



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO

FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES

CUAUTITLAN

U. N. A. M.
FACULTAD DE ESTUDIOS
SUPERIORES CUAUTITLAN



REOLOGIA Y TEXTURA DE MATERIALES BIOLÓGICOS:
PROPIEDADES REOLÓGICAS DE UNA PULPA DE MANGO.
INFLUENCIA DE LA CONCENTRACION Y LA TEMPERATURA.

Exámenes Profesionalizantes

TRABAJO DE SEMINARIO

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

INGENIERO EN ALIMENTOS

P R E S E N T A :

LEONARDO IVAN ROBLES PIEDRAS

ASESORA: M.C. VIRGINIA AGUSTINA DELGADO REYES



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES CUAUTITLAN
UNIDAD DE LA ADMINISTRACION ESCOLAR
DEPARTAMENTO DE EXAMENES PROFESIONALES



UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTÓNOMA DE
MÉXICO

U. N. A. M.
FACULTAD DE ESTUDIOS
SUPERIORES CUAUTITLAN



Departamento de
Exámenes Profesionales

DR. JUAN ANTONIO MONTARAZ CRESPO
DIRECTOR DE LA FES CUAUTITLAN
PRESENTE

ATN: Q. Ma. del Carmen García Mijares
Jefe del Departamento de Exámenes
Profesionales de la FES Cuautitlán

Con base en el art. 51 del Reglamento de Exámenes Profesionales de la FES-Cuautitlán, nos permitimos comunicar a usted que revisamos el Trabajo de Seminario:

Reología y Textura de Materiales Biológicos: "Propiedades reológicas de una pulpa de mango. Influencia de la concentración y la temperatura".

que presenta el pasante: Leonardo Iván Robles Piedras

con número de cuenta: 9656633-6 para obtener el título de:
Ingeniero en Alimentos

Considerando que dicho trabajo reúne los requisitos necesarios para ser discutido en el EXÁMEN PROFESIONAL correspondiente, otorgamos nuestro VISTO BUENO.

ATENTAMENTE

"POR MI RAZA HABLARA EL ESPIRITU"

Cuautitlán Izcalli, Méx. a 23 de octubre del 2003.

| MODULO | PROFESOR | FIRMA |
|-----------|---|--|
| <u>I</u> | <u>IBQ. Norma Casas Alencaster</u> | <u>Norma Casas Alencaster</u> |
| <u>I</u> | <u>M.C. María Eugenia Ramírez Ortíz</u> | <u>María Eugenia Ramírez Ortíz</u> |
| <u>II</u> | <u>M.C. Virginia Agustina Delgado Reyes</u> | <u>Virginia Agustina Delgado Reyes</u> |

AGRADECIMIENTOS

- *A la Universidad Nacional por haber adquirido los conocimientos teóricos para mi formación profesional y la oportunidad de ver y saber mas allá de los que se aprende en sus aulas.*
- *A los profesores del seminario de titulación de reología y textura de materiales biológicos:*
Dra. Laura Patricia Martínez Padilla
IBQ. Norma B. Casas Alencáster
Dr. Alberto Tecante Coronel
M. en C. Ma. Eugenia Ramírez Ortiz
Por apoyar y contribuir con sus conocimientos en la elaboración de este trabajo
- *A mi asesora M. en C. Virginia Delgado Reyes por el apoyo y la paciencia para la elaboración de este trabajo durante todo este tiempo.*
- *A la empresa JUMEX S.A de C.V., por las facilidades otorgadas en la realización del presente trabajo.*

A mis padres Isabel y Leonardo por su paciencia y comprensión además de ser parte indispensable en mi desarrollo personal y profesional.

A mis hermanos Ana y Eduardo por ser un gran ejemplo a seguir; y a Patricia por el apoyo y paciencia que contribuyó de manera indispensable para yo poder dar este paso en mi vida profesional.

A mis amigos por compartir muchos buenos y malos momentos juntos y por ofrecerme su apoyo y cariño:

Zaira, Claudia, Ulises, Poncho, Mary, Mirandeli, Julia, Toño, y especialmente a Navarro, Daniel y Nadia por las travesías compartidas en todo este tiempo que hemos vivido conociéndonos y por existir junto conmigo en estas andanzas de un estado llamado vida.

A Ixchel por compartir el sentimiento y el camino:

Actuar es fácil, pensar es difícil; actuar según se piensa es aún más difícil. No basta saber, se debe también aplicar. No es suficiente querer, se debe también hacer y todo lo que se hace por amor, se hace más allá del bien y del mal.

W. Goethe. y F. Nietzsche.

El querer libera; pues querer es crear y crear algo también es amarlo, lo que hemos creado solo lo quiero seguir haciendo contigo y con ello hacer posible la utopía, gracias por existir y estar aquí.

Hemos arreglado para nuestro uso particular un mundo en el cual podemos vivir conociendo la existencia de cuerpos, líneas, causas y efectos; movimiento y reposo, forma y sustancia, pues sin estos artículos de fe nadie soportaría la vida.

Pero esto no prueba que sean verdad tales artículos.

La vida no es un argumento, entre las condiciones de la vida pudiera figurar el error.

F. Nietzsche.

Contenido.

| | | |
|------|------------------------|----|
| | Resumen | 1 |
| I. | Introducción | 2 |
| II. | Materiales y métodos | 5 |
| III. | Resultados y discusión | 9 |
| IV. | Conclusiones | 19 |
| V. | Bibliografía | 20 |

RESUMEN

En el presente estudio se analizó el efecto de la temperatura (12 °C, 30 °C y 50 °C) y sólidos solubles (15 °Bx, 21 °Bx y 27 °Bx), en las propiedades reológicas de la pulpa de mango (*Mangifera indica*) de la variedad ataulfo bajo régimen de cizalla rotacional, utilizando un viscosímetro de cilindros concéntricos (DIN 53019). Asimismo se analizó el efecto de la temperatura en la densidad a las diferentes concentraciones de sólidos solubles (15 °Bx, 21 °Bx y 27 °Bx). Las muestras se precizallaron a 1000 s^{-1} , donde se observó una ligera dependencia de la viscosidad aparente con el tiempo. Después de este precizallamiento la pulpa de mango mostró un comportamiento reológico no-newtoniano, fluidificado por cizalla. En las muestras analizadas el índice de consistencia (k) decreció con el aumento de la temperatura, mientras que el índice de comportamiento al flujo (n) se mantuvo prácticamente constante

El efecto de la temperatura sobre el índice de consistencia se determinó mediante el cálculo de la energía de activación (obtenida de una ecuación tipo Arrhenius) cuyos valores se encuentran entre 8.18 kJ/mol y 14.52 kJ/mol, teniendo una relación directa con la concentración de sólidos solubles de la pulpa de mango. La densidad disminuyó en forma lineal con la temperatura; la pendiente fue independiente de la concentración de sólidos solubles y la ordenada al origen aumentó al incrementarse la concentración de sólidos solubles.

I. INTRODUCCIÓN

En muchas operaciones unitarias de la industria alimentaria, es esencial conocer las propiedades físicas y fisicoquímicas del material bajo tratamiento, de modo que se pueda elegir el equipo más apropiado para el proceso de manufactura (Lewis, 1993).

En algunas operaciones, se requiere de un conocimiento previo de las propiedades físicas del material inicial y/o durante el proceso para formular modelos matemáticos que representen las condiciones críticas de operación (Crane, 1992; Zainal y col., 2000). Es importante también conocer las propiedades reológicas del alimento a procesar para el diseño y selección de equipo (intercambiadores de calor, bombas, filtros, mezcladores, tolvas, pasteurizadores y fermentadores), además junto con la densidad, son propiedades consideradas para evaluar la calidad del producto final o durante su procesamiento (Guerrero y Alzamora, 1992; Zainal y col., 2000).

Las propiedades reológicas y la densidad cambian considerablemente en operaciones que implican transferencia de calor o masa (Lewis 1993; Geankoplis, 1998). La influencia de la temperatura en las propiedades reológicas se ha relacionado en términos de una ecuación tipo Arrhenius (ecuación 1) específicamente para la viscosidad de fluidos newtonianos (Steffe, 1992):

$$\mu = f(T) = A \exp\left(\frac{Ea}{RT}\right) \quad (1)$$

donde A es una constante, Ea es la energía de activación (kJ/kmol), T es la temperatura (K) y R la constante general de los gases (kJ/kmol K).

En el caso de fluidos no-newtonianos el efecto de la temperatura en la viscosidad aparente (η_a) determinada a una velocidad de cizalla o el índice de consistencia (k) para fluidos que siguen el modelo de la ley de la potencia se puede expresar por las ecuaciones 2 y 3, donde η_∞ y k_∞ son parámetros considerados como viscosidad aparente e índice de consistencia a una temperatura infinita (Rao, 1995; Chang y Hartel, 1997; Rao, 1999)

$$\eta_s = \eta_\infty \exp\left(\frac{Ea}{RT}\right) \quad (2)$$

$$k = k_\infty \exp\left(\frac{Ea}{RT}\right) \quad (3)$$

De los diversos alimentos, existe especial interés en determinar las características y propiedades de los productos derivados de frutas debido a las diferencias en su composición y estructura (Carbonell y col., 1990). Los alimentos líquidos y semisólidos como zumos, néctares, purés, pulpas y concentrados, son sistemas bifásicos donde la fase continua es una solución acuosa de ácidos orgánicos, azúcares, sales y pectinas solubles y la fase dispersa está compuesta de partículas de diferente forma y volumen, procedentes de los tejidos de la fruta (Rao, 1987). Debido a ello el comportamiento reológico es muy complejo. Algunos derivados de fruta se comportan como fluidos newtonianos como el jarabe de azúcar de uva (*cv. Thompson seedless*), jugo de manzana clarificada y jugo de manzana (*Malus floribunda*) (Schwartz y Costell, 1986; Constenla, y col., 1989; Cepeda y Villarán, 1999). Otros derivados de fruta como concentrados y pulpas se comportan como fluidos no-newtonianos, generalmente

fluidificados por cizalla, como jugo de naranja concentrado (Vitali y Rao 1984a y 1984b; Crandall y col. 1988), jugo de guayaba rosa (*Psidium guajava* L.) (Zainal y col., 2000 y 2001), pulpa y concentrado de mango (Lakshminarayana,1985), mostrando en ocasiones una resistencia inicial a fluir y/o cierta dependencia del tiempo como lo muestran estudios realizados por Guerrero y Alzamora (1998) y Bhattacharya, (1999) para puré de durazno (*Prunus persica*), papaya (*Carica papaya*), mango (*Mangifera indica*) y pulpa de mango (CV. *Tatapuri*).

Es evidente que las grandes diferencias químicas y estructurales que existen entre los diversos subproductos de alimentos derivados de frutas impiden intercambiar datos de las propiedades físicas, fisicoquímicas y reológicas de éstos.

El mango (*Mangifera indica*) y la papaya (*Carica papaya*) son las frutas tropicales más importantes en México (Argáís y López-Malo, 1995) las cuales en general se consumen en forma fresca. En el caso específico del mango éste es más sensible al daño por frío por lo que su vida de anaquel disminuye si se almacena a una temperatura inferior de 10 °C. Por esta razón, algunas variedades de pulpa no fibrosa se procesan como fruta congelada o como jugos y néctares (Boynton, 2002). En el caso de estos últimos, para la elaboración del producto es necesario obtener previamente la pulpa. Debido a que existen pocos estudios sobre la pulpa de mango, además de que las propiedades físicas dependen de la variedad, grado de madurez, tratamiento previo aplicado, tamaño de partícula, entre otras, el objetivo de esta investigación es estudiar el efecto de la temperatura y la concentración de sólidos solubles (°Bx) en las propiedades reológicas en cizalla rotacional y el efecto de la temperatura en la densidad de la pulpa de mango variedad ataulfo cultivado en México.

II. MATERIALES Y MÉTODOS

Materiales.

Pulpa de mango de la variedad ataulfo (*Mangifera indica*) a 27 °Bx de concentración con envasado aséptico proporcionada por la empresa Jugomex, (grupo JUMEX S.A. de C.V.). Agua destilada.

Métodos.

Obtención de la pulpa de mango

La fruta se lavó dos veces por inmersión. Enseguida se retiró manualmente el material extraño y se lavó nuevamente. El mango así tratado se trituró en un molino de martillos y la pulpa se obtuvo en dos etapas sucesivas de despulpado. Para ello se usaron dos extractores de pulpa provistos de paletas giratorias que forzaron el material molido a través de una malla 30/10 que separa la pulpa del bagazo, la cáscara y la semilla. Posteriormente se inactivaron las enzimas de la pulpa y se desodorizó ésta por eliminación de volátiles. La pulpa resultante se refinó en dos etapas con mallas 10/10 y se concentró en un evaporador de película descendente hasta una concentración de sólido solubles de 27 °Bx. Enseguida, el producto se pasó a través de un intercambiador de película raspada (112 °C) y finalmente se envasó asépticamente en bolsas plásticas de propileno con recubrimiento interno laminado esterilizadas con vapor, las cuales fueron colocadas en contenedores con capacidad de 60 kg

Preparación de la muestra

La muestra a 27 °Bx se utilizó directamente del envase, a partir de ésta se obtuvieron las concentraciones de 15 °Bx y 21 °Bx al realizar una dilución con agua destilada. La medición de los grados Brix se realizó en un refractómetro ABBE de Erma Tokio No. 16571 marca Milton Roy Company, utilizando la técnica descrita por Lees, (1985).

Las muestras a temperaturas de 30 °C y 50 °C se colocaron a baño María cubiertas con celofán para evitar la pérdida de humedad durante el calentamiento y con ello disminuir el tiempo de acondicionamiento de la temperatura antes de ser examinada.

Las muestras que requirieron bajas temperaturas (12 °C) fueron cubiertas con celofán para evitar su humectación y refrigeradas hasta alcanzar la temperatura deseada.

Estudio de flujo bajo cizalla rotacional

El análisis reológico en flujo de cizalla rotacional, se realizó en un viscosímetro de cilindros concéntricos marca Haake modelo VT 550, el cual cuenta con un baño marca Haake C25 con recirculación de agua, que mantiene la temperatura constante. Las temperaturas que se estudiaron que fueron 12 °C, 30 °C y 50 °C. Se utilizó la geometría SV DIN (53019) con las siguientes características: Diámetro externo = 11.55 mm, diámetro interno = 10.6 mm, longitud efectiva = 31.95 mm y un volumen de muestra de 14 mL.

Se examinaron las muestras con concentraciones de, 27 °Bx, 21 °Bx y 15 °Bx, usando para cada concentración tres diferentes temperaturas 12 °C, 30 °C y 50 °C. El análisis se dividió en dos etapas, la determinación de la dependencia con el tiempo (viscosidad aparente en función del tiempo de cizallamiento) y la evaluación de los parámetros reológicos (curva de flujo de descenso-estacionaria).

La prueba se inició sometiendo la muestra a una velocidad de cizalla constante de 1000 s^{-1} durante 180 segundos registrando los valores de viscosidad aparente en función del tiempo, posteriormente la muestra fue cizallada a partir de 1000 s^{-1} hasta 0.5 s^{-1} en un periodo de 120 segundos, en 30 puntos (datos utilizados para la evaluación de los parámetros reológicos), finalmente se realizó una curva estacionaria (curva de equilibrio) con un gradiente inicial de 0.5 s^{-1} a 1000 s^{-1} con 30 puntos y máximo 15 segundos por punto, con la finalidad de determinar si el material presenta el fenómeno de histéresis. Cada ensayo se efectuó por duplicado con una variación de temperatura de $\pm 0.4 \text{ }^\circ\text{C}$. Las curvas de flujo obtenidas se evaluaron por medio de los modelos definidos por las siguientes ecuaciones reológicas:

| Modelo | Ecuación | Parámetros reológicos |
|--------------------|--|--|
| Ley de la potencia | $\sigma = k \dot{\gamma}^n$ | n índice de comportamiento al flujo (adimensional) k índice de consistencia (Pa·s ⁿ). |
| Casson | $\sigma^{0.5} = \sigma_0^{0.5} + k_C \dot{\gamma}^{0.5}$ | σ_0 Esfuerzo de fluencia. (Pa) k _C Constante de Casson (Pa·s ^{0.5}). |
| Herschel Bulkley | $\sigma = \sigma_0 + k \dot{\gamma}^n$ | σ_0 Esfuerzo de fluencia (Pa) n índice de comportamiento al flujo (adimensional) k índice de consistencia (Pa·s ⁿ). |

El efecto de la temperatura en el comportamiento reológico se determinó utilizando la ecuación 3, la cual se desarrolla de la siguiente manera:

$$\ln k = \ln k_\infty + \left(\frac{Ea}{RT} \right) \quad (4)$$

Al ajustar los valores de $\ln k$ en función del inverso de la temperatura $1/T$ se obtiene una línea recta, a partir de cuya pendiente es posible obtener el valor de la energía de activación mientras que de la ordenada al origen se obtiene la constante k_{∞} , que es el índice de consistencia a una temperatura infinita (Chang y Hartel, 1997).

Determinación de la densidad de la pulpa de mango

Para cada concentración de sólidos solubles (27 °Bx, 21 °Bx y 15 °Bx) se midió la densidad relativa en un densímetro marca PAAR modelo DMA 38 a 20 °C. La muestra debe estar homogénea, libre de burbujas. Se tomaron lecturas directas de densidad (ρ) en g/cm^3 , densidad relativa (S.G.) y temperatura de medición (20 °C), las mediciones se realizaron por triplicado, obteniéndose la densidad de la pulpa de mango, para cada temperatura (12 °C, 30 °C y 50 °C) con las siguientes ecuaciones:

$$\text{S.G.} = \frac{\rho_{\text{mango}}}{\rho_{\text{agua}}} \quad (5)$$

por tanto:

$$\rho_{\text{mango}} = (\text{S.G.})(\rho_{\text{agua}}) \quad (6)$$

Donde ρ_{agua} , es la densidad del agua a la temperatura de 12 °C, 30 °C, y 50 °C y ρ_{mango} , es la densidad del mango a la temperatura de 12 °C, 30 °C y 50 °C.

Tratamiento estadístico

A partir de los datos medidos se calculó el promedio, la desviación estándar y el coeficiente de variación (C.V.) en porcentaje. Las curvas presentadas son aquellas que tienen los parámetros más semejantes al promedio de los resultados.

III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Flujo bajo cizalla rotacional

En la Figura 1 se presenta el comportamiento de la viscosidad aparente en función del tiempo de cizallamiento, para la pulpa de mango a 27 °Bx, 21°Bx y 15 °Bx a una temperatura de 12 °C y una velocidad de cizalla constante de 1000 s⁻¹. La viscosidad aparente disminuyó ligeramente con el tiempo. Asimismo sólo presentan la segunda sección mencionada por Bhattacharya (1999), donde la viscosidad aparente decrece lentamente hasta hacerse constante debido a la orientación o deformación de la estructura de los sólidos suspendidos por la acción de la cizalla.

El mismo comportamiento se presenta en las temperaturas de 30 °C y 50 °C para las diferentes concentraciones de sólidos solubles (datos no mostrados).

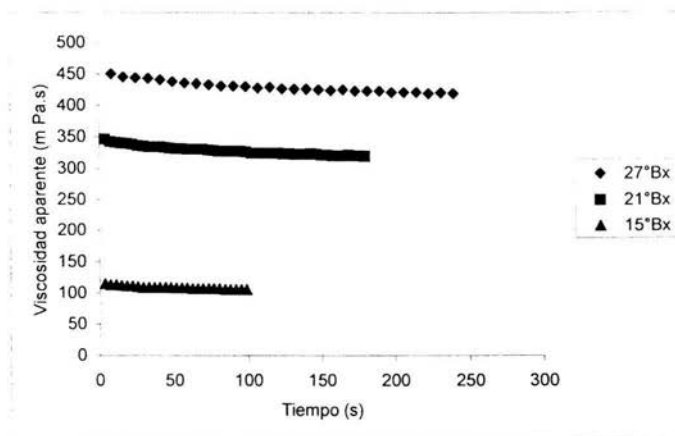


Figura 1.- Viscosidad aparente en función del tiempo de cizallamiento para la pulpa de mango a 27 °Bx, 21 °Bx y 15 °Bx a una velocidad de cizalla de 1000 s⁻¹ y temperatura de 12 °C.

Una vez que la muestra alcanzó condiciones de equilibrio (la viscosidad aparente es independiente del tiempo) fue cizallada de forma descendente obteniendo los reogramas de la figura 2 (a, b y c), los cuales muestran el comportamiento del esfuerzo de cizalla en función de la velocidad de cizalla para las diferentes concentraciones de sólidos solubles (°Bx) a temperaturas de 12 °C, 30 °C, 50 °C respectivamente. En todos los casos, las muestras presentan un comportamiento no-newtoniano fluidificado por cizalla donde la viscosidad aparente disminuye con la velocidad de cizalla, teniendo mayor variación con el aumento del contenido de sólidos solubles (figura 3 a, b y c). Asimismo se realizaron los cálculos para obtener los parámetros reológicos de diferentes modelos como fueron los modelos de la Ley de la potencia, Casson y Herschel-Bulkley, para este último modelo, el esfuerzo de fluencia (σ_0) se determinó por extrapolación gráfica del esfuerzo de cizalla (σ) en función de la velocidad de cizalla ($\dot{\gamma}$). De acuerdo con el coeficiente de determinación (r^2), el modelo que mejor define el comportamiento de las muestras analizadas es de la Ley de la potencia (Cuadro 1)

En la figura 4 se analiza el efecto de la temperatura, para cada concentración de sólidos solubles. Obsérvese que en la concentración de 15 °Bx es menos importante, debido a que la dilución incrementa la separación de las partículas provocando una disminución en las fuerzas intermoleculares, así como de la interacción agua-partícula, bajo estas condiciones el aumento de la temperatura tiene un pequeño efecto en el comportamiento reológico. (Vitali y Rao, 1984 b, Constela y col. 1989). Estos resultados muestran que el contenido de sólidos solubles define la influencia de la temperatura en el comportamiento reológico. Tendencias similares propone Cepeda y Villarán (1999) para jugo de manzana evaluada en un intervalo de temperatura de 5 °C a 60 °C y 45.1 °Bx a 71.1 °Bx.

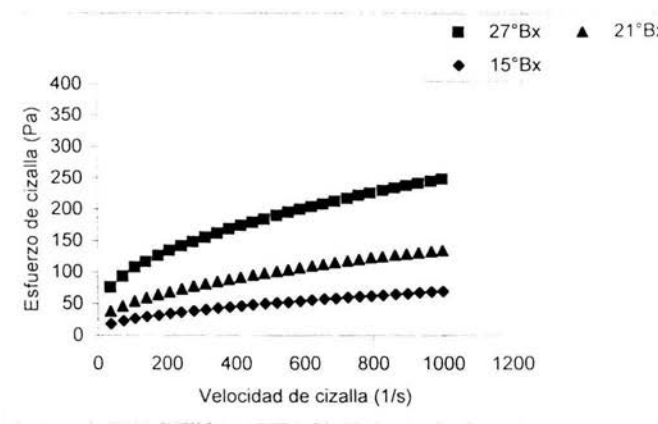
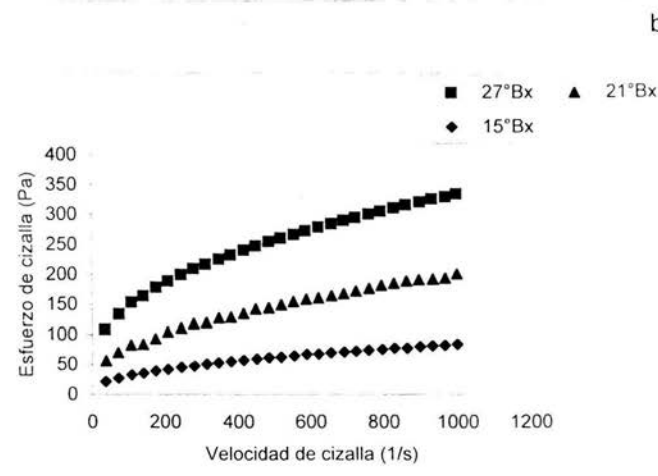
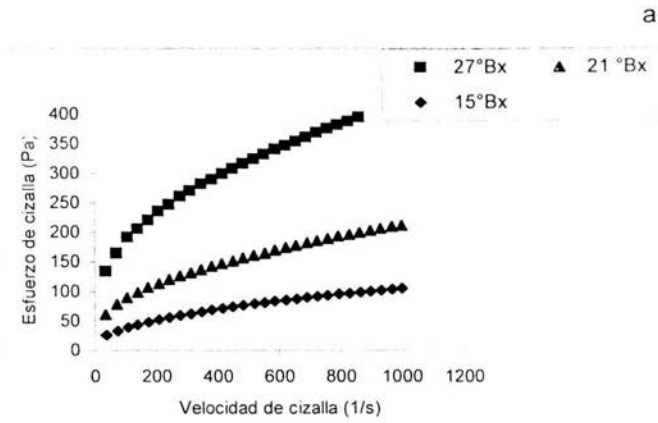
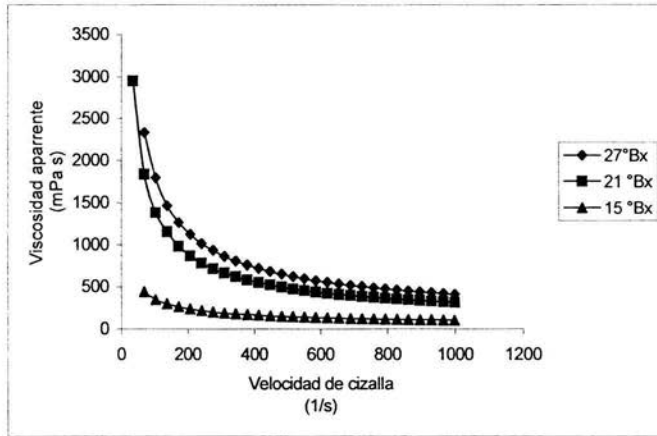
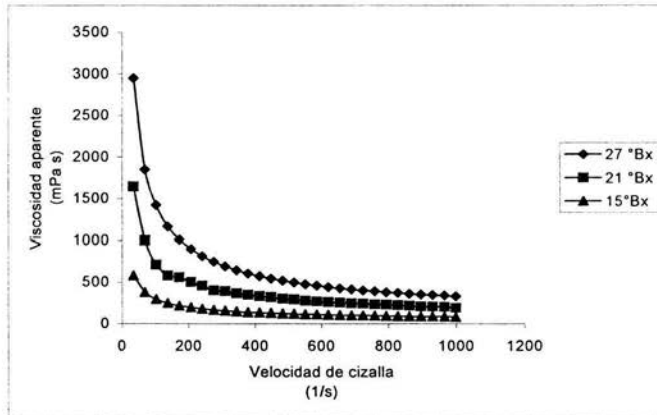


Figura 2.- Esfuerzo de cizalla en función de la velocidad de cizalla para 27°Bx, 21°Bx y 15 °Bx a temperaturas de 12°C (a), 30°C (b) y 50 °C (c).

a



b



c

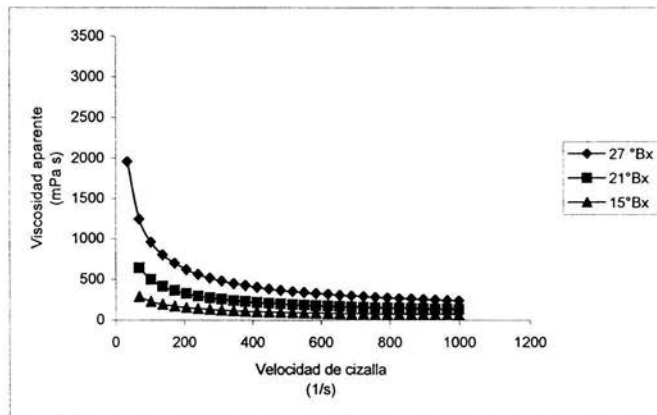


Figura 3. Viscosidad aparente en función de la velocidad de cizalla para la pulpa de mango a 27°Bx, 21°Bx y 15°Bx a temperaturas de 12°C (a), 30°C (b) y 50 °C (c).

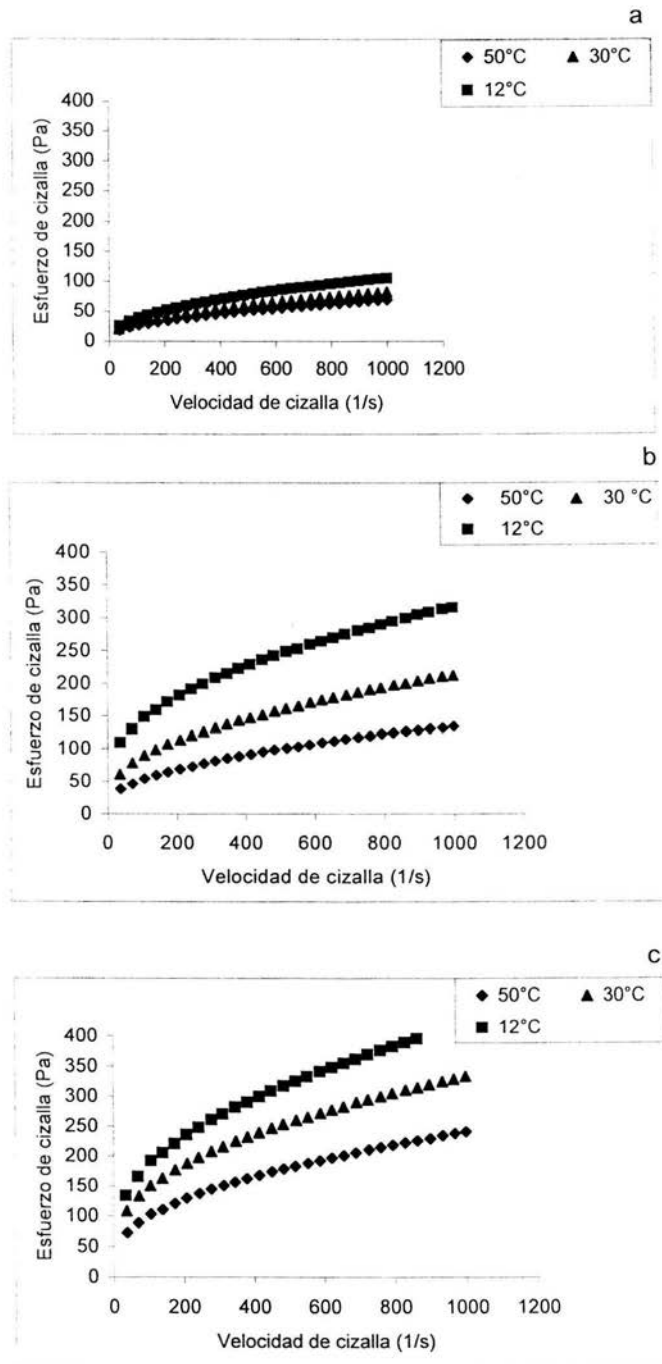


Figura 4.- Esfuerzo de cizalla en función de la velocidad de cizalla para 50°C, 30°C y 12 °C a 15 °Bx (a), 21 °Bx (b) y 27 °Bx (c).

Cuadro 1. Índice de consistencia (k) e índice de comportamiento al flujo (n) para el modelo de la ley de la potencia en función de la concentración de sólidos solubles de 27°Bx, 21°Bx y 15 °Bx y temperatura de 12°C, 30°C y 50 °C.

| 27 °Bx | k Pa·sⁿ | C.V. (%) | n | C.V. (%) | r² |
|---------------|-------------------------------|---------------------|----------|---------------------|----------------------|
| 12 °C | 38.10 | 0.60 | 0.34 | 0.43 | 0.998 |
| 30 °C | 30.27 | 1.31 | 0.34 | 0.56 | 0.998 |
| 50 °C | 18.53 | 3.17 | 0.37 | 0.63 | 0.997 |
| 21 °Bx | | | | | |
| 12 °C | 18.75 | 25.24 | 0.35 | 0.30 | 0.997 |
| 30 °C | 12.94 | 0.68 | 0.39 | 0.31 | 0.995 |
| 50 °C | 8.36 | 2.02 | 0.39 | 0.02 | 0.995 |
| 15 °Bx | | | | | |
| 12 °C | 5.08 | 1.65 | 0.44 | 0.44 | 0.998 |
| 30 °C | 4.61 | 1.11 | 0.42 | 0.09 | 0.998 |
| 50 °C | 3.63 | 4.71 | 0.42 | 0.52 | 0.999 |

C.V. Coeficiente de variación.

r² Coeficiente de determinación

Los datos de los parámetros reológicos se presentan en el Cuadro 1, donde se muestran el valor promedio de dos réplicas del índice de consistencia (k), y el índice de comportamiento al flujo (n) con sus respectivos coeficientes de variación para cada concentración y temperatura. La influencia de la temperatura se refleja principalmente en el índice de consistencia (k), existe una diferencia en promedio del 84 % entre 27 °Bx, y 15 °Bx, para todas las temperaturas y de 54 % en promedio entre y 27 °Bx y 21 °Bx. Sin embargo, el índice de comportamiento al flujo (n), muestran una variación menor con la temperatura, presentando diferencias de 2 % a temperatura de 12 °C para 21 °Bx y 27 °Bx, hasta 23 % a la misma temperatura en 27 °Bx y 15 °Bx. Tendencias similares encontraron Bhattacharya, (1999) Guerrero y Alzamora (1998) para la pulpa y puré de mango, respectivamente.

Al disminuir el contenido de sólidos solubles, disminuye el índice de consistencia (k) y aumenta el índice de comportamiento (n), debido a que la dilución reduce la concentración de pectinas solubles y su contribución al comportamiento no-newtoniano. Asimismo el índice de consistencia aumenta cuando la temperatura disminuye, mientras que en el índice de comportamiento al flujo se observa una variación poco importante. Obsérvese que sólo en la concentración de 21 °Bx. y 12 °C es donde se tiene un mayor error en el promedio del índice de consistencia. Esto puede ser debido a que las dos réplicas evaluadas no coinciden en un 100 por ciento, por lo que al realizar el cálculo de los parámetros reológicos el error se incrementa.

Energía de activación

Para cuantificar el efecto que la temperatura ejerce sobre el índice de consistencia de las tres concentraciones de sólidos solubles (27 °Bx, 21 °Bx y 15 °Bx) para las diferentes temperaturas (12 °C, 30 °C y 50 °C) se ajustó a una ecuación tipo Arrhenius (ecuación 4), para calcular la energía de activación al flujo.

En la Figura 5 se muestra el logaritmo natural del índice de consistencia ($\ln k$) en función al inverso de la temperatura ($1/T$ en K) donde la pendiente corresponde a la energía de activación (E_a) y la ordenada al origen (k_∞) es el índice de consistencia a una temperatura infinita y las líneas continuas corresponden a la ecuación de regresión.

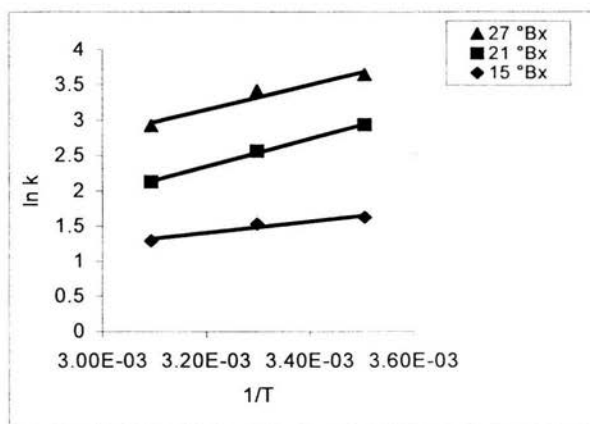


Figura 5. Logaritmo natural del índice de consistencia (k) en función del inverso de la temperatura (K) para 27 °Bx, 21 °Bx y 15 °Bx.

Los valores obtenidos de la energía de activación (E_a), el factor de frecuencia (k_∞) y el coeficiente de determinación (r^2) para cada una de las concentraciones de sólidos solubles 27 °Bx, 21 °Bx y 15 °Bx se presentan en el cuadro 2. Obsérvese que la energía de activación es mayor para la concentración de sólidos solubles de 21 °Bx, muestra donde la evaluación tiene mayor error en el promedio del índice de consistencia (cuadro 1). Estudios realizados por Rao, (1987) para suspensiones vegetales y Cepeda y Villarán, (1999) para jugo de manzana muestran una relación directa entre la energía de activación y la concentración de sólidos solubles. Sin embargo los trabajos de Zainal y col. (2001) en jugo de guayaba demuestran una relación inversa. Vitali y Rao (1984b) establecen en un intervalo de temperatura de - 18.8 °C a 29.2 °C la existencia de dos segmentos en el gráfico del logaritmo del índice de consistencia en función al inverso de la temperatura y determinan que la energía de activación es mayor en las temperaturas bajas ya que las muestras requieren de más energía para romper la estructura y formar algunos espacios entre las moléculas. Por lo

tanto se puede decir que la energía de activación depende del intervalo de temperaturas y sólidos solubles estudiado, así como de la naturaleza de la muestra. Por ello con los resultados obtenidos en este trabajo, la energía de activación es válida solamente para el intervalo de temperatura de 12 °C a 50 °C y no muestran una clara relación con el contenido de sólidos, a pesar de ello, el valor más alto se obtiene a la concentración más alta. Asimismo, el índice de consistencia a temperatura infinita, disminuye al incrementarse el contenido de sólidos solubles, por ser una ordenada al origen de valores logarítmicos.

Cuadro 2. Parámetros del modelo de Arrhenius para evaluar el efecto de la temperatura sobre el índice de consistencia a 27 °Bx, 21 °Bx y 15 °Bx de la pulpa de mango.

| Concentración (°Bx) | Ea (kJ/mol) | k_{∞} Pa's ⁿ | r ² |
|------------------------|-----------------|-----------------------------------|----------------|
| 27 | 14.52 | 8.71×10^{-2} | 0.956 |
| 21 | 16.28 | 1.97×10^{-2} | 0.997 |
| 15 | 8.18 | 1.50×10^{-1} | 0.998 |

r² Coeficiente de determinación

Densidad de la pulpa de mango

La relación entre la densidad de la pulpa de mango para cada concentración de sólidos solubles y la temperatura se muestra en la Figura 6 y es representado por la ecuación lineal del cuadro 3. La densidad aumenta con la concentración de los sólidos solubles, ya que, para este tipo de suspensión a 27 °Bx es donde se encuentran en mayor concentración los sólidos solubles, ácidos orgánicos, sales y pectinas solubles, aumentando la masa del sistema. Asimismo, la densidad decrece con el aumento de la

temperatura, debido al aumento de la energía térmica de las moléculas y del incremento de las distancias intermoleculares (Constenla, 1989).

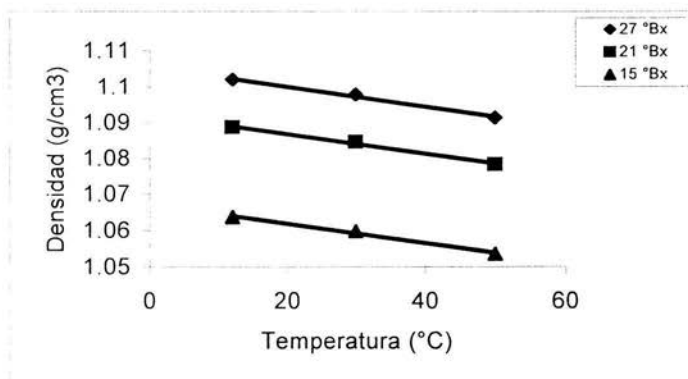


Figura 6 Densidad de la pulpa de mango en función a la temperatura para cada Concentración de sólidos solubles 27°Bx, 21°Bx y 15 °Bx.

La relación lineal entre la densidad y la temperatura se muestra en el cuadro 3. La pendiente no es afectada por la concentración de sólidos solubles, la ordenada al origen (densidad) aumenta con el incremento de la concentración de sólidos solubles (°Bx) y el signo negativo reafirma la disminución de la densidad con el aumento de la temperatura.

Cuadro 3. Expresión matemática de la densidad (g/cm³) con la temperatura (°C) para la concentración de sólidos solubles de 27 °Bx, 21 °Bx y 15 °Bx.

| Concentración (°Bx) | Expresión matemática | r ² |
|---------------------|--|----------------|
| 27 | $P = 1.1056 - 0.0003 \text{ } ^\circ T$ | 0.992 |
| 21 | $P = 1.0923 - 0.0003 \text{ } ^\circ T$ | 0.992 |
| 15 | $\rho = 1.0673 - 0.0003 \text{ } ^\circ T$ | 0.991 |

r² Coeficiente de determinación

IV. CONCLUSIONES

La pulpa de mango (*Mangifera indica*) para las concentraciones de 27 °Bx, 21°Bx y 15 °Bx presenta una ligera dependencia de la viscosidad aparente con el tiempo de cizalla a 1000 s^{-1} . El modelo reológico que mejor define el comportamiento al flujo es de tipo fluidificante a la cizalla.

Los parámetros reológicos de la pulpa de mango dependen más de la concentración de sólidos solubles (°Bx) que de la temperatura. El índice de consistencia (k) tiene una relación directa con la concentración de sólidos solubles (°Bx) e inversa con la temperatura, descrita esta última por la ecuación tipo Arrhenius. El índice de comportamiento al flujo (n), se ve ligeramente modificado por la temperatura.

La energía de activación se encontró en un intervalo de 8.18 kJ/mol a 14.52 kJ/mol, no presentando una relación clara con la concentración de sólidos solubles.

La densidad se ve afectada tanto por la concentración de sólidos solubles como por la temperatura.

El conocimiento de los efectos de la temperatura y la concentración de la pulpa de mango, así como las propiedades reológicas de la misma, pueden contribuir al mejor entendimiento del comportamiento de la pulpa como parámetros para efecto de selección de equipo de bombeo, tuberías y como parámetros de calidad en producto terminado. Por lo que un punto importante en la obtención de los resultados de la presente investigación es proporcionar información original que puede ser aplicada al cálculo y/o diseño de sistemas y equipo que manejen este producto, además de servir como referencia y punto de partida en futuras investigaciones que permitan y profundicen el mejor entendimiento de la información aquí presentada.

BIBLIOGRAFIA

Argaiz, A y López-Malo, A. (1995). Kinetics of first change of flavour, cooked flavour development and pectinesterase inactivation on mango and papaya nectars and purees. *Rev. Esp. Cienc. Tec. Aliment.* **35** (1): 92-100.

Bhattacharya, S. (1999). Yield stress and time-dependent rheological properties of mango pulp. *J. Food Sci.* **64** (6): 1029-1033.

Boyton, B.B., Sims, C.A., Sargent, S. Balban, M. O y Marshall, M.R. (2002). Quality and stability of precut mangos and carambolas subjected to high-pressure processing. *J. Food Sci.* **67** (1): 409-415.

Carbonell, E; Costell, E. y Durán, L. (1990). Comportamiento reológico de los productos derivados de fruta. Flujo, dependencia del tiempo y plasticidad. *Rev. Agroquím. Tecnol. Alimen.* **30** (2): 189-209.

Constenla, D. T., Lozano, J. E. y Crapiste, G. H. (1989). Thermophysical properties of clarified apple juice as a function of concentration and temperature. *J. Food Sci.* **54** (3):663-668.

Cepeda, E. y Villarán, M. C. (1999). Density and viscosity of *Malus floribunda* juice as a function of concentration and temperature. *J. Food Eng.* **41**:103 -107.

Crandall, P.G., Davis, K.C., Carter, R.D. y Sadler, G.D. (1988). Viscosity reduction by homogenization of orange juice concentrate in a pilot plant taste evaporator. *J. Food Sci.* **53** (5): 1477-1481.

Crane Co. (1992). "Flujo de fluidos en válvulas, accesorios y tuberías". Reporte técnico No. 410. Mc Graw Hill / Interamericana. México.

Chang, Yi-H. y Hartel, R. W. (1997). Flow properties of freeze-concentrated skim milk. *J. Food Eng.* **31**:375-386.

Geankoplis, C. J. (1998). "Procesos de transporte y operaciones unitarias". Tercera edición. Cecsa. México. 1007 p.

Guerrero, S. N., y Alzamora, S. M. (1998). Effect of pH, temperature and glucose addition on flow behaviour of fruit purees: II. Peach, papaya and mango purees. *J. Food Eng.* **37**:77-101.

Lakshminarayana, R. K., Rao, K. L., Eipeson, W. E., Srinivasa, R. P. N., Rao, S. P. N., Patwardhan, M. V. y Ramanathan, P. K. (1985). Rheological properties of mango pulp and concentrates. *J. Food. Sci. Tech.* **22** (1):30-33.

Lewis, M. J. (1993). "Propiedades físicas de los alimentos y de los sistemas de procesado". Acribia. España.

Lees, R. (1985). Análisis de los alimentos: métodos analíticos y de control de calidad. Acribia. España. 165 p.

Rao, M. A. (1987). Predicting the flow properties of food suspensions of plant origin. Food Technol. **41** (3): 85-88.

Rao, M. A. (1995). Rheological properties of fluid food. En Engineering properties of food. Rao, M. A. y Rizvi, S. S. H (Eds.) Marcel Dekker, Inc. NewYork. p.p. 9-10.

Rao, M. A. (1999). Rheology of fluid and semisolid foods. Principles and applications. Ed. An Aspen publication. p. 49.

Schwartz, M. y Costell, E. (1986). Influencia de la temperatura en el comportamiento reológico del azúcar de uva (*c.v. Thompson seedless*). Rev. Agroquim. Tecnol. Aliment. **26** (3): 365-372.

Steffe J. F. (1992) "Rheological methods in food process engineering". Freeman Press, USA. p.p. 25-26.

Vitali, A. A. y Rao, M. A. (1984a). Flow properties of low-pulp concentrated orange juice: Serum viscosity and effect of pulp content. J Food Sci. **49**: 876-881

Vitali, A. A. y Rao, M. A. (1984b). Flow properties of low-pulp concentrated orange juice: Effect of temperature and concentration. J. Food Sci. **49**: 882-888.

Zainal, B. S., Abdul Rahman, R., Ariff, A. B., Saari, B. N, y Asbi, B. A. (2000). Effects of temperature on the physical properties of pink guava juice at two different concentrations. *J. Food Eng.* **43**: 55-59.

Zainal, B. S., Abdul Rahman, R., Ariff, A.B. y Saari, B.N. (2001). Thermophysical properties of pink guava juice at 9 and 11 °Bx. *J. Food Sci.* **24**: 87-100.