fue de 749.83 W/m<sup>2</sup>°C, este resultado es muy cercano al promedio que se obtuvo de manera directa para  $h_t$ , el cual fue de 723.53W/m<sup>2</sup>°C. Esto indica que para este caso en particular  $h_t$  es un promedio del comportamiento integral de  $h_e$  en sus tres etapas.

## VII. CONCLUSIONES.

Al realizar las corridas preliminares se determinó que el flujo mínimo permitido fue de 0.3L/min y el máximo de 1 L/min, esto de acuerdo a las condiciones de capacidad y de régimen permanente que deben prevalecer durante el desarrollo experimental.

El rendimiento para la elaboración de puré se ubicó en 69%, cantidad que coincide con la bibliografía para puré de mango Manila. Esto indica que el mango es un fruto con alto potencial para su transformación en puré. Los parámetros para la caracterización de la materia prima ( $\rho$ ,  $C_p$ ,  $k$ ,  $^{\circ}\text{Bx}$ ,  $\text{pH}$  y % de acidez) no presentaron diferencias significativas antes y después de los tratamientos usando un  $\alpha = 0.05\%$ .

Se identificó el puré de mango como un fluido pseudoplástico con presencia de histéresis. Dicho fluido se ajustó a la Ley de la Potencia para poder transformar la viscosidad aparente en viscosidad efectiva. Las variaciones detectadas en la viscosidad efectiva se deben a la presencia de partículas (fibra) y a su grado de refinación en planta.

Se observa que las temperaturas máximas alcanzadas corresponden a una combinación de aspas de doble hilera, temperatura de calentamiento de  $155^{\circ}\text{C}$ , flujo de 300 mL/min y rotación de 300 rpm (tratamiento 01).

Las temperaturas menores corresponden a 500 mL/min, una sola hilera de raspadores y 200 rpm como velocidad de rotación de las aspas (tratamiento 08).

La mayor cantidad de carotenos retenidos ocurrió en el tratamiento 8 y 6, donde las temperaturas alcanzadas fueron menores a  $70^{\circ}\text{C}$ . Mientras que las mayores pérdidas ocurrieron en los tratamientos 1 y 2 cuando la temperatura se ubicó por arriba de  $70^{\circ}\text{C}$ . Esto demuestra que los carotenos son altamente termosensibles. Un comportamiento similar ocurrió con el ácido ascórbico en el cual las pérdidas se ubicaron entre el 3.96% y el 7.74%.

Se logró inactivar la enzima PME en los tratamientos 1 y 4, estos fueron tratamientos que ocasionaron en el puré temperaturas de 90°C. Mientras que cuando las temperaturas en el puré fueron menores a 65°C la cuantificación posterior indicó mayor actividad. Esto se debe a la ruptura de estructuras de protección que ocasionaron una mayor exposición de la enzima sin inactivarla.

Las variaciones en los componentes bioquímicos se deben a la temperatura y flujo utilizados. Las condiciones de mayor exposición al calor fueron aumentadas por la presencia de turbulencia generadas por efecto de un mayor número de unidades de raspado y mayor velocidad de agitación.

Existe diferencia entre los valores del coeficiente interno de transferencia de calor teórico y experimental, los valores experimentales fueron menores a los que teóricos. Para este caso los valores experimentales demuestran mayor precisión, ya que considera las temperaturas en cada una de las etapas mientras que el cálculo teórico es un valor promedio de transferencia de calor que ocurre en los tres cuerpos de manera integral.

Se concluye que el tratamiento 1 (flujo de 300 mL/min, temperatura de calentamiento de 155°C, velocidad de agitación de raspadores de 300 rpm y un raspador con doble hilera de unidades de raspado) es el mejor tratamiento térmico específicamente para puré de mango Manila, ya que ocasiona la inactivación total de la enzima PME, se pierde menos del 10% de carotenos y ácido ascórbico. No es el tratamiento con mejor transferencia de calor pero es el tratamiento que ocasiona la mejor calidad bioquímica.

## VIII. BIBLIOGRAFÍA

Abichandani H. y Sarma S. C. 1987. Hydrodynamics and heat transfer in thin film scraped surface heat exchangers – a review. *Journal of food process engineering* 9. P. 143 – 172.

AOAC, 1995. Official method of analysis. In: *Methods of analysis of AOAC international*. 16 edition. Association of official analytical chemists. Maryland, USA.

Arthey David y Ashurst Philip R. 2001. *Fruit processing. Nutrition, Products, and Quality Management*. Segunda edición. Aspen Publisher Inc: USA

Awad and Young, R. E. 1980. Avocado PME activity in relation to temperature, ethylene, and ripening. *J. Amer. Soc. Hort. Sci.* 105 (5): 638-641.

Awuah G. B., Ramaswamy H. S. and Simpson B. K. 1993. Surface heat transfer coefficients associated with heating of food particles in CMC solutions. *Journal of food process engineering* 16. P. 39 – 57.

Badui Dergal, Salvador. 2003. *Química de los alimentos*. Tercera edición. Addison Wesley Longman: México, D. F.

Bartley Glen E. y Scolnik Pablo A. 1995. Plant carotenoids: Pigments for photoprotection, visual attraction, and human health. *American Society of Plant Physiologists. The Plant Cell*, Vol. 7. Peg: 1027-1028.

Bhattacharya, Suwendu. 1999. Yield stress and time-dependent rheological properties of mango pulp. *Journal of food science*. Institute of food technologists. Volumen 64, No. 6 pag. 1029-1033.

Braverman, J. B. S. 1967. *Introducción a la bioquímica de los alimentos*. Editorial omega. España.

Brennan, J.G. 1980. Las operaciones de la ingeniería de los alimentos. Editorial Acribia.

Candan, A. P. 2002. Postcosecha: daños por frío en frutas de corazón. Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria. Argentina.

Carrillo, M. J. P. 2009. Secado de pimiento morrón (*Capsicum annum*) en lecho fluidizado con ciclos de atemperado y el efecto en su calidad. Tesis de maestría. ENCB-IPN. México.

Costa López, José. 2002. Curso de Ingeniería Química. Editorial Reverté, S. A. pág. 342.

Davies, M. B.; Austin, J.; Patridge, D. A. 1991. Vitamin C: It's chemistry and biochemistry. The Royal Society of Chemistry. United Kingdom.

Espinosa Zenteno, Cintli Argelia. 2005. Comparación de dos métodos de conservación de pulpa de mango. Tesis de maestría. IPN-ENCB. México.

Esplugas Vida, Santiago y Chamarro Aguilera, Ma. Esther. 2005. Fundamentos de transmisión de calor. Ediciones Universitat Barcelona: España.

Fennema, O. 2000. Química de los alimentos. Segunda edición. Editorial Acribia. España

Flores, L. Y. 2005. Termoprocesamiento de puré de zanahoria en un intercambiador de calor de superficie raspada piloto y efectos sobre sus carotenoides. Tesis de maestría. IPN-ENCB. México.

Fogler, H. Scott. 2001. Elementos de ingeniería de las reacciones químicas. Tercera edición. Prentice-Hall: USA. Pag 810-814.

Geankoplis Christie J. 1999. Procesos de transporte y operaciones unitarias. Primera reimpresión. CECSA: México. Pág. 241-267.

Glenn E. B. and Scolnick P. A. 1995. Plant carotenoids: Pigments for photoprotection, visual attraction, and human health. The plant cell, American Society of Plant Physiologists. Vol. 7 P. 1027 – 1038.

Harrod, Magnus. 1986. Scraped Surface Heat Exchangers. A literature survey of flow patterns, mixing effects, residence time distribution, heat transfer and power requirements. Journal of Food Process Engineering. 1986. Pag. 1-62

Harvey T. Chan. 1983. Handbook of tropical foods. Marcel Dekker, Inc. USA.

Hui, Y. H. 1992. Encyclopedia of food science and technology. Vol. 2. John Wiley and Sons Inc. E. U.

Hultin, H. O., Sun B., Bulger J. 1948. Pectin methyl esterases of banana: Purification and properties. Journal of Food Science. Vol. 31 N. 3 P. 320 – 327.

Ibarz Ribas, Alberto. 2005. Operaciones unitarias en la ingeniería de alimentos. 2005. Editorial Mundi-Prensa. Pag. 135-136.

Jacquin, P. 1967. Pectin methylesterase and pectinic substance in the Apple and pear and their importance in the fabrication of ciders and perries. Am. Inst. Natl. Research agron. Ser. E., 4(1), 67.

Kern, D. Q. 2001. Procesos de transferencia de calor. 32a reimpresión. Editorial CECSA. México.

Lakhdar, M. B. 2005. Heat transfer freezing in a scraped surface heat exchanger. Applied thermal engineering 25. Pag. 45-60.

Lakshminarayana, S., Ortiz, I., Sarmiento, L., y Sánchez, C., 1975. Investigaciones fisiológicas. Estudios preliminares en selección de mango. Comisión Nacional de Fruticultura. México. Pag. 3-23

Lee, H. J. y Singh K. Rakesh. 1991. Particle residence time distribution in a model horizontal scraped surface heat exchanger. Journal of food process engineering 14. Pag. 125-126.

Levenspiel, O. 1997. Capítulo 9. Flujo no ideal. Ingeniería de las reacciones químicas. Sexta reimpresión. Editorial Reverté. México.

Liao, M. L. and Seib, P. A. 1987. Selected reactions of L-ascorbic acid related to food. Food Biotechnology. 41 (11) 104-108.

Llano L. S. 2007. Termoproceso de mezclas de puré de zanahoria papaya y su efecto sobre los componentes bioquímicos y sensoriales. Tesis de maestría. IPN-ENCB. México.

López, B. A. y Rocha, M. L. A. 2007. Tratamiento térmico de una mezcla de puré de zanahoria –papaya y sus efectos sobre sus propiedades bioquímicas y sensoriales. Tesis de licenciatura. ENCBIPN. México.

Mabit, J. L., Fayolle C., and Legrand F. J. 2004. Relation between mechanical treatment of starch and flow conditions in a scraped surface heat exchanger. Applied thermal engineering 25. P. 45-60.

NMX-F-103-1965. Norma oficial de método de prueba para la determinación de grados Brix.

Ortiz A., Mora R., Santiago T. y Dorantes L. 2003. Obtención de una pasta de aguacate mediante tratamiento térmico. Actas del V Congreso Mundial del

Aguacate. P. 761 – 768.

Qin F., Chen X. D., Ramachandra S. and Free K. 2006. Heat transfer and power consumption in a scraped surface heat exchanger while freezing aqueous solutions. Vol. 48, issue 2, pages 150-158. New Zeland.

Quintanar H. 2008. Caracterización y capacidad de enfriamiento de un intercambiador de calor de superficie raspada utilizando puré de papaya (*Carica papaya*). Tesis de maestría. IPN – ENCB. México.

Quintero Castaño, Victor D., Duque Cifuentes, Alba L., Giraldo Giraldo, Germán A., 2010. Evaluación de las propiedades fisicoquímicas de la pulpa de mango (*Manguifera indica* L.) tratada enzimáticamente. Memorias del XXIX Congreso Latinoamericano de Química. Colombia.

Rangana, S. 1986. Handbook of análisis and quality control for fruit and vegetable products. Segunda edición. McGrawHill Publising: Nueva Delhi.

Rodriguez-Amaya, D. B. 1999. Carotenoides y preparación de alimentos: la retención de los carotenoides provitamina A en alimentos preparados, procesados y almacenados. Instituto de Nutrición y Tecnología de los Alimentos. OMNI-Snow Inc. Chile.

Samson, J. A. 1991. Fruticultura tropical, Limusa. México.

Shafiur Rahman, M. 2003. Manual de conservación de los alimentos. Editorial Acribia: España.

Siebel, J. E. 1982. Specific heat of various products. Ice refrigeration. 2 : 256-257

Torrales, R. J., Vendruscolo y V Vendruscolo. 2006. Reología de puré

homogeneizado de Peéssego: Efeito da temperatura e concentracao. Jorunal of food technology 9(1): 8 Brazil.

Treybal, R. E. 1993. Operaciones de transferencia de masa. Segunda edición. McGrawHill. México, D. F.

Trommelen, A. M. and Beek, W. J. 1971. The mechanisms of power consumption in a votator type scraped surface heat exchanger. Chem Eng. Sci. 26. P. 1977 – 1986.

Van Boxtel y De Fielliettaz Goethart, 1983. Heat transfer to water and some highly viscous food systems in a water-cooled scraped surface heat exchanger. Journal of Food Process Engineering 7 P: 17-35.

Vazquez Martínez, Clotilde. Alimentación y nutrición. 2005. Ediciones Díaz de Santos: Pág. 40-41

Warren Marsh R. y Olivo C. Thomas. 1997. Principios de la refrigeración. Segunda edición. Editorial Diana: México. Pág. 128-147

Whitaker, J. R. 1994. Principles of enzimology for the food sciences. New York. Marcel Dekker Inc. Segunda edición. Pages 471-472 and 526-529.

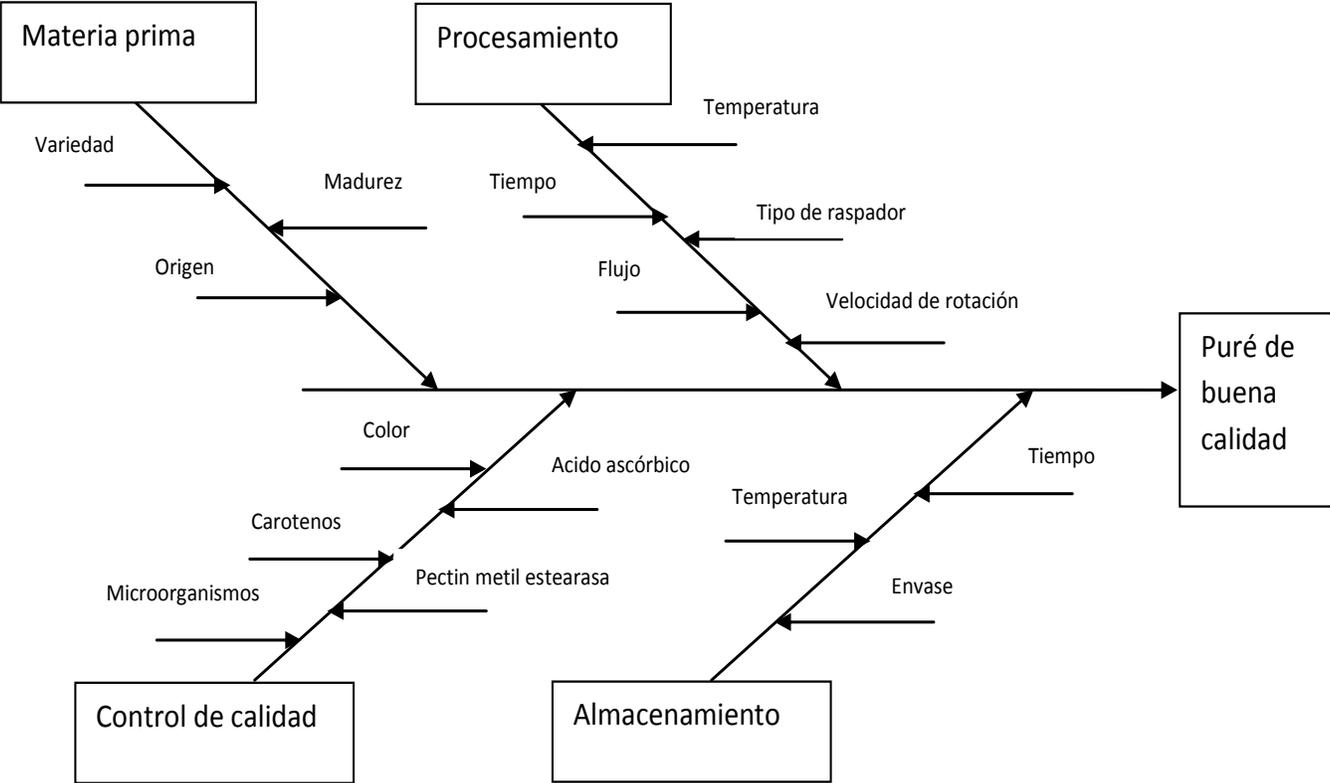
COVECA. Consejo Veracruzano de Comercialización Agropecuaria. Septiembre de 2008. <http://portal.veracruz.gob.mx/pls/portal/docs/>

FAO. Food and Agricultural Organization. Agosto de 2009. <http://apps.fao.org/faostat>

SIAP. Sistema de Información Agripecuaria y Pesquera. Noviembre de 2009. [www.siap.sagarpa.gob.mx](http://www.siap.sagarpa.gob.mx)

**ANEXO I**

**Diagrama Ishikawa para la obtención de puré de mango Manila.**



## **ANEXO II**

### **Comparación económica entre un Diseño Factorial (DF) y un Diseño Factorial Fraccionado (DFF).**

Materia prima: Pulpa de mango Manila

Suministro: Proveedor externo

Cantidad utilizada por corrida: 20 L

Precio por corrida: \$400.00

Utilizando un Diseño Factorial (DF)

Costo por 35 corridas: \$ 14 000.00

Utilizando un Diseño Factorial Fraccionado (DFF)

Costo por 19 corridas: \$7 600.00

Ahorro por utilizar un DFF: \$ 7 400.00

Precios en pesos mexicanos para el año 2009.

## ANEXO III

### Diseño factorial fraccionado obtenido con el software Minitab versión 13.

Fractional Factorial Design

Factors: 4 Base Design: 4, 8 Resolution: IV  
Runs: 19 Replicates: 2 Fraction: 1/2  
Blocks: none Center pts (total): 3

Design Generators: D = ABC

Alias Structure

I + ABCD

A + BCD

B + ACD

C + ABD

D + ABC

AB + CD

AC + BD

AD + BC

Los tratamientos generados se indica a continuación:

TRATAMIENTO	TEMPERATURA	ROTACIÓN	TIPO DE RASPADOR	FLUJO
7	145	200	2	300
3	155	200	2	500
6	145	300	1	300
9	150	250	1.5	400
3	155	200	2	500
1	155	300	2	300
1	155	300	2	300
10	150	250	1.5	400
8	145	200	1	500
2	155	300	1	500
2	155	300	1	500
7	145	200	2	300
4	155	200	1	300
8	145	200	1	500
5	145	300	2	500
5	145	300	2	500
6	145	300	1	300
4	155	200	1	300
11	150	250	1.5	400

## ANEXO IV

### Ejemplo de la determinación de coeficientes de transferencia de calor experimentales para el tratamiento 1.

La determinación del coeficiente experimental de transferencia de calor (h) en la pared interna del intercambiador de calor se llevó a cabo de la siguiente manera:

- A. El cálculo de la temperatura promedio de la pared interna y del producto se realizó con la ecuación (1) y (2).

$$T_w = \frac{\frac{t_1 + t_2}{2} + \frac{T_1 - T_2}{\ln \frac{T_1}{T_2}}}{2} \quad (1)$$

$T_w$  = Temperatura media de la pared interna del cuerpo del ICSR.

$$T_{ml} = \frac{T_1 - T_2}{\ln \frac{T_1}{T_2}} \quad (2)$$

$T_{ml}$  = Temperatura media logarítmica del producto en el ICSR en °C.

Donde:

$t_1$  y  $t_2$  = Temperatura del medio de calentamiento a la entrada y salida respectivamente en °C.

$T_1$  y  $T_2$  = Temperatura del puré de mango a la entrada y salida del intercambiador de calor en °C.

A continuación se muestran los datos del primer tratamiento para determinar la temperatura media del refrigerante y la temperatura media logarítmica del puré para la etapa de calentamiento.

Tratamiento	t1 (°C)	t2(°C)	Fo (mL/min)	TR (A, B o C)	RR(rpm)	T1(°C)	T2(°C)
1	155.37	152.08	300	A	300	20.68	90.57

Fo = Flujo de alimentación.

RR = Rotación de los raspadores.

TR = Tipo de raspador de acuerdo a la configuración de las unidades de raspado A: Doble fila de raspadores, B: raspadores alternos o C: una sola hilera de unidades de raspado.

$$T_w = \frac{\frac{155.37 + 152.08}{2} + \frac{20.68 - 90.57}{\ln \frac{20.68}{90.57}}}{2} = 100.522^\circ\text{C}$$

$$T_{ml} = \frac{20.68 - 90.57}{\ln \frac{20.68}{90.57}} = 47.31^\circ\text{C}$$

B. Para determinar los coeficientes se usaron las ecuaciones (3) y (4):

$$Q = mC_p(T_1 - T_2) \quad (3)$$

$$h = \frac{Q}{A(T_{ml} - T_w)} \quad (4)$$

Donde:

Q = Calor ganado por el producto a su paso por el intercambiador de calor (W)

m = Flujo másico

$$m = \rho v = (1037 \text{ kg/m}^3)(0.0003 \text{ m}^3/\text{min}) = 0.3111 \text{ kg/min}$$

C<sub>p</sub> = Capacidad calorífica = 3573.15 J/kg°C

h = Coeficiente de transferencia de calor en la pared interna del intercambiador de calor (W/m<sup>2</sup>°C).

A = Area de transferencia de calor en la longitud interna del intercambiador de calor (m<sup>2</sup>).

$$A = \pi DL = (3.1416)(0.0472 \text{ m})(0.415 \text{ m}) = 0.06153 \text{ m}^2$$

Por lo tanto, de acuerdo a las ecuaciones (3) y (4) se tiene:

$$Q = (0.3111)(3573.15)(20.68 - 90.57) = -77690.21 \text{ J/min} = -1294.83 \text{ W}$$

$$h = -1294.83 / (0.06153)(47.31 - 100.522) = \mathbf{395.47 \text{ W/m}^2\text{°C}}$$

Todos los valores de coeficiente interno de transferencia de calor experimental fueron determinados usando esta metodología en una hoja de cálculo.

## ANEXO V

### Ejemplo de la determinación del coeficiente de transferencia de calor teórico para el tratamiento 1.

La determinación del coeficiente teórico de transferencia de calor (h) está dada por la ecuación de Skelland.

$$\frac{hD}{k} = \alpha \left[ \frac{C_p \mu}{k} \right]^\beta \left[ \frac{(D - D_s) v \rho}{\mu} \right]^{1.0} \left[ \frac{DN}{v} \right]^{0.62} \left[ \frac{D_s}{D} \right]^{0.55} \left[ \frac{D_s}{D} \right]^{0.53}$$

$\alpha = 0.014$  y  $\beta = 0.96$  para fluidos viscosos

Donde:

D = Diámetro interno del recipiente = 0.0472 m

D<sub>s</sub> = Diámetro del eje giratorio = 0.0257 m

v = Velocidad axial de flujo del fluido = 0.00406 m/s

N = Velocidad de rotación de los raspadores = 5 rps

n<sub>b</sub> = Número de raspadores = 2

μ = Viscosidad efectiva del fluido = 1.26 Pa.s

ρ = Densidad del fluido = 1037 kg/m<sup>3</sup>

C<sub>p</sub> = Capacidad calorífica del fluido = 3573.13 J/kg°C

k = Conductividad térmica = 0.503 W/m°C

h = Coeficiente interno de transferencia de calor teórico, W/m<sup>2</sup>°C

$$h = \frac{[0.014](6219.81)(0.07184)(12.4142)(0.7158)(1.444) (0.503)}{0.0472} = 855.4 \text{ W/m}^2\text{°C}$$

## ANEXO VI

Datos de viscosidad aparente para cada uno de los tratamientos térmicos.

A. Determinación de los parámetros de viscosidad aparente para el puré de mango del Tratamiento 1.			B. Determinación de los parámetros de viscosidad aparente para el puré de mango del Tratamiento 2.		
Á [1/s]	[Pa]	f [Pas]	Á [1/s]	[Pa]	f [Pas]
23.99	4.565	0.19	23.96	7.968	0.332
44.97	5.167	0.115	44.58	9.343	0.21
65.07	5.686	0.08739	65.35	10.51	0.161
85.69	6.204	0.0724	85.87	11.56	0.135
106.7	6.582	0.06169	106.5	12.41	0.117
127.5	6.953	0.05454	127.4	13.23	0.104
147.6	7.386	0.05003	148.1	14	0.0945
168.5	7.72	0.04582	168.2	14.78	0.08791
189.4	8.022	0.04236	188.9	15.41	0.08159
209.4	8.408	0.04014	209.9	16.1	0.07672
230.1	8.668	0.03767	230.6	16.8	0.07288
250.8	8.971	0.03577	251.2	17.39	0.06922
271.3	9.303	0.03429	271.4	17.98	0.06626
292.2	9.654	0.03305	292.3	18.54	0.06344
313.2	9.922	0.03168	313.5	19.08	0.06088
333.7	10.16	0.03044	333.5	19.65	0.05891
353.8	10.46	0.02956	354	20.16	0.05696
374.6	10.73	0.02864	374.8	20.7	0.05523
395	10.99	0.02783	395.6	21.21	0.05361
416.3	11.22	0.02695	415.7	21.68	0.05216

<b>C. Determinación de los parámetros de viscosidad aparente para el puré de mango del Tratamiento 3.</b>			<b>D. Determinación de los parámetros de viscosidad aparente para el puré de mango del Tratamiento 4.</b>		
<b>Á [1/s]</b>	<b>[Pa]</b>	<b><i>f</i> [Pas]</b>	<b>Á [1/s]</b>	<b>, [Pa]</b>	<b><i>f</i> [Pas]</b>
23.84	3.168	0.133	23.6	6.799	0.288
44.38	3.671	0.08274	44.3	7.925	0.179
65.28	4.06	0.0622	65.05	8.934	0.137
86.26	4.429	0.05134	85.79	9.861	0.115
106.2	4.824	0.04541	106.5	10.62	0.09969
127.4	5.116	0.04016	127.2	11.39	0.08949
148.2	5.324	0.03593	147.5	12.05	0.08174
168.2	5.691	0.03384	168.1	12.7	0.07553
189.3	5.924	0.03129	188.6	13.28	0.07041
209.8	6.2	0.02955	209.6	13.92	0.06643
230.1	6.465	0.0281	230.4	14.55	0.06314
250.6	6.744	0.02691	250.7	15.11	0.06024
271.4	7.052	0.02599	271.2	15.65	0.05771
292.2	7.276	0.0249	292.5	16.22	0.05547
312.9	7.58	0.02422	312.6	16.73	0.05352
333.3	7.753	0.02326	333.1	17.22	0.05169
354.4	7.907	0.02231	353.7	17.63	0.04984
			374.2	18.27	0.04882
			395	18.76	0.04749
			415.7	19.24	0.04629

<b>E. Determinación de los parámetros de viscosidad aparente para el puré de mango del Tratamiento 5.</b>			<b>F. Determinación de los parámetros de viscosidad aparente para el puré de mango del Tratamiento 6.</b>		
<b>Á [1/s]</b>	<b>[Pa]</b>	<b><i>f</i> [Pas]</b>	<b>Á [1/s]</b>	<b>[Pa]</b>	<b><i>f</i> [Pas]</b>
23.45	4.302	0.183	24.48	5.94	0.243
44.17	5.18	0.117	44.45	7.024	0.158
65.05	5.976	0.09187	65.15	7.961	0.122
85.33	6.594	0.07728	86.41	8.83	0.102
106.4	7.241	0.06805	106.6	9.639	0.09043
126.8	7.83	0.06173	127.5	10.28	0.08062
147.7	8.355	0.05658	147.8	11.16	0.07549
167.8	8.778	0.05231	168.6	11.7	0.0694
188.9	9.347	0.04949	189.6	12.33	0.06503
210.5	9.712	0.04614	209.9	12.91	0.06152
230.3	10.19	0.04423	230.2	13.47	0.05848
250.4	10.53	0.04205	251.2	14.08	0.05604
271.3	10.95	0.04038	271.3	14.48	0.05337
291.8	11.33	0.03885	292	14.76	0.05054
312.3	11.74	0.03759	312.8	15.18	0.04853
332.8	12.01	0.0361	333.6	15.46	0.04634
353.6	12.4	0.03507	354	15.86	0.04479
374.4	12.72	0.03397	375	16.18	0.04316
395	13.09	0.03314	395.9	16.48	0.04163
415.5	13.38	0.03219	415.7	16.88	0.0406

<b>G. Determinación de los parámetros de viscosidad aparente para el puré de mango del Tratamiento 7.</b>			<b>H. Determinación de los parámetros de viscosidad aparente para el puré de mango del Tratamiento 8.</b>		
<b>Á [1/s]</b>	<b>, [Pa]</b>	<b>f [Pas]</b>	<b>Á [1/s]</b>	<b>, [Pa]</b>	<b>f [Pas]</b>
24.32	6.305	0.259	24.48	5.435	0.222
44.81	6.857	0.153	44.56	6.286	0.141
65.2	7.264	0.111	64.99	6.969	0.107
86.15	7.813	0.09069	85.66	7.63	0.08907
106.6	8.336	0.07817	106.4	8.298	0.078
127.1	8.793	0.06916	127	8.827	0.06951
147.7	9.097	0.0616	148.3	9.376	0.06322
169.1	9.539	0.05639	168.4	9.939	0.05902
188.9	9.927	0.05255	188.9	10.52	0.0557
209.5	10.36	0.04945	209.6	10.98	0.05242
230.4	10.71	0.0465	230.5	11.39	0.0494
250.8	11.05	0.04406	250.8	11.88	0.04737
271.4	11.35	0.04181	271.4	12.32	0.04539
292	11.69	0.04005	292.3	12.73	0.04355
312.9	11.91	0.03805	313.2	13.19	0.04211
333.4	12.17	0.03651	333.2	13.63	0.04092
353.9	12.39	0.035	353.9	14.01	0.03959
374.8	12.65	0.03376	375.2	14.41	0.03841
395.7	12.79	0.03231	395.2	14.87	0.03762
415.8	13.05	0.03139	416.2	15.26	0.03667

<b>I. Determinación de los parámetros de viscosidad aparente para el puré de mango del Tratamiento 9.</b>			<b>J. Determinación de los parámetros de viscosidad aparente para el puré de mango del Tratamiento 10.</b>		
<b>Á [1/s]</b>	<b>, [Pa]</b>	<b>f [Pas]</b>	<b>Á [1/s]</b>	<b>, [Pa]</b>	<b>f [Pas]</b>
23.86	4.793	0.201	24.43	3.703	0.152
44.66	5.856	0.131	44.66	4.287	0.096
65.12	6.685	0.103	65.12	4.822	0.07405
85.61	7.433	0.08682	85.82	5.305	0.06182
106.4	8.058	0.07577	106.5	5.681	0.05335
127.4	8.646	0.06787	127.1	6.043	0.04756
147.5	9.24	0.06263	148	6.433	0.04348
168.5	9.838	0.05837	168.3	6.868	0.04082
189	10.32	0.05459	189.1	7.044	0.03726
210	10.77	0.05126	210	7.399	0.03524
230.6	11.27	0.04888	230.3	7.784	0.03379
250.7	11.67	0.04656	250.8	7.993	0.03187
271.6	12.09	0.04453	271.4	8.266	0.03046
292.2	12.45	0.04262	292.1	8.577	0.02937
312.7	12.84	0.04107	313.1	8.824	0.02818
333.7	13.15	0.03941	333.9	9.081	0.0272
353.9	13.49	0.03811	354.8	9.397	0.02649
375.1	13.82	0.03684	374.5	9.728	0.02598
395.5	14.1	0.03565	395.4	9.927	0.0251
415.7	14.41	0.03466	416.4	10.12	0.02431

**K. Determinación de los parámetros de viscosidad aparente para el puré de mango del Tratamiento 11.**

<b>Á [1/s]</b>	<b>, [Pa]</b>	<b>f [Pas]</b>
24.2	4.079	0.169
44.32	4.579	0.103
65.41	5.182	0.07923
85.64	5.718	0.06677
106.1	6.101	0.0575
126.9	6.455	0.05086
147.7	6.913	0.04681
168.5	7.302	0.04334
188.8	7.557	0.04002
209.5	7.94	0.03789
229.9	8.211	0.03571
250.6	8.488	0.03387
271.2	8.827	0.03255
291.9	9.103	0.03118
312.7	9.398	0.03005
333.4	9.671	0.02901
353.6	9.936	0.0281
374.3	10.17	0.02718
395.1	10.44	0.02642
415.8	10.7	0.02574

## ANEXO VII

### Análisis estadístico de las variables de respuesta.

#### A. CAROTENOS

##### Fractional Factorial Fit: CAROTENOS versus TEMPERATURA, ROTACIÓN, ...

Estimated Effects and Coefficients for CAROTENO (coded units)

Term	Effect	Coef	SE Coef	T	P
Constant		94.838	0.1025	925.17	0.000
TEMPERAT	-3.705	-1.853	0.1025	-18.07	0.000
ROTACIÓN	0.195	0.098	0.1025	0.95	0.364
TIPO DE	-1.360	-0.680	0.1025	-6.63	0.000
FLUJO	2.970	1.485	0.1025	14.49	0.000
TEMPERAT*ROTACIÓN	-2.825	-1.413	0.1025	-13.78	0.000
TEMPERAT*TIPO DE	2.180	1.090	0.1025	10.63	0.000
TEMPERAT*FLUJO	-1.230	-0.615	0.1025	-6.00	0.000
Ct Pt		2.459	0.2580	9.53	0.000

Analysis of Variance for CAROTENO (coded units)

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
Main Effects	4	97.742	97.742	24.4356	145.34	0.000
2-Way Interactions	3	56.984	56.984	18.9946	112.98	0.000
Curvature	1	15.278	15.278	15.2779	90.87	0.000
Residual Error	10	1.681	1.681	0.1681		
Pure Error	10	1.681	1.681	0.1681		
Total	18	171.685				

Estimated Coefficients for CAROTENO using data in uncoded units

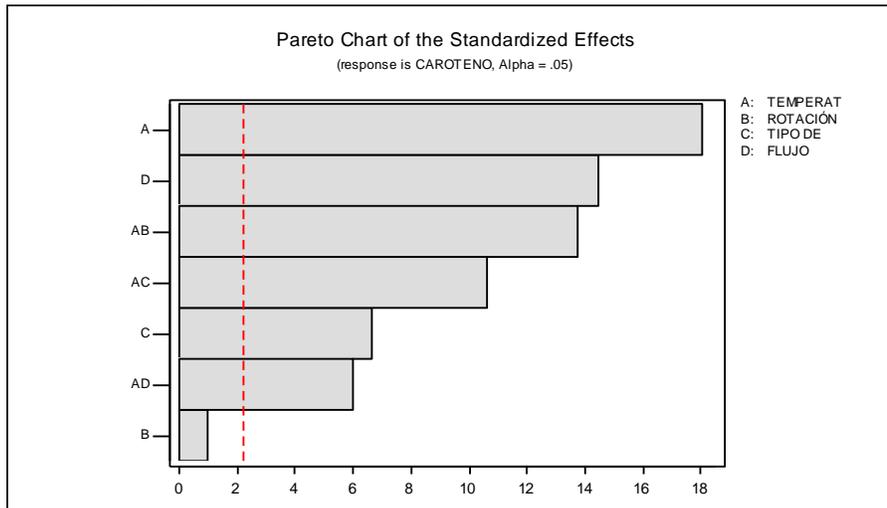
Term	Coef
Constant	-41.5500
TEMPERAT	0.880000
ROTACIÓN	0.849450
TIPO DE	-66.7600
FLUJO	0.199350
TEMPERAT*ROTACIÓN	-0.00565000
TEMPERAT*TIPO DE	0.436000
TEMPERAT*FLUJO	-0.00123000
Ct Pt	2.45917

Least Squares Means for CAROTENO

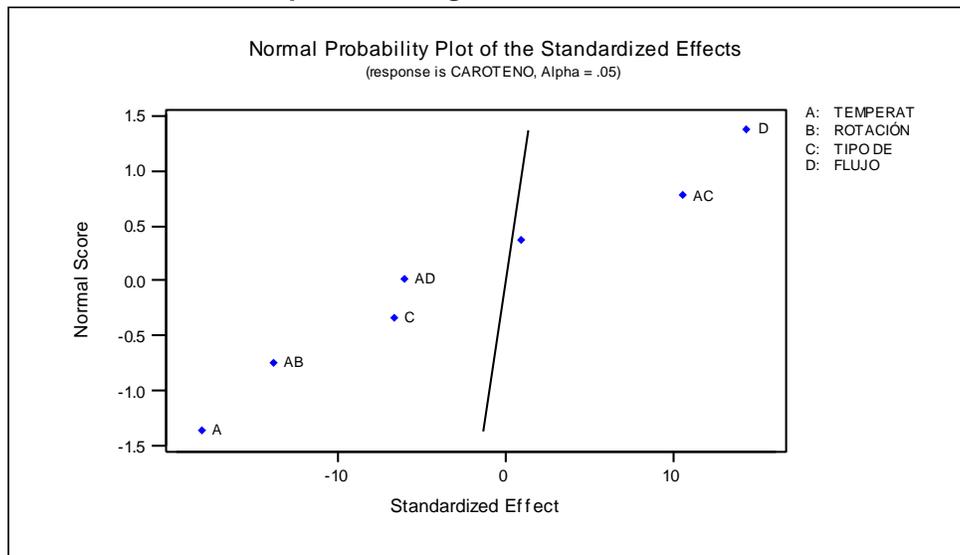
	Mean	SE Mean
TEMPERAT		
145	96.69	0.1450
155	92.99	0.1450
ROTACIÓN		
200	94.74	0.1450
300	94.94	0.1450
TIPO DE		
1	95.52	0.1450
2	94.16	0.1450
FLUJO		
300	93.35	0.1450
500	96.32	0.1450

TEMPERAT*ROTACIÓN			
145	200	95.18	0.2050
155	200	94.30	0.2050
145	300	98.20	0.2050
155	300	91.67	0.2050
TEMPERAT*TIPO DE			
145	1	98.46	0.2050
155	1	92.58	0.2050
145	2	94.92	0.2050
155	2	93.40	0.2050
TEMPERAT*FLUJO			
145	300	94.59	0.2050
155	300	92.12	0.2050
145	500	98.79	0.2050
155	500	93.86	0.2050

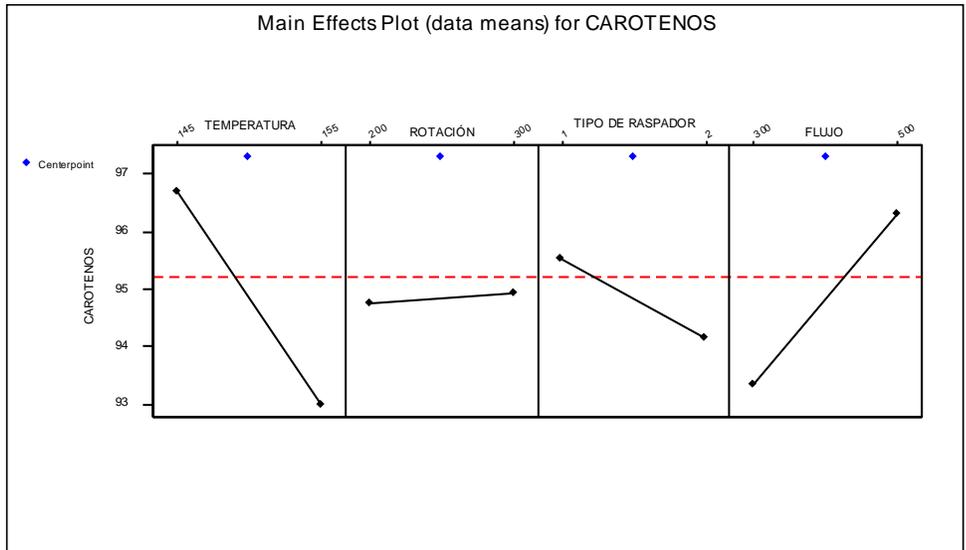
Mean for Center Point = 97.30



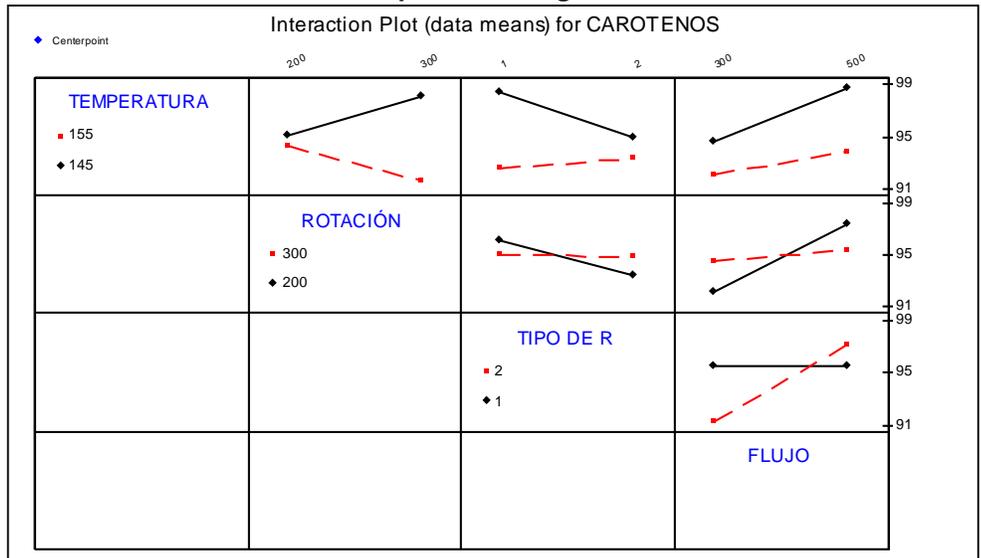
**Gráfica de Pareto para la evaluación de la retención de carotenos en el tratamiento térmico de puré de mango Manila en un ICSR.**



**Gráfica normal para la evaluación de la retención de carotenos en el tratamiento térmico de puré de mango Manila en un ICSR.**



Gráfica de efectos principales para la evaluación de la retención de carotenos en el tratamiento térmico de puré de mango Manila en un ICSR.



Gráfica de interacciones para la evaluación de la retención de carotenos en el tratamiento térmico de puré de mango Manila en un ICSR.

## B. PME

### Fractional Factorial Fit: PME versus TEMPERATURA, ROTACIÓN, ...

Estimated Effects and Coefficients for PME (coded units)

Term	Effect	Coef	SE Coef	T	P
Constant		45.13	0.8436	53.49	0.000
TEMPERAT	-58.67	-29.33	0.8436	-34.77	0.000
ROTACIÓN	-0.50	-0.25	0.8436	-0.30	0.773
TIPO DE	-1.58	-0.79	0.8436	-0.94	0.371
FLUJO	69.75	34.88	0.8436	41.34	0.000
TEMPERAT*ROTACIÓN	-7.92	-3.96	0.8436	-4.69	0.001
TEMPERAT*TIPO DE	10.00	5.00	0.8436	5.93	0.000
TEMPERAT*FLUJO	-38.17	-19.09	0.8436	-22.62	0.000
Ct Pt		-41.49	2.1230	-19.54	0.000

Analysis of Variance for PME (coded units)

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
Main Effects	4	33239.9	33239.9	8309.98	729.84	0.000
2-Way Interactions	3	6478.7	6478.7	2159.57	189.67	0.000
Curvature	1	4349.2	4349.2	4349.20	381.98	0.000
Residual Error	10	113.9	113.9	11.39		
Pure Error	10	113.9	113.9	11.39		
Total	18	44181.7				

Estimated Coefficients for PME using data in uncoded units

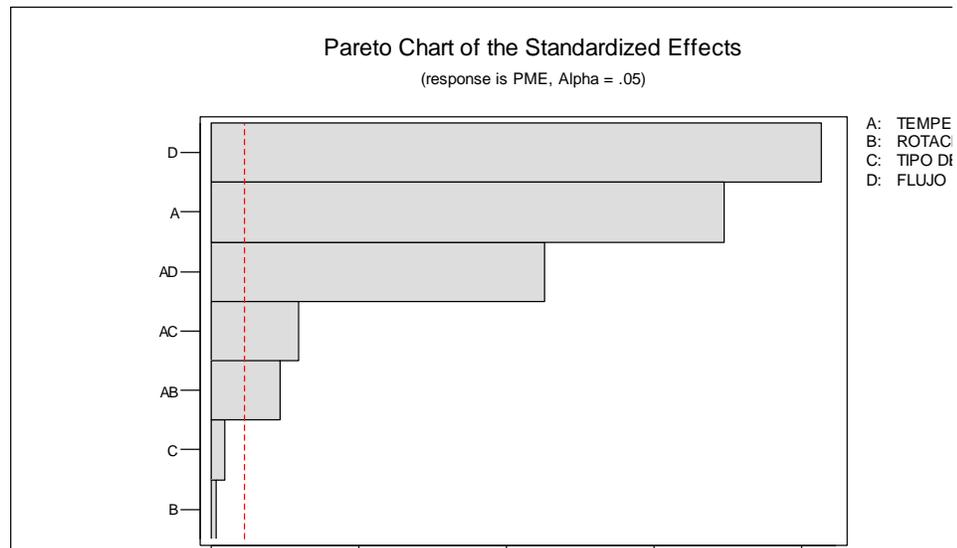
Term	Coef
Constant	-1644.91
TEMPERAT	10.3610
ROTACIÓN	2.37100
TIPO DE	-301.580
FLUJO	6.07425
TEMPERAT*ROTACIÓN	-0.0158400
TEMPERAT*TIPO DE	2.00000
TEMPERAT*FLUJO	-0.0381700
Ct Pt	-41.4917

Least Squares Means for PME

	Mean	SE Mean
TEMPERAT		
145	74.460	1.193
155	15.790	1.193
ROTACIÓN		
200	45.375	1.193
300	44.875	1.193
TIPO DE		
1	45.915	1.193
2	44.335	1.193
FLUJO		
300	10.250	1.193
500	80.000	1.193
TEMPERAT*ROTACIÓN		
145 200	70.750	1.687
155 200	20.000	1.687
145 300	78.170	1.687
155 300	11.580	1.687

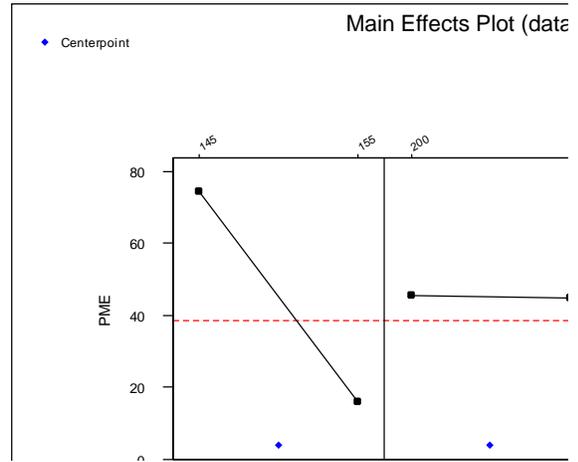
TEMPERAT*TIPO DE			
145	1	80.250	1.687
155	1	11.580	1.687
145	2	68.670	1.687
155	2	20.000	1.687
TEMPERAT*FLUJO			
145	300	20.500	1.687
155	300	0.000	1.687
145	500	128.420	1.687
155	500	31.580	1.687

Mean for Center Point = 3.633

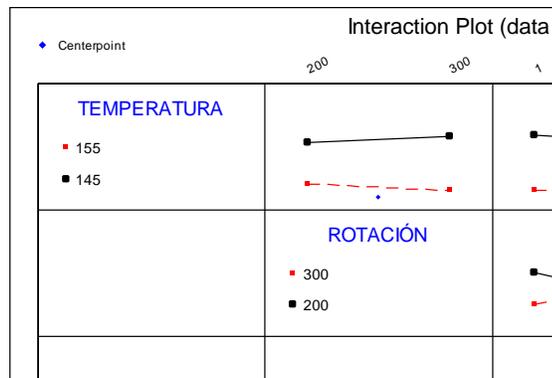


**Gráfica de Pareto para la evaluación de la retención de PME en el tratamiento térmico de puré de mango Manila en un ICSR.**

**Gráfica normal para la evaluación de la retención de PME en el tratamiento térmico de puré de mango Manila en un ICSR.**



Gráfica de efectos principales para la evaluación de la retención de PME en el tratamiento térmico de puré de mango Manila en un ICSR.



Gráfica de interacciones para la evaluación de la retención de PME en el tratamiento térmico de puré de mango Manila en un ICSR.

## C. ÁCIDO ASCÓRBICO

### Fractional Factorial Fit: VITAMINA C versus TEMPERATURA, ROTACIÓN, ...

Estimated Effects and Coefficients for VITAMINA (coded units)

Term	Effect	Coef	SE Coef	T	P
Constant		94.739	0.1645	576.06	0.000
TEMPERAT	-2.893	-1.446	0.1645	-8.79	0.000
ROTACIÓN	-0.312	-0.156	0.1645	-0.95	0.364
TIPO DE	-0.242	-0.121	0.1645	-0.74	0.478
FLUJO	2.182	1.091	0.1645	6.64	0.000
TEMPERAT*ROTACIÓN	0.308	0.154	0.1645	0.93	0.372
TEMPERAT*TIPO DE	-0.212	-0.106	0.1645	-0.65	0.533
TEMPERAT*FLUJO	-0.578	-0.289	0.1645	-1.76	0.110
Ct Pt		1.175	0.4139	2.84	0.018

Analysis of Variance for VITAMINA (coded units)

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
Main Effects	4	53.1453	53.1453	13.2863	30.70	0.000
2-Way Interactions	3	1.8929	1.8929	0.6310	1.46	0.284
Curvature	1	3.4854	3.4854	3.4854	8.05	0.018
Residual Error	10	4.3275	4.3275	0.4327		
Pure Error	10	4.3275	4.3275	0.4327		
Total	18	62.8511				

Estimated Coefficients for VITAMINA using data in uncoded units

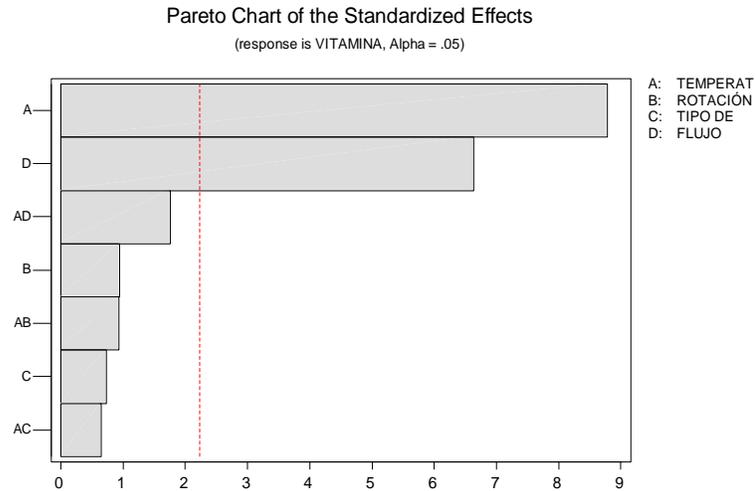
Term	Coef
Constant	113.756
TEMPERAT	-0.148250
ROTACIÓN	-0.0953750
TIPO DE	6.13250
FLUJO	0.0975375
TEMPERAT*ROTACIÓN	0.000615000
TEMPERAT*TIPO DE	-0.0425000
TEMPERAT*FLUJO	-0.000577500
Ct Pt	1.17458

Least Squares Means for VITAMINA

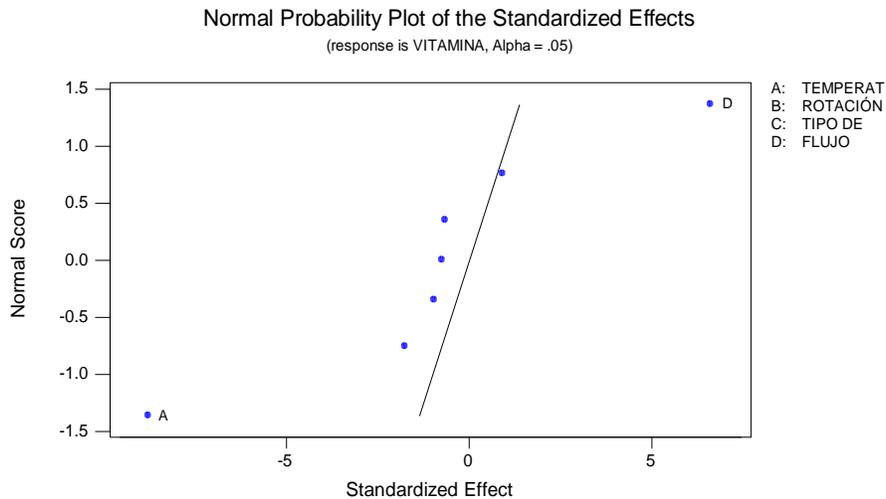
	Mean	SE Mean
TEMPERAT		
145	96.19	0.2326
155	93.29	0.2326
ROTACIÓN		
200	94.90	0.2326
300	94.58	0.2326
TIPO DE		
1	94.86	0.2326
2	94.62	0.2326
FLUJO		
300	93.65	0.2326
500	95.83	0.2326
TEMPERAT*ROTACIÓN		
145 200	96.50	0.3289
155 200	93.29	0.3289
145 300	95.88	0.3289
155 300	93.29	0.3289

TEMPERAT*TIPO DE			
145	1	96.20	0.3289
155	1	93.52	0.3289
145	2	96.17	0.3289
155	2	93.06	0.3289
TEMPERAT*FLUJO			
145	300	94.81	0.3289
155	300	92.49	0.3289
145	500	97.57	0.3289
155	500	94.09	0.3289

Mean for Center Point = 95.91



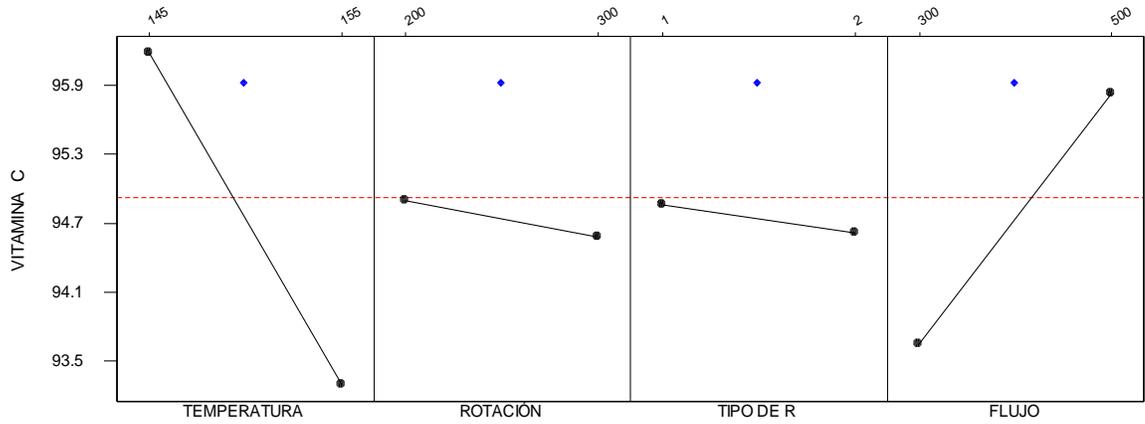
**Gráfica de Pareto para la evaluación de la retención de ácido ascórbico en el tratamiento térmico de puré de mango Manila en un ICSR.**



**Gráfica normal para la evaluación de la retención de ácido ascórbico en el tratamiento térmico de puré de mango Manila en un ICSR.**

Main Effects Plot (data means) for VITAMINA C

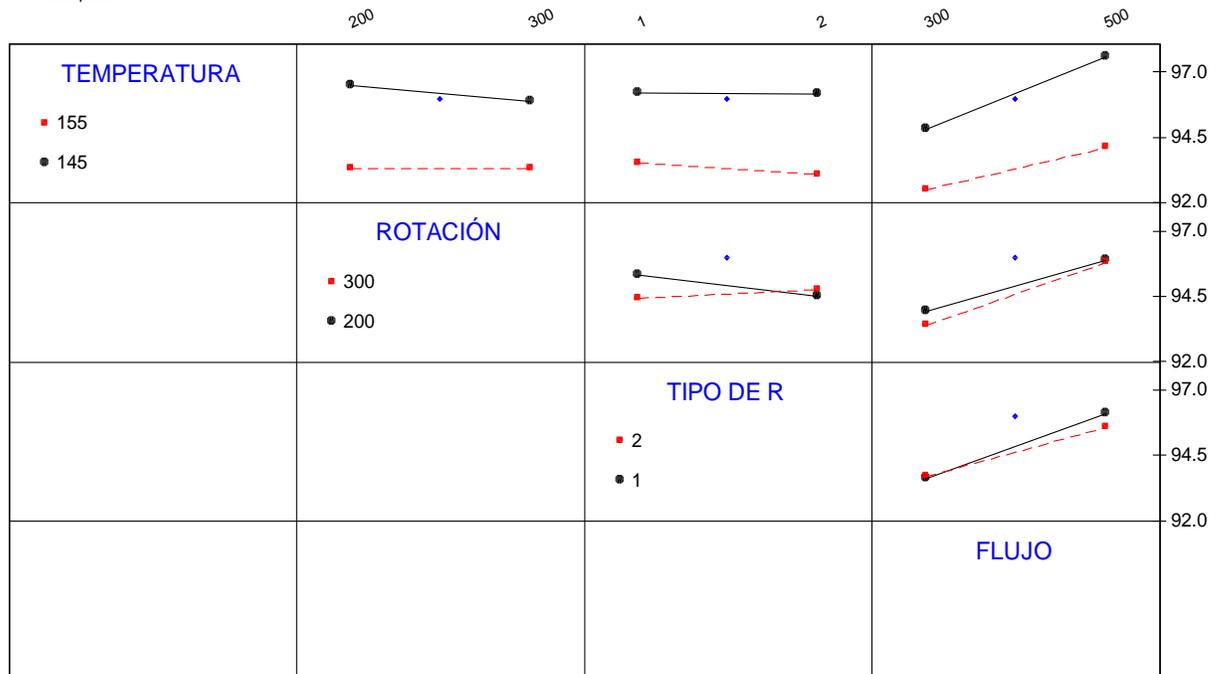
◆ Centerpoint



Gráfica de efectos principales para la evaluación de la retención de ácido ascórbico en el tratamiento térmico de puré de mango Manila en un ICSR.

Interaction Plot (data means) for VITAMINA C

◆ Centerpoint



Gráfica de interacciones para la evaluación de la retención de ascórbico en el tratamiento térmico de puré de mango Manila en un ICSR.