



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE
MÉXICO

FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES
CUAUTITLÁN

Influencia de la temperatura en el comportamiento al
flujo de pulpas de fresa (*Fragaria vesca*), guayaba
(*Psidium guajava*) y mango (*Mangífera indica*).

T E S I S
QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:
INGENIERO EN ALIMENTOS
P R E S E N T A :
RUBÉN RAÚL SÁNCHEZ JIMÉNEZ

ASESORAS: M. EN C. VIRGINIA AGUSTINA DELGADO REYES
I.A. VERÓNICA ROMERO ARREOLA

CUAUTITLÁN IZCALLI, EDO. DE MÉX.

2012



Universidad Nacional
Autónoma de México



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 CUAUTITLÁN
 UNIDAD DE ADMINISTRACIÓN ESCOLAR
 DEPARTAMENTO DE EXÁMENES PROFESIONALES

ASUNTO: VOTO APROBATORIO

DRA. SUEMI RODRÍGUEZ ROMO
 DIRECTORA DE LA FES CUAUTITLÁN
 PRESENTE



ATN: L.A. ARACELI HERRERA HERNANDEZ
 Jefa del Departamento de Exámenes
 Profesionales de la FES Cuautitlán

Con base en el Art. 28 del Reglamento de Exámenes Profesionales nos permitimos comunicar a usted que revisamos la: TESIS

Influencia de la temperatura en el comportamiento al flujo de pulpas de fresa (Fragaria fresca), guayaba (Psidium guajava) y mango (Mangífera indica)

Que presenta el pasante: Rubén Raúl Sánchez Jiménez
 Con número de cuenta: 40809547-9 para obtener el Título de: Ingeniero en Alimentos

Considerando que dicho trabajo reúne los requisitos necesarios para ser discutido en el EXAMEN PROFESIONAL correspondiente, otorgamos nuestro VOTO APROBATORIO.

ATENTAMENTE
 "POR MI RAZA HABLARA EL ESPÍRITU"
 Cuautitlán Izcalli, Méx. a 02 de octubre de 2012.

PROFESORES QUE INTEGRAN EL JURADO

	NOMBRE	FIRMA
PRESIDENTE	IA. Laura Margarita Cortazar Figueroa	
VOCAL	IA. Francisco Javier López Martínez	
SECRETARIO	M. en C. Virginia Agustina Delgado Reyes	
1er SUPLENTE	IA. Zaira Berenice Guadarrama Alvarez	
2do SUPLENTE	IA. Maritza Rocandio Pineda	

NOTA: los sinodales suplentes están obligados a presentarse el día y hora del Examen Profesional (art. 120).
 HHA/pm

AGRADECIMIENTOS

Gracias a mis padres y hermanos por su apoyo moral, académico y económico brindado a lo largo de la carrera para lograr este proyecto.

A la gran institución que dio forma a una nueva persona, formando carácter, principios y valores a través de sus profesores, en honor a la Universidad Nacional Autónoma de México: “Por mi raza hablara el espíritu”.

Agradezco a los profesores de la carrera de Ingeniería en alimentos de la Facultad de Estudios Superiores Cuautitlán, UNAM. Por haber compartido conocimiento y experiencias con sus alumnos, especialmente a la M. en C. Virginia Delgado Reyes por guiar y ser parte importante en la realización de este proyecto, así como a la I.A. Verónica Romero Arreola.

GRACIAS.

ÍNDICE

	Página
ÍNDICE DE CUADROS	iii
ÍNDICE DE FIGURAS	vi
NOMENCLATURA	vii
RESUMEN	x
INTRODUCCIÓN	xii
CAPÍTULO I	
MARCO TEÓRICO	
1 Reología	1
1.1 Conceptos básicos	1
1.2 Clasificación reológica de los materiales	7
1.2.1 Fluido newtoniano	9
1.2.2 Fluido no-newtoniano	10
1.2.2.1 Fluidos independientes del tiempo	11
1.2.2.2 Fluidos dependientes del tiempo	16
1.3 Efecto de la temperatura en el comportamiento al flujo.....	19
2 Pulpa de fruta	20
2.1 Composición química	20
2.2 Propiedades fisicoquímicas	23
2.3 Efecto de la temperatura en productos derivados de frutas	24
3 Energía de activación	25

CAPÍTULO II	
METODOLOGÍA EXPERIMENTAL	Página
2.1 Objetivos	28
2.2 Desarrollo experimental	29
2.2.1 Materiales	29
2.2.2 Métodos	29
2.2.2.1 Preparación de la muestra.....	29
2.2.2.2 Determinación de sólidos totales	29
2.2.2.3 Determinación de propiedades fisicoquímicas	30
2.2.2.4 Medición del tamaño de partícula	31
2.2.2.5 Estudio del comportamiento al flujo bajo cizalla rotacional	31
2.2.2.6 Cálculo de la energía de activación	33
2.2.2.7 Tratamiento estadístico	33
CAPÍTULO III	
RESULTADOS Y DISCUSIÓN	
3.1 Propiedades fisicoquímicas y sólidos totales	34
3.2 Tamaño de partícula	35
3.3 Comportamiento al flujo de pulpa de fresa	38
3.4 Comportamiento al flujo de pulpa de guayaba.....	49
3.5 Comportamiento al flujo de pulpa de mango	59
3.6 Energía de activación	69
3.6.1 Energía de activación en condiciones de equilibrio	69
3.6.2 Energía de activación en condiciones de no equilibrio	75
CONCLUSIONES	79
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	81
ANEXO A	87
ANEXO B	90

ÍNDICE DE CUADROS

	Página
Cuadro 1. Composición química de fresa, guayaba y mango.....	21
Cuadro 2. Valores de viscosidad aparente y energía de activación en diferentes productos derivados de fruta	27
Cuadro 3. Composición química de pulpas comerciales de fresa, guayaba y mango	29
Cuadro 4. Propiedades fisicoquímicas y concentración de sólidos totales de las pulpas comerciales de fresa, guayaba y mango.....	35
Cuadro 5. Dimensión mayor de partículas de pulpa de fresa, guayaba y mango sin cizallar y cizalladas.	37
Cuadro 6. Tiempo de cizallamiento y viscosidad a las diferentes temperaturas de la pulpa de fresa de ambos métodos.	40
Cuadro 7. Parámetros reológicos del modelo Oswald-de Waele de la pulpa de fresa a diferentes temperaturas para ambos métodos.	44
Cuadro 8. Valores de diferencia mínima significativa (DMS) del índice de consistencia a las diferentes temperaturas para la pulpa de fresa.	46
Cuadro 9. Valores de diferencia mínima significativa (DMS) del índice de comportamiento al flujo a las diferentes temperaturas para la pulpa de fresa	47
Cuadro 10. Viscosidad aparente evaluada a diferentes velocidades de cizalla (1, 10, 100, 200, 300, 400 y 500 s ⁻¹) y diferente temperatura (5, 15, 25, 35, 45, 55 y 65 °C) de la pulpa de fresa por ambos métodos	48
Cuadro 11. Tiempo de cizallamiento y viscosidad a las diferentes temperaturas de la pulpa de guayaba	51

Cuadro 12. Parámetros reológicos del modelo de Oswald-de Waele de la pulpa de guayaba a diferentes temperaturas para ambos métodos	55
Cuadro 13. Valores de diferencia mínima significativa (DMS) del índice de consistencia a las diferentes temperaturas para la pulpa de guayaba	57
Cuadro 14. Valores de diferencia mínima significativa (DMS) del índice de comportamiento al flujo a las diferentes temperaturas para la pulpa de guayaba.....	57
Cuadro 15. Viscosidad aparente evaluada a diferentes velocidades de cizalla (1, 10, 100, 200, 300, 400 y 500 s ⁻¹) y diferente temperatura (5, 15, 25, 35, 45, 55 y 65 °C) para la pulpa de guayaba por ambos métodos	58
Cuadro 16. Tiempo de cizallamiento y viscosidad a las diferentes temperaturas de la pulpa de mango.....	61
Cuadro 17. Parámetros reológicos del modelo Oswald-de Waele de la pulpa de mango a diferentes temperaturas para ambos métodos.....	65
Cuadro 18. Valores de diferencia mínima significativa (DMS) del índice de consistencia a las diferentes temperaturas para la pulpa de mango	67
Cuadro 19. Valores de diferencia mínima significativa (DMS) del índice de comportamiento al flujo a las diferentes temperaturas para la pulpa de mango.	67
Cuadro 20. Viscosidad aparente evaluada a diferentes velocidades de cizalla (1, 10, 100, 200, 300, 400 y 500 s ⁻¹) y diferente temperatura (5, 15, 25, 35, 45, 55 y 65 °C) de la pulpa de mango por ambos métodos	68
Cuadro 21. Parámetros del modelo de Arrhenius para evaluar el efecto de la temperatura en la viscosidad aparente de las pulpas comerciales a diferentes velocidades de cizalla.....	71

Cuadro 22. Valores de índice de consistencia y energía de activación en diferentes productos derivados de fruta	73
Cuadro 23. Parámetros del modelo de Arrhenius en las pulpas de fresa, guayaba y mango en condiciones de no equilibrio.....	76
Cuadro 24. Parámetros del modelo de Arrhenius en las pulpas de fresa, guayaba y mango en condiciones de equilibrio	76

ÍNDICE DE FIGURAS

	Página
Figura 1. (a) Esfuerzo normal, (b) esfuerzo de cizalla y (c) esfuerzo volumétrico en un sólido elástico	2
Figura 2. Esfuerzo típico sobre un material.....	3
Figura 3. Extensión lineal de una barra rectangular.....	5
Figura 4. Perfil de velocidad a través de una capa de fluido situada entre dos placas paralelas: inferior estática, superior en movimiento	6
Figura 5. Reogramas de fluidos independientes del tiempo.....	8
Figura 6. Clasificación simple del comportamiento reológico.....	8
Figura 7. Esfuerzo de cizalla en un fluido.....	9
Figura 8. Esfuerzo de cizalla en función de la velocidad de cizalla para fluidos tixotrópicos.....	17
Figura 9. Esfuerzo de cizalla en función de la velocidad de cizalla para fluidos antitixotrópicos.....	18
Figura 10. Energía de activación al flujo	26
Figura 11. Fotografía a nivel microscópico de partículas sin cizallar de la pulpa comercial de (a) fresa, (b) guayaba y (c) mango.....	36
Figura 12. Fotografía a nivel microscópico de partículas cizalladas de la pulpa de (a) fresa, (b) guayaba y (c) mango	36
Figura 13. Esfuerzo de cizalla en función de la velocidad de cizalla de pulpa de fresa a 5 °C (a) Método 1 (b) Método 2, cizalla constante (CC), curva de flujo de ascenso (CA) y curva de flujo de descenso (CD).	38
Figura 14. Viscosidad en función del tiempo de la pulpa de fresa del Método 1 (M1) y Método 2 (M2) (a) 5, 15, 25 °C (b) 35, 45 °C y (c) 55 y 65 °C	39

Figura 15. Esfuerzo de cizalla en función de la velocidad de cizalla de la pulpa de fresa (a) Método 1 y (b) Método 2	42
Figura 16. Viscosidad en función de la velocidad de cizalla de la pulpa de fresa (a) Método 1 y (b) Método 2.....	43
Figura 17. Esfuerzo de cizalla en función de la velocidad de cizalla de pulpa de guayaba a 5 °C (a) Método 1 (b) Método 2, cizalla constante (CC), curva de flujo de ascenso (CA) y curva de flujo de descenso (CD)	49
Figura 18. Viscosidad en función del tiempo de la pulpa de guayaba del Método 1 (M1) y Método 2 (M2) (a) 5, 15, 25 °C (b) 35, 45 °C y (c) 55 y 65 °C	50
Figura 19. Esfuerzo de cizalla en función de la velocidad de cizalla de la pulpa de guayaba (a) Método 1 y (b) Método 2	53
Figura 20. Viscosidad en función de la velocidad de cizalla de la pulpa de guayaba (a) Método 1 y (b) Método 2	54
Figura 21. Esfuerzo de cizalla en función de la velocidad de cizalla de pulpa de mango a 5 °C (a) Método 1 (b) Método 2, cizalla constante (CC), curva de flujo de ascenso (CA) y curva de flujo de descenso (CD).	59
Figura 22. Viscosidad en función del tiempo de la pulpa de mango del Método 1 (M1) y Método 2 (M2) (a) 5, 15, 25 °C (b) 35, 45 °C y (c) 55 y 65 °C	60
Figura 23. Esfuerzo de cizalla en función de la velocidad de cizalla de la pulpa de mango (a) Método 1 y (b) Método 2	63
Figura 24. Viscosidad en función de la velocidad de cizalla de la pulpa de mango (a) Método 1 y (b) Método 2.....	64
Figura 25. Logaritmo natural de la viscosidad aparente en función del inverso de la temperatura para la pulpa de fresa (a) Método 1 y (b) Método 2 a diferentes velocidades de cizalla.	70

Figura 26. Energía de activación en función de la velocidad de cizalla de la pulpa comercial de fresa (F), guayaba (G) y mango (M) para el Método 1 (M1) y Método 2 (M2)..... 74

NOMENCLATURA

Letras latinas

A	Área	(m ²)
°Bx	Grados Brix	
C.V.	Coefficiente de variación	(%)
E _a	Energía de activación	(kJ/gmol)
F	Fuerza	(N)
K	Índice de consistencia	(Pa.s ⁿ)
k _c	Índice de consistencia de Casson	(Pa.s ⁻¹) ^{1/2}
L, L ₁	Longitud	(m)
Ln	Logaritmo natural	
n	Índice de comportamiento al flujo	(Adimensional)
R	Constante universal de los gases	(KJ/Kg mol K)
r ²	Coefficiente de determinación	(Adimensional)
T	Temperatura	(K ó °C)
t	Tiempo	(s)
v	Velocidad	(m/s)
\bar{X}	Promedio	
X ₁ , X ₂ y X ₃	Vector unitario	

Letras griegas

$\dot{\gamma}$	Velocidad de cizalla	(s ⁻¹)
ε_c	Deformación de acuerdo a Cauchy	(Adimensional)
η_{ap}	Viscosidad aparente	(Pa.s)
η_p	Viscosidad plástica	(Pa.s)
η_∞	Viscosidad a una temperatura infinita	(Pa.s)
θ	Ángulo de deformación	(Adimensional)
μ	Viscosidad absoluta	(Pa.s)
$\sigma_{11}, \sigma_{22}, \sigma_{33}$	Esfuerzo normal	(Pa)
σ_s	Desviación estándar	(Adimensional)
σ	Esfuerzo de cizalla	(Pa)
σ_0	Esfuerzo de cizalla inicial	(Pa)
ΔL	Incremento de la longitud	(m)

RESUMEN

En el presente estudio se determinó la concentración de sólidos totales, sólidos solubles, pH y la dimensión mayor de partícula de tres pulpas comerciales de frutas: fresa, guayaba y mango, usando técnicas estandarizadas para su determinación. La pulpa de fresa presentó menor concentración de sólidos totales: 7.55 %, 7.48 °Bx, un pH de 2.37 y una dimensión mayor de partícula promedio de 14.19 μm . En la pulpa de guayaba la concentración de sólidos totales fue de 12.78 %, 10.40 °Bx, un pH de 2.42 y la dimensión mayor de partícula fue de 47.96 μm . La pulpa de mango presentó mayor concentración de sólidos totales siendo de 13.74 %, 13.48 °Bx, un pH de 2.42 y una dimensión mayor de partícula promedio de 8.88 μm .

A las pulpas de fresa, guayaba y mango también se les evaluó el efecto de la temperatura (5, 15, 25, 35, 45, 55 y 65 °C) en su comportamiento al flujo, utilizando un reómetro de cilindros concéntricos. Se usaron dos métodos de estudio: El primero constó de tres segmentos; un cizallamiento a velocidad constante (500 s^{-1}) y dos curvas de flujo en descenso y ascenso de velocidad de cizalla ($500 - 0.1 \text{ s}^{-1}$). El segundo método fue en cuatro segmentos; curva de flujo en ascenso de velocidad de cizalla ($0.1-500 \text{ s}^{-1}$), curva de cizallamiento a velocidad constante (500 s^{-1}) y dos curva de flujo en descenso y ascenso de velocidad de cizalla ($500 - 0.1 \text{ s}^{-1}$). Todas las muestras presentaron dependencia con el tiempo y después de aplicar un cizallamiento a velocidad constante en ambos métodos, las pulpas de frutas mostraron un comportamiento no-newtoniano tipo adelgazante a la cizalla donde el modelo reológico que mejor ajustó a los datos experimentales fue el de Oswald-de Waele. El efecto causado por la variación de la temperatura (5 a 65°C) sobre el índice de consistencia fue de 2.029 a 0.671 $\text{Pa}\cdot\text{s}^n$ para la pulpa de fresa, de 4.275 a 2.350 $\text{Pa}\cdot\text{s}^n$ para la pulpa de guayaba y de 2.348 a 1.095 $\text{Pa}\cdot\text{s}^n$ para la pulpa de mango. Y en el índice de comportamiento al flujo se obtuvo una variación de 0.462 a 0.518 en la pulpa de fresa, de 0.478 a 0.400 en la pulpa de guayaba y en la pulpa de mango de 0.445 a 0.464.

El efecto de la temperatura sobre la viscosidad aparente se evaluó a diferentes velocidades de cizalla (1, 10, 100, 200, 300, 400 y 500 s⁻¹) mediante el cálculo de la energía de activación al flujo. De acuerdo a los resultados obtenidos, en la pulpa de fresa la energía de activación disminuyó 12.2 a 8.6 kJ/gmol con el incremento de la velocidad de cizalla, al igual que la pulpa de mango de 9.7 a 7.2 kJ/gmol y en la pulpa de guayaba la energía de activación aumenta de 5.8 a 12.6 kJ/gmol con el incremento de velocidad de cizalla. Se obtuvieron los valores mayores de energía de activación en condiciones de viscosidad independiente al tiempo de cizallamiento para la pulpa de fresa y guayaba (11.3 y 12.1 kJ/gmol respectivamente), mientras que la pulpa de mango bajo estas condiciones presentó los menores valores de energía de activación (5.7 kJ/gmol).

INTRODUCCIÓN

Las pulpas de fruta son suspensiones donde la fase dispersa está compuesta por partículas sólidas de los tejidos de los frutos y la fase continua es una solución acuosa de ácidos orgánicos, azúcares, sales y pectinas solubles (Rao, 1987). En este tipo de sistemas el comportamiento reológico está influenciado principalmente por la composición química, la concentración de sólidos disueltos, el tamaño, la forma y el modo de interacción de las partículas suspendidas que componen la fase dispersa (Costell y Durán, 1982), estos factores influyen en el comportamiento no-newtoniano de las pulpas, es decir su viscosidad varía con el tiempo de cizalla, velocidad de cizalla y la temperatura. Las variaciones de temperatura en el comportamiento reológico, son importantes cuando estos productos son sometidos a diversos procesos, transporte y almacenamiento (Andrade y col., 2009). El efecto de la temperatura sobre los parámetros reológicos se ha relacionado con el cálculo de la energía de activación al flujo (Garza, 1999), la cual se define como la energía mínima para iniciar un determinado proceso en el flujo e indica la barrera de energía que debe ser superada antes de fluir (Rao, 1999). Los estudios del efecto de la temperatura se han realizado en otros productos como emulsiones (Dolz y col., 2004), pasta de jengibre (Ahmed, 2004) y extracto de semillas de berros (Karazhiyan y col., 2009) reportando valores de energía de activación a través del cálculo de la viscosidad aparente a una velocidad de cizalla de 50, 0.78 y 0.37 s⁻¹. Sin embargo en productos derivados de frutas como jugo de pera, pulpas de mango, zarzamora y níspero (Ibarz, 1989; Vidal y col., 2004; Haminiuk; y col., 2006 y Andrade y col., 2009) no se reporta la velocidad de cizalla a la cual fue calculada la viscosidad aparente. En estos estudios se demuestran que las pulpas presentan un comportamiento dependiente del tiempo tipo tixotrópico, en el cual la viscosidad disminuye con el tiempo a una velocidad de cizalla constante, debido a la asociación de agregados e interacciones de las partículas que conforman la fase

dispersa en la suspensión. Estos autores establecen que a temperaturas inferiores de 20 °C las partículas en la dispersión forman interacciones fuertes por el efecto de la temperatura, las cuales al ser cizalladas hacen que se prolongue el tiempo para alcanzar un valor de viscosidad aparente en el equilibrio. Con el incremento de la temperatura estas interacciones entre partículas se rompen debido a la transmisión de energía por cizalla, alcanzando un valor constante de viscosidad aparente en un tiempo menor de acuerdo al gradiente de velocidad de cizalla aplicado. Debido a que los productos derivados de fruta son sometidos a procesos de mezclado, agitación y bombeo, donde la velocidad de cizalla no permanece constante variando de 1 a 1000 s⁻¹ (Steffe, 1996), se provocan cambios de viscosidad aparente, haciendo necesario establecer modelos matemáticos que permitan inferir valores de viscosidad aparente a condiciones críticas. En la literatura no se tienen reportes que correlacionen los cambios de la velocidad de cizalla con los valores de la energía de activación, por ello el objetivo de este estudio es evaluar los parámetros reológicos en pulpas comerciales de frutas a diferentes temperaturas, correlacionando la energía de activación al flujo a diferentes velocidades de cizalla y con ello inferir el valor de la viscosidad aparente a diferentes condiciones de proceso en las que tengan variaciones de temperatura.

CAPÍTULO I

MARCO TEÓRICO

1 Reología

1.1 Conceptos básicos

El término reología fue sugerido en 1928 por Eugene C. Bingham, designando a una parte de la Física que estudia el flujo y la deformación de los materiales sometidos a la acción de fuerzas externas (Steffe, 1996).

La aplicación de la reología de acuerdo a Steffe (1996) es útil en numerosas áreas de la industria alimentaria, tales como:

- a. Cálculo en ingeniería de procesos incluyendo un rango de equipos como: tuberías, bombas, extrusores, mezcladores, homogeneizadores, intercambiadores de calor y viscosímetros de tubo en línea.
- b. Determinación de funcionalidad de ingredientes en desarrollo de nuevos productos.
- c. Control de calidad en productos intermedios y finales.
- d. Conocimiento de vida útil.
- e. Evaluación de textura de alimentos.

Para el estudio de la reología se debe de definir parámetros que son importantes y permiten el entendimiento de esta ciencia, los cuales son:

Esfuerzo

Se define como esfuerzo a la respuesta de un material ante la aplicación de una fuerza sobre una determinada área. Esto ocurre cuando al aplicar una fuerza sobre un cuerpo alteramos su estado de movimiento o reposo, provocando un desplazamiento, es decir, se habrá movido el cuerpo entre dos puntos en el espacio (Ibarz, 2005).

Físicamente el esfuerzo es definido como la fuerza ejercida (F) dividida por el área transversal (A) sobre la que la fuerza actúa:

$$\sigma = \frac{F}{A} \left[= \right] \frac{N}{m^2} \quad (1)$$

El esfuerzo sobre un material depende de la forma de aplicación de la fuerza, por lo que se definen a continuación los tipos de esfuerzos (Rao y Quintero, 2005):

- Esfuerzo normal: ocurre cuando la fuerza es aplicada perpendicularmente al área (Figura 1a).
- Esfuerzo de cizalla: si la fuerza se aplica paralela o tangencialmente al área, el esfuerzo se denomina esfuerzo tangencial o esfuerzo de cizalla (Figura 1b).
- Esfuerzo volumétrico: ocurre al alterar el volumen de un material mediante compresión de la misma intensidad en todas las direcciones (Figura 1c).

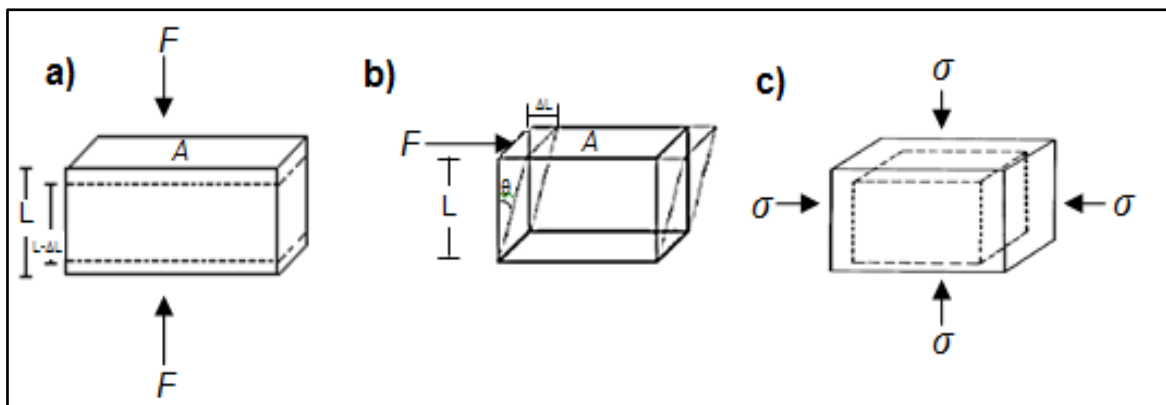


Figura 1. (a) Esfuerzo normal, (b) esfuerzo de cizalla y (c) esfuerzo volumétrico en un sólido elástico (Rao y Quintero, 2005).

En la Figura 2 se ejemplifica la aplicación de una fuerza (F) de modo que el cuerpo se deforma. Dónde para el punto definido por el vector unitario X_1 se busca la componente de la fuerza que actúa sobre el plano. Para cada esfuerzo de cizalla en las tres direcciones del espacio, los vectores unitarios son definidos por X_1 , X_2 y X_3 , de los cuales se pueden conseguir tres vectores de esfuerzos diferentes de acuerdo a la ecuación 1:

$$F = A\sigma = A_1\sigma_{11} + A_2\sigma_{22} + A_3\sigma_{33} \quad (2)$$

Para describir completamente el estado de esfuerzo en un material es necesario considerarlo en términos de coordenadas cartesianas como se observa en la Figura 2, el esfuerzo está indicado como σ_{11} , donde el primer subíndice representa la orientación de la cara sobre la cual actúa la fuerza y el segundo subíndice se refiere a la dirección de la fuerza. Por lo tanto σ_{11} , es el esfuerzo normal actuando en plano perpendicular a X_1 en la dirección de X_1 y σ_{23} es un esfuerzo de cizalla actuando en plano perpendicular a X_2 , en dirección de X_3 . Los esfuerzos normales son considerados positivos cuando actúan hacia fuera (actúan creando esfuerzo de tensión) y negativos cuando actúan adentro (actúan creando esfuerzos de compresión) (Steffe, 1996).

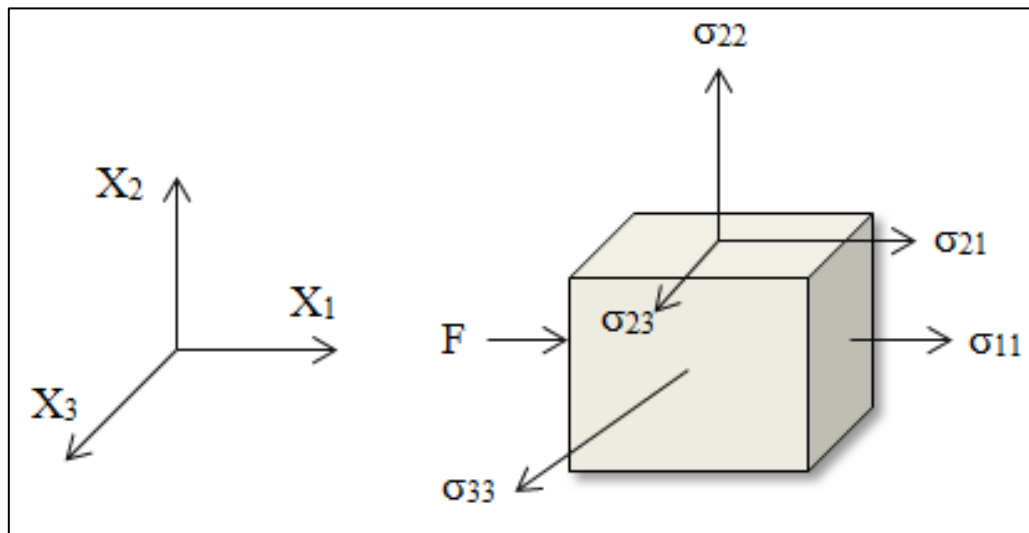


Figura 2. Esfuerzo típico sobre un material (Steffe, 1996).

Cada vector de esfuerzo puede a su vez descomponerse en dos componentes tangenciales a la superficie σ_{12} y σ_{13} , donde σ_{12} es colineal con el vector unitario X_2 y σ_{13} es colineal con el vector unitario X_3 . Se encuentra también una componente perpendicular a la superficie σ_{11} , colineal con el vector unitario X_1 . En tal sentido, el vector de esfuerzo σ_1 es:

$$\sigma_1 = \sigma_{11}X_1 + \sigma_{12}X_2 + \sigma_{13}X_3 \quad (3)$$

Los vectores σ_2 y σ_3 tienen a su vez tres componentes de esfuerzos, a partir de los cuales puede escribirse finalmente el tensor de esfuerzo en forma de matriz (Steffe, 1996):

$$\sigma_{ij} = \begin{bmatrix} \sigma_{11} & \sigma_{12} & \sigma_{13} \\ \sigma_{21} & \sigma_{22} & \sigma_{23} \\ \sigma_{31} & \sigma_{32} & \sigma_{33} \end{bmatrix} \quad (4)$$

El tensor de esfuerzos es simétrico y se supone que $\sigma_{ij} = \sigma_{ji}$. Por lo tanto, de los nueve componentes del tensor de esfuerzos sólo seis son independientes. Los esfuerzos tangenciales son aquellos en que los normales $i=j$. Los esfuerzos normales de tracción son positivos ($\sigma_{11} > 0$), mientras que los de compresión son negativos ($\sigma_{11} < 0$) (Ibarz, 2005).

Deformación

Se produce una deformación cuando un objeto es sometido a un esfuerzo, provocándolo en una o más de sus dimensiones, es decir que al aplicar una fuerza se cambia de forma y por lo tanto de su volumen (Steffe, 1996). Los cuerpos se deforman cuando se les somete a tensión: ejemplos típicos de deformación son el alargamiento y la compresión. Resulta útil considerar la “deformación relativa” o “deformación unitaria” que se define como el cambio de dimensión experimentada por cada unidad de ésta. Por ello que a cada deformación o esfuerzo le corresponde una deformación relativa, cuya magnitud depende del material considerado (Tanner, 1985).

De forma esquemática y representando a la deformación se presenta en la Figura 3 una barra rectangular, que debido a una fuerza de tensión es alargada, denominando al largo inicial de la barra como L y después del alargamiento como L_1 ; dónde ΔL representa el incremento de longitud (Steffe, 1996):

$$L_1 = L + \Delta L \quad (5)$$

Esta deformación es considerada en términos de deformación de acuerdo a Cauchy (citado en Steffe, 1996) como:

$$\varepsilon_c = \frac{\Delta L}{L} = \frac{L_1 - L}{L} = \frac{L}{L} = 1 \quad (6)$$

Donde ε_c es la deformación de acuerdo a Cauchy (Steffe, 1996).

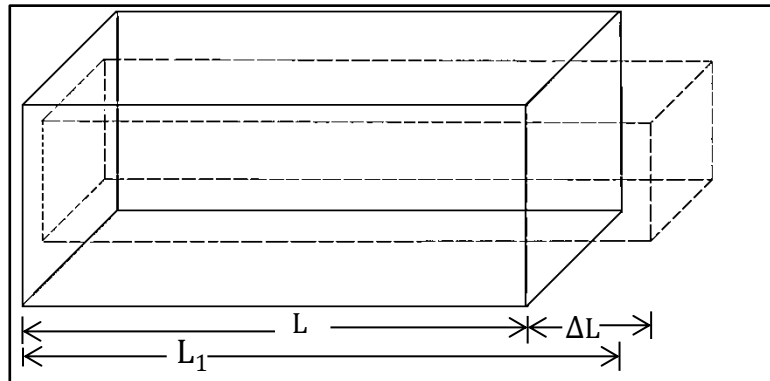


Figura 3. Extensión lineal de una barra rectangular (Steffe, 1996).

Velocidad de cizalla

En la Figura 4 se representa un sistema constituido por un fluido situado entre dos placas paralelas. La placa inferior permanece estacionaria, mientras que la superior se desplaza en la dirección x con una velocidad constante (v) debido a la aplicación de una fuerza constante.

El rozamiento entre el fluido y dicha superficie provoca un desplazamiento del mismo en la dirección x , generándose un perfil de velocidad en el seno del mismo: la capa longitudinal del fluido en contacto con la placa inferior ($y=0$) no se desplaza, mientras que la lámina de fluido en las proximidades de la placa superior ($y=\Delta$) se mueve con velocidad constante.

En el espacio comprendido entre ambas placas la velocidad de cada elemento de fluido (velocidad local) tendrá un valor intermedio entre 0 y v . Si el espaciado entre las placas (Δ) es suficientemente pequeño, el perfil de velocidad se puede considerar lineal. Además, si la velocidad v no es muy elevada, el fluido se desplazará en régimen laminar, sin que se produzca mezcla transversal de unas láminas de fluidos con otras (Aguado, 2003). Se ha encontrado experimentalmente que la velocidad del fluido es directamente proporcional a la magnitud de la fuerza aplicada sobre el fluido (F) y al área superficial de la lámina (A) y es inversamente proporcional a la separación entre las dos láminas (Δy) (Singh y Heldman, 1998).

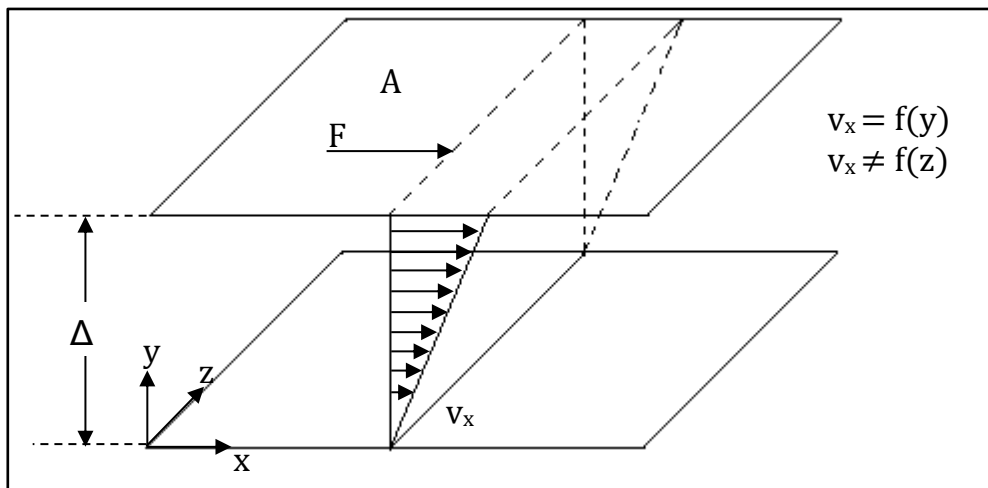


Figura 4. Perfil de velocidad a través de una capa de fluido situada entre dos placas paralelas: inferior estática, superior en movimiento (Aguado, 2003).

Entonces:

$$\sigma = \frac{F}{A} = -\mu \frac{\Delta v}{\Delta y} \quad (7)$$

Donde μ es una constante de proporcionalidad denominada viscosidad. El signo negativo indica que conforme aumenta la distancia disminuye la velocidad. Si en la ecuación Δy se aproxima a cero, entonces:

$$\sigma = \frac{F}{A} = - \mu \frac{dv}{dy} \quad (8)$$

El esfuerzo de cizalla se obtiene a partir de la relación $\frac{F}{A}$ (ec. 1), en la cual el término $\frac{dv}{dy}$ se denomina velocidad de cizalla. La velocidad de cizalla es igual a:

$$\frac{dy}{dt} = \frac{d\left(\frac{\Delta x}{\Delta y}\right)}{dt} = \left[d\left(\frac{\Delta x}{dt}\right) \left(\frac{1}{d\Delta y}\right) \right] = \frac{v}{\Delta y} \quad (9)$$

Sus unidades son s^{-1} , dadas por el cociente entre el cambio de velocidad v (m/s) y la distancia Δy (m) (Singh y Heldman, 1998). Se ha establecido un gradiente de velocidad dentro del fluido que es perpendicular a la dirección del flujo. El valor del gradiente dependerá de la viscosidad del fluido. Cuando los fluidos están siendo investigados o procesados, pueden verse sometidos a un amplio intervalo de velocidades de cizalla, esto es entre 10^{-6} y $10^7 s^{-1}$. Siendo de importancia en la industria alimentaria las referidas a extrusión, proceso de fluidos (flujos a través de tuberías), recubrimiento por inmersión, mezclado y homogeneizado, cuyas velocidades se encuentran en un intervalo de 1 a $1000 s^{-1}$ (Lewis, 1993; Steffe, 1996).

1.2 Clasificación reológica de los materiales

La clasificación reológica de los fluidos puede realizarse de manera gráfica por medio de los reogramas (Figura 5), obtenidos a través de instrumentos como viscosímetros y reómetros, los cuales permiten conocer de manera indirecta, variables como la velocidad y esfuerzo de cizalla; la relación entre éstas en cada uno de los materiales permite que sean clasificados dependiendo de sus propiedades reológicas. Sin embargo la identificación de cada modelo reológico depende de la condición de velocidad de cizalla y esfuerzo de cizalla empleado por cada instrumento.

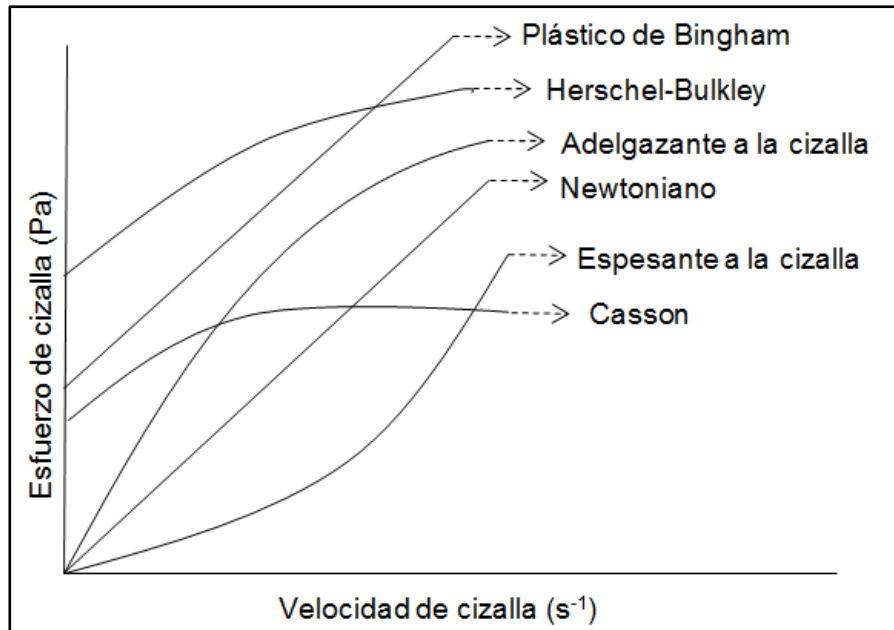


Figura 5. Reogramas de fluidos independientes del tiempo (Steffe, 1996).

En la Figura 6 se presenta de manera general la clasificación de los materiales propuesta por Steffe (1996). Para fines de este trabajo solo se describirán los materiales con un comportamiento viscoso.

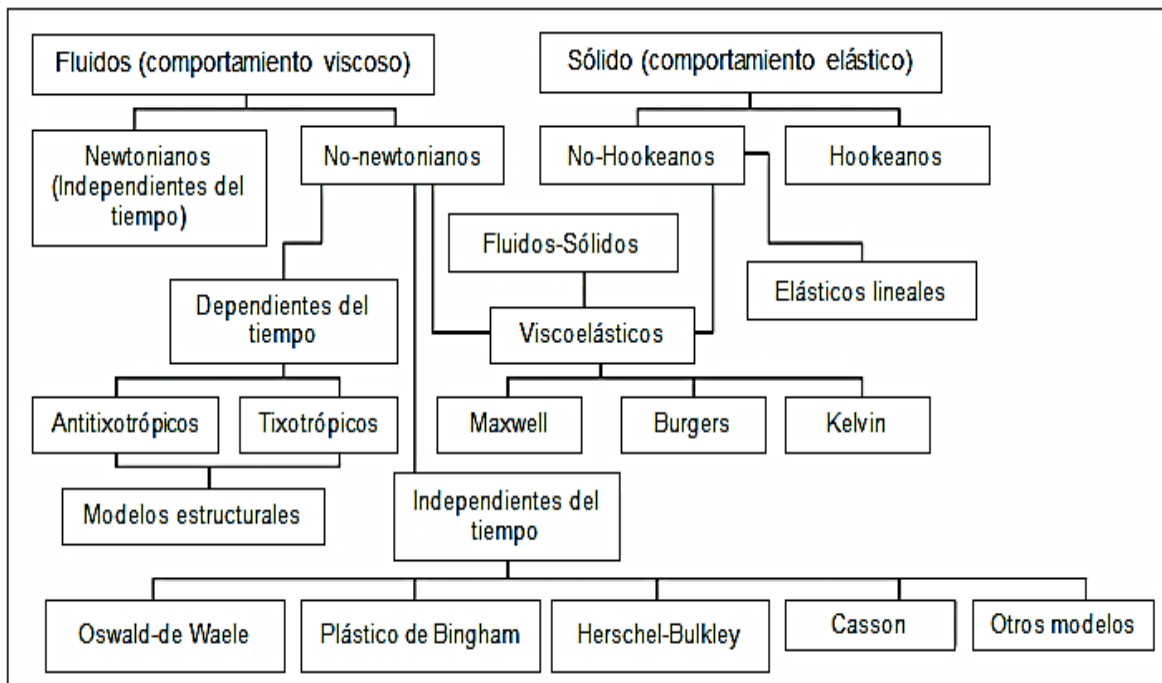


Figura 6. Clasificación simple del comportamiento reológico (Steffe, 1996).

1.2.1 Fluido newtoniano

Un fluido se define como una sustancia que cambia su forma continuamente siempre que esté sometida a un esfuerzo de cizalla (Figura 7). Un fluido está compuesto por moléculas con movimientos y colisiones constantes, las cuales pueden deslizarse unas respecto a otras desarrollando un desplazamiento definido. El término fluido incluye gases y líquidos, hay fluidos que fluyen lentamente que pueden ser considerados como sólidos los cuales cambian su forma de una manera caracterizada convenientemente por un ángulo de desplazamiento, en cambio si este fuera un elemento fluido no existiría este ángulo fijo ni aún para un esfuerzo de cizalla infinitesimal (Shames, 1995).

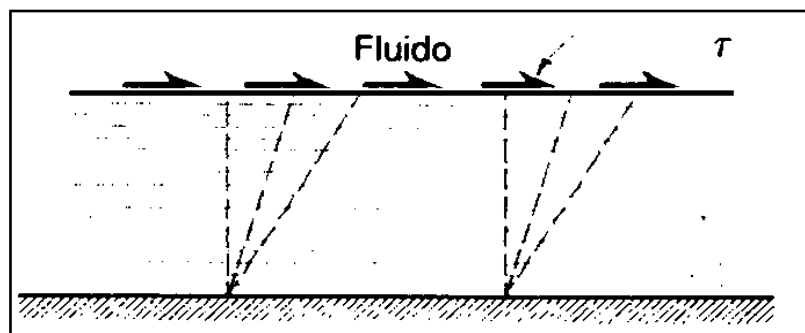


Figura 7. Esfuerzo de cizalla en un fluido (Shames, 1995).

Los fluidos que son descritos por el modelo propuesto por Newton son aquellos donde el esfuerzo de cizalla (σ) es directamente proporcional a la velocidad de cizalla ($\dot{\gamma}$) partiendo de esfuerzo de cizalla cero y velocidad de cizalla cero (Figura 5) (Aguado, 2003). Este tipo de fluido en condiciones de flujo estable, laminar, estacionario e incompresible, siguen la ley de la viscosidad propuesta por Newton expresada en la siguiente expresión matemática (Lewis, 1993):

$$\sigma = \mu \dot{\gamma} \quad (10)$$

En estos casos, la constante de proporcionalidad (μ) se denomina viscosidad absoluta o dinámica, la cual es definida como una propiedad física que mide la resistencia a la deformación del fluido que depende fundamentalmente de la naturaleza, estado físico y la temperatura del mismo (Ramírez, 2006).

Así, los fluidos descritos por este modelo tienen la propiedad de poseer una viscosidad dinámica independiente del movimiento al que está sometido el fluido (Bird y col., 1992).

Algunos alimentos que presentan este tipo de comportamiento son: Jugo clarificado de plátano a 20 °Bx (Khalil, 1989); jugo de manzana considerando una temperatura de 25 °C y 12.6 °Bx, presenta una viscosidad de 0.0163 Pa.s (Cepeda y Villarán, 1999); jugo de arándano y frambuesa con un valor de viscosidad de 0.024 a 0.099 Pa.s (Nindo y col., 2005); jugo de piña a una temperatura de 25 °C y de 4.3 a 14 °Bx, presenta una viscosidad de 0.037 a 0.0287 Pa.s (Shamsudin y col., 2007).

1.2.2 Fluido no-newtoniano

Los fluidos que no son descritos por el modelo propuesto por Newton, se denominan no-newtonianos, los cuales exhiben un flujo uniforme y cuya relación entre esfuerzo de cizalla y velocidad de cizalla no es lineal (Muller, 1988). Suelen ser líquidos de naturaleza polimérica o están constituidos por partículas sólidas en el seno de un líquido; se suelen producir cambios significativos en su microestructura, lo que a nivel microscópico se traduce en una variación de la viscosidad en función de la intensidad de la velocidad de cizalla aplicada. Por ello, en los fluidos que no son descritos por el modelo de Newton, la viscosidad se denomina viscosidad aparente (η_{ap}), la viscosidad aparente depende de la aplicación de la velocidad de cizalla y se refiere al cociente entre el esfuerzo de cizalla y la velocidad de cizalla (Aguado, 2003):

$$\eta_{ap} = \frac{\sigma}{\dot{\gamma}} \quad (11)$$

Los fluidos no-newtonianos se clasifican en fluidos independientes del tiempo y fluidos dependientes del tiempo:

1.2.2.1 Fluidos independientes del tiempo

En los fluidos independientes del tiempo su viscosidad no depende de la duración del tiempo de aplicación del esfuerzo de cizalla ya que los cambios que provoca esta última se desarrollan de forma prácticamente instantánea (Aguado, 2003), al igual que el esfuerzo de cizalla es una función que depende exclusivamente de la velocidad de cizalla y su relación no es lineal (Hermida, 2000).

Dentro de este tipo de fluidos se pueden clasificar dos grupos: los fluidos no plásticos, dentro de los cuales se encuentran los fluidos que son descritos por el modelo adelgazante y espesante a la cizalla. Y el otro grupo considerado como los fluidos plásticos en los que se encuentran los fluidos descritos por los modelos de Herschel-Bulkley, Casson y plástico de Bingham, que son aquellos que no fluyen hasta que son sometidos a un esfuerzo de cizalla inicial (Singh y Heldman, 1998).

Fluidos adelgazantes a la cizalla

En los fluidos que son descritos por el modelo adelgazante a la cizalla, la relación entre el esfuerzo de cizalla y la velocidad de cizalla se ajusta a una curva cóncava respecto del eje de las abscisas y que pasa por el origen de las ordenadas como se observa en la Figura 5. La viscosidad aparente disminuye al aumentar el esfuerzo o la velocidad de cizalla (Aguado, 2003).

De forma específica Rha (1998), describió que el comportamiento adelgazante se debe a:

1. Compuestos de alto peso molecular o partículas grandes con suficiente concentración.

2. Alta interacción entre las partículas, causando agregación o asociación por el enlazamiento secundario.
3. Variación en el tamaño y forma de las partículas, permitiendo la aglomeración.
4. La no rigidez o flexibilidad de las partículas las cuales pueden cambiar geoméricamente.
5. Fuerzas externas que provoca un descenso en la intensidad entre las fuerzas de cohesión de las moléculas o partículas, lo que facilita su orientación en la dirección del esfuerzo restante.
6. Los agregados de partículas se rompen liberando el líquido que tenían ocluido, disminuyendo la consistencia y, por lo tanto la resistencia al flujo.

En general, los purés de frutas son fluidos con comportamiento adelgazante a la cizalla y algunos estudios que han presentado dicho comportamiento han sido evaluados en: pulpas de durazno en un intervalo de temperatura de 30 a 65 °C y concentraciones de 12.5, 16, 24 °Bx (Muñoz y col., 2008), pulpas de guayaba evaluadas a temperatura ambiente a concentraciones de 9 y 10 °Bx (Andrade y col., 2009) y jugos de mango en un intervalo de temperatura de 20 a 70 °C y una concentración de 7.6, 11.7 y 16.36 °Bx (Dak y col., 2007).

Fluidos espesantes a la cizalla

Este tipo de comportamiento es poco frecuente en alimentos, el cual ocurre a elevadas velocidades de cizalla y se trata de un fenómeno opuesto al comportamiento adelgazante. En este tipo de fluidos la representación gráfica se ejemplifica en la Figura 5, la cual conduce a una curva convexa respecto al eje de abscisas que pasa por el origen de las ordenadas. Se caracterizan por que la viscosidad aumenta con la velocidad de cizalla (Aguado, 2003).

El fenómeno de espesamiento es el resultado de factores como: la concentración y la variación en la forma de las partículas, en el cuál estas partículas de diversos tamaños y formas, se encuentran acomodadas y empacadas herméticamente, de tal manera que el flujo comienza a ser más difícil cuando la presión incrementa. Al incrementar la velocidad de cizalla, ocurre un estiramiento de las partículas flexibles, incrementando el radio axial de las partículas y con ello provocando el fenómeno de espesamiento (Rha, 1998). De igual forma la aplicación del esfuerzo de cizalla, origina la expulsión del líquido situado entre las partículas sólidas, disminuyendo la lubricación y aumentando el rozamiento (Steffe, 1996).

Algunos sistemas alimenticios con comportamiento espesante a la cizalla son: soluciones de almidón de maíz y soluciones a una concentración de 45% de glucosa (Geankoplis, 1998).

Tanto los fluidos que son descritos con el modelo adelgazante a la cizalla como los espesantes a la cizalla se describen mediante la misma ecuación matemática, propuesta por Oswald-de Waele (Steffe, 1996):

$$\sigma = K\dot{\gamma}^n \quad (12)$$

Donde K recibe el nombre de índice de consistencia ($\text{Pa}\cdot\text{s}^n$) y n el índice de comportamiento al flujo (adimensional), el valor de este último parámetro determina el tipo de fluido: adelgazante cuando su valor es menor a 1 ó espesante cuando su valor es mayor a 1.

Fluidos plásticos

La plasticidad es un comportamiento que se caracteriza por la existencia de un esfuerzo de cizalla inicial (σ_0), el cual es definido como el mínimo esfuerzo de cizalla requerido para iniciar el flujo y no ocurre deformación permanente (Steffe, 1996). Esto no significa que el comportamiento sea elástico por encima del esfuerzo de cizalla sino que, después del descenso, el cuerpo vuelve a tomar progresiva e íntegramente su forma inicial (Roudot, 2004).

Modelo plástico de Bingham

El modelo plástico de Bingham describe el comportamiento de los fluidos plásticos ideales. En este tipo de fluido se necesita de un esfuerzo de cizalla inicial mínimo (σ_0) que provoque el flujo, una vez que el esfuerzo de cizalla excede el valor crítico, la variación de esfuerzo de cizalla en función de la velocidad de cizalla es lineal al igual que en los fluidos newtonianos. La curva reológica de los fluidos plásticos de Bingham es una recta que no pasa por el origen de coordenadas como se observa en la Figura 5, donde su viscosidad plástica es una constante en relación del esfuerzo de cizalla y velocidad de cizalla (Aguado, 2003).

El comportamiento tipo plástico de Bingham se caracteriza porque a valores de esfuerzo inferiores al esfuerzo de cizalla inicial del material tiene inicialmente una estructura tridimensional con la suficiente rigidez como para soportar el esfuerzo sin fluir; al alcanzar el valor de esfuerzo de cizalla inicial se presenta un flujo con una relación de esfuerzo de cizalla y velocidad de cizalla similar a las de los fluidos newtonianos, lo cual indica una viscosidad plástica constante (Hermida, 2000).

El modelo matemático de este tipo de fluido se expresa como:

$$\sigma = \sigma_0 + \eta_p \dot{\gamma} \quad (13)$$

Donde a la constante η_p se le denomina viscosidad plástica y σ_0 el esfuerzo de cizalla inicial (Steffe, 1996).

Modelo de Herschel-Bulkley

Herschel y Bulkley propusieron en 1926 ampliar la ecuación potencial para aquellos fluidos que presentaban este mismo comportamiento a diferencia que necesitaban de un esfuerzo de cizalla inicial (Figura 5), una vez iniciado el flujo el fluido se describe por el modelo de Oswald-de Waele.

El modelo matemático propuesto para fluidos con este comportamiento es:

$$\sigma = K\dot{\gamma}^n + \sigma_0 \quad (14)$$

Donde K es el índice de consistencia ($\text{Pa}\cdot\text{s}^n$), n es el índice de comportamiento al flujo y σ_0 es el esfuerzo de cizalla inicial (Pa). Algunos sistemas alimenticios que presentan este tipo de comportamiento son: pulpa de ciruela en un intervalo de 0 a 80 °C (Augusto, 2011), puré de durazno a 25 °C y concentraciones de 12 y 21 °Bx (Massa y col., 2010) y pulpa de mango evaluada a 20 °C y 25 °Bx (Ahmed y col., 2005).

Modelo de Casson

Propuesto por Casson en 1959, explica la no existencia de proporcionalidad entre el esfuerzo de cizalla y la velocidad de cizalla una vez que el fluido rebasa el umbral de esfuerzo de cizalla inicial, hasta que no alcanza dicho esfuerzo de cizallamiento, la estructura no es destruida, sino solamente deformada elásticamente debido a la presencia de moléculas asimétricas o cadenas moleculares en una fase líquida (Aguado, 2003). Antes de la superación del esfuerzo de cizalla inicial, se produce un flujo plástico con una creciente modificación de la estructura o destrucción de la misma (Tscheuschner, 2001).

Para este tipo de fluido se establece el siguiente modelo matemático (Steffe, 1996):

$$\sqrt{\sigma} = \sqrt{\sigma_0} + k_c \sqrt{\dot{\gamma}} \quad (15)$$

Donde k_c es considerado como el índice de consistencia de Casson. Ejemplos de este tipo de fluido son margarinas, mantequillas, grasas y chocolate fundido a temperaturas superiores a 40 °C (Hermida, 2000).

1.2.2.2 Fluidos dependientes del tiempo

En los fluidos dependientes del tiempo los parámetros reológicos y la viscosidad aparente varía a medida que transcurre el tiempo respecto al momento en el que se inició la aplicación de la velocidad de cizalla. Ello se debe a que los cambios provocados en la microestructura del fluido no son instantáneos, sino que se producen paulatinamente a lo largo del tiempo. Como consecuencia, el valor de la viscosidad aparente en un momento dado depende de la historia reológica del fluido. Se clasifican en fluidos tixotrópicos y antitixotrópicos dependiendo de que la viscosidad aparente disminuya o aumente con el tiempo, respectivamente (Roudot, 2004).

Fluidos con comportamiento tixotrópico

Los fluidos tixotrópicos se caracterizan por un cambio de estructura interna al aplicar un esfuerzo de cizalla o velocidad de cizalla (Ramírez, 2006), así como de un adelgazamiento dependiente del tiempo. La representación gráfica correspondiente es una curva similar a un comportamiento del modelo adelgazante a la cizalla (Figura 8) donde la viscosidad desciende a medida que aumenta la velocidad de cizalla, sin embargo la viscosidad no sólo está relacionada con la velocidad de cizalla, sino también con el tiempo de cizallamiento (Muller, 1988).

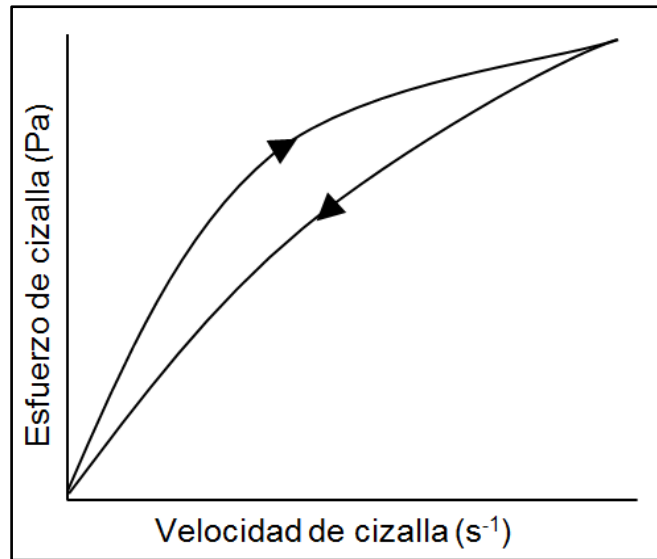


Figura 8. Esfuerzo de cizalla en función de la velocidad de cizalla para fluidos tixotrópicos.

El comportamiento tixotrópico se describe como un fenómeno reversible, es decir una vez dejado en reposo el material, su estructura se reconstituye gradualmente, la velocidad de destrucción prevalece sobre la regeneración con el aumento de la velocidad de cizalla y del tiempo, por lo que la viscosidad disminuye con éstos. La viscosidad dependerá simultáneamente de la velocidad de cizalla y del tiempo de cizallamiento, así como de la historia reológica (Hermida, 2000).

Si el fluido está compuesto por cadenas de polímeros, puede suponerse que la orientación a lo largo de las líneas de flujo es el primer responsable del cambio en la viscosidad; es decir, que la velocidad de cizalla puede desenrollar y alargar las cadenas, haciendo que se coloquen paralelamente a las líneas de dirección de flujo y así se ofrece una menor resistencia (Ramírez, 2006).

Para diferenciar de forma sencilla un fluido que es descrito por el modelo tixotrópico de un antitixotrópico, se aumenta la velocidad de cizalla hasta un determinado valor y luego se disminuye hasta el reposo observando un fenómeno de histéresis. La histéresis se forma debido a un fenómeno de reorganización estructural a determinado tiempo en respuesta o adaptación a un cambio en el flujo, dando como resultado que las curvas de ascenso y descenso no coincidan

(Barnes, 1997). Ejemplos típicos de fluidos tixotrópicos son: el yogurt y la salsa de tomate (Ramírez, 2006).

Fluidos con comportamiento antitixotrópico

Los fluidos antitixotrópicos, en cambio, se caracterizan por tener un comportamiento contrario a los tixotrópicos (Figura 9), es decir, que su viscosidad aumenta con el tiempo y con la velocidad de cizalla aplicada. Esto es debido a que si se aplica una fuerza se produce una formación de enlaces intermoleculares conllevando un aumento de la viscosidad, mientras que si cesa ésta se produce una destrucción de los enlaces dando lugar a una disminución de la viscosidad. En este comportamiento se establece un estado estructural reversible por el aumento del esfuerzo de cizalla por encima del correspondiente estado de inicio, la estructura temporal de estos materiales se reorganiza con la deformación presentando mayor resistencia a medida que aumenta y volviendo a reorganizarse cuando se deja en reposo (Hermida, 2000). En sistemas alimenticios no se ha reportado comportamiento de tipo antitixotrópico, sin embargo se ha descrito en: yeso y arcilla bentonítica (Ramírez, 2006).

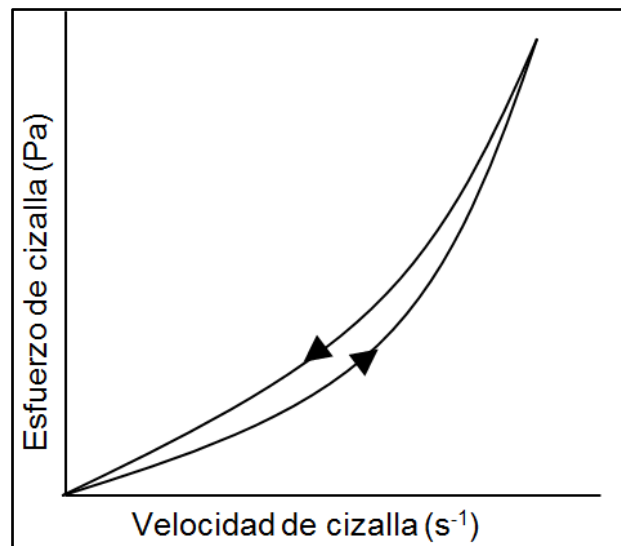


Figura 9. Esfuerzo de cizalla en función de la velocidad de cizalla para fluidos antitixotrópicos.

1.3 Efecto de la temperatura en el comportamiento al flujo

Los alimentos fluidos durante todo su proceso de elaboración (evaporación, esterilización y pasteurización), su almacenamiento, transporte, venta y consumo, están sujetos a variaciones continuas de temperatura. Es por ello, que resulta importante conocer las propiedades reológicas de los productos en función de la temperatura (Tung y Paulson, 1995; Garza, 1999; Ibarz, 2005).

En general en la mayoría de las suspensiones y emulsiones alimenticias se observa una disminución de la viscosidad con el incremento de la temperatura. En términos generales cuanto mayor sea el valor de la viscosidad, más se puede ver afectada por la temperatura debido a que la temperatura aumenta el grado de movimiento molecular, por lo tanto la viscosidad del fluido disminuye (Alvarado, 2001; Aguado, 2003).

La temperatura puede afectar los diferentes parámetros reológicos, como son el índice de consistencia, índice de comportamiento al flujo y esfuerzo de cizalla inicial. Generalmente el efecto que se observa es el siguiente (Ibarz, 2005):

- El índice de consistencia disminuyen cuando aumenta la temperatura.
- El índice de comportamiento al flujo no suele verse afectado por las variaciones de temperatura. Sin embargo en algún caso se ha observado que un aumento de la temperatura puede hacer aumentar el índice de comportamiento al flujo, pasando de un comportamiento adelgazante a la cizalla a tener un comportamiento newtoniano.
- El esfuerzo de cizalla inicial también puede variar con la temperatura, de tal modo que al aumentar la temperatura disminuye su valor. Así, ésta variación del valor de esfuerzo de cizalla inicial puede provocar un cambio en el comportamiento de procesados de frutas, pasando de ser plástico de Bingham a newtoniano.

El efecto de la temperatura sobre el comportamiento reológico ha sido estudiado principalmente en productos derivados de frutas, ya que se tiene una gran importancia en la industria del procesado de frutas al ser la base de numerosos productos finales y en la mayoría de los casos no tener un comportamiento newtoniano debido a las interacciones entre su componentes como lo son: azúcares solubles simples, pectinas y partículas en suspensión (Haminiuk y col., 2006); al igual que de ello depende el desarrollo de aplicaciones tecnológicas, sensoriales y de ingeniería, como por ejemplo, proyectos de bombas, tuberías, intercambiadores de calor y tanques de mezclado y homogeneizado (Torrales y col., 2006). Estos estudios son considerados como una herramienta analítica para proveer información fundamental de la estructura de los alimentos y juega un papel importante en la transferencia de calor de fluidos (Ahmed, 2004).

2 Pulpa de fruta

Se conoce como pulpa de fruta al producto no fermentado pero fermentable, obtenido mediante la desintegración y el tamizado de la parte comestible de frutas frescas, o preservadas, sanas y limpias, sin remover el jugo (Gaetano, 1991)

Fisicoquímicamente la pulpa de fruta se define como una suspensión donde la fase dispersa está compuesta por partículas sólidas de los tejidos de los frutos y la fase continua es una solución acuosa de ácidos orgánicos, azúcares, sales y pectinas solubles (Costell y Durán, 1982).

Como características generales, las pulpas de frutas no deben de contener menos de 30% de fruta en relación de masa/masa (Camacho, 2010).

2.1 Composición química

El Cuadro 1 presenta de forma específica la composición química de la fresa, guayaba y mango como fruto (Stanford, 2003; Gélvez, 1998), identificando que la mayor concentración de carbohidratos simples se encuentra en el mango, así como el mayor contenido de agua lo presenta la fresa.

Los carbohidratos son el segundo componente mayoritario después del agua y está constituido fundamentalmente por hexosas fácilmente metabolizables (glucosa, fructosa), pentosas y pectinas. Los principales monosacáridos son glucosa y fructosa. El contenido mayor de carbohidratos totales se encuentra en la guayaba.

Cuadro 1. Composición química de fresa, guayaba y mango.

Componente (%)	Fresa	Guayaba	Mango
Agua	89.68	78.65	82.07
Carbohidratos totales	8.02	18.8	15.92
Proteína	0.7	0.8	0.7
Lípidos	0.5	0.6	0.4
Cenizas	0.5	0.4	0.7
Minerales	0.07	0.34	0.03
Vitaminas	0.1	0.34	0.05
Ácido ascórbico	0.08	0.02	0.04
Acido málico	0.33	0.04	0
Acido acético	0.02	0	0
Ácido cítrico	0	0.01	0.09
Fibra*	2.25	6.92	1.04
Fructosa**	3.43	4.75	6.1
Glucosa**	2.08	4.9	5.9
Sacarosa**	0.26	2.5	2.88

*Fibra alimentaria: Lignina, celulosa, polisacáridos no celulósicos solubles e insolubles.

**Carbohidratos específicos que conforman a los carbohidratos totales.

En las pulpas provenientes de frutas, los sólidos en suspensión constituyen parte de la pulpa, que está formada principalmente por tejido desintegrado, que contiene fibra celulósica, pectinas y partículas lipoides los cuales a su vez contienen carotenoides y aceites esenciales. Una porción de pectinas se encuentra disuelta en el jugo, la cual contribuye a la viscosidad y consistencia del mismo. La pectina total de los productos a base de frutas está formada por tres fracciones: la pectina soluble en agua (pectina de alto metoxilo), la pectina hidrolizada (pectina de bajo metoxilo) y la protopectina o pectina unida a la celulosa en forma insoluble (Primo, 1999).

Sin embargo no solo la pectina determina el comportamiento reológico de los productos viscosos o de gelificación débil como: los néctares, mermeladas, jaleas y pulpas de fruta, otro factor importante son los componentes solubles e insolubles, en términos de sus tamaños moleculares o bien de sus partículas y su proporción, presentes de forma natural (Qiu y Rao, 1998).

Las pulpas de frutas contienen nitrógeno, pero en niveles muy bajos y aproximadamente alrededor del 60% se encuentra en forma de aminoácidos libres que contribuyen a la acidez, donde el porcentaje mayor de ácidos orgánicos disponibles se encuentra en la fresa como es mostrado en el Cuadro 1. La proporción entre los ácidos y azúcares son los que atribuyen a las pulpas de fruta, su sabor característico, además de ser un indicador organoléptico. Durante el procesamiento en la obtención de pulpa, la fruta se degrada y con ella los ácidos presentes; ácido cítrico (frutas cítricas), ácido málico (manzanas) y ácido tartárico (uvas). Las pulpas de frutas a base de frutas maduras tienen niveles muy bajos de aminoácidos y, por ende, carecen de su sabor característico (Camacho, 2010).

A continuación son definidas las características principales de las pulpas de frutas.

2.2 Propiedades fisicoquímicas

Sólidos solubles

Un grado Brix (°Bx) expresa el porcentaje en peso de sólidos o el total de sólidos contenidos en una solución de sacarosa pura, se acostumbra para denominar a la densidad de una solución de sacarosa al 1 % (peso/volumen) medida a 20 °C (Ibarz y Barbosa-Cánovas, 2000). En productos derivados de frutas, no solamente están constituidos por sacarosa, si no por una mezcla de otros azúcares (glucosa, fructosa, etc.), ácidos y sales, los cuales influyen en la refracción de la luz. Sin embargo, el índice de refracción y los grados Brix son suficientes para determinar el contenido de sólidos solubles en cada producto (Gaetano, 1991).

Comercialmente los grados Brix son por lo tanto, un índice aproximado de la concentración de sólidos solubles, que se aceptan como si todos los sólidos disueltos en el producto fueran sacarosa (Ibarz y Barbosa-Cánovas, 2000).

pH

El pH de un alimento es uno de los principales factores que determinan la supervivencia y el crecimiento de los microorganismos durante el proceso, el almacenaje y la distribución, así como indica una medida de la acidez o basicidad de una solución y se refiere a la concentración de iones o cationes hidrógeno $[H^+]$ presentes en determinada sustancia (Camacho, 2010). Las frutas, que son la materia fundamental para la elaboración de los jugos, mermeladas y diversos productos a base de frutas, tienen normalmente valores de pH ácidos, comprendidos entre 2.0 y 4.5 debido a su diferencia en contenido en ácidos orgánicos (Sand, 1996).

Zemel y col., (1990) afirman que existe una correlación entre el pH y la estabilidad de productos a base de frutas, ya que esta propiedad tiene una influencia significativa sobre el crecimiento microbiano limitando el posible desarrollo de numerosos microorganismos patógenos y la degradación de los componentes de estos productos, alterando con ello características de calidad.

2.3 Efecto de la temperatura en productos derivados de frutas

Estudios desarrollados por Haminiuk y col., (2006) y Garza (1999) en pulpa de zarzamora y pulpa de melocotón respectivamente, han reportado que ocurren cambios significativos en la disminución de la viscosidad para temperaturas superiores a 40°C, lo cual se explica por el aumento de la movilidad y consecuente interacción entre las fibras suspendidas. Estudios de Dak y col., (2006; 2007); en pulpa de mango, reportan una disminución del índice de consistencia en forma proporcional con aumento de la temperatura. Mientras que Andrade y col., (2009); indican que en la pulpa de guayaba, el índice de comportamiento al flujo no presenta una tendencia definida en un intervalo de 10 a 40 °C, sin embargo a temperaturas superiores se presenta un aumento en el índice, lo que hace que el fluido pierda su carácter adelgazante.

Se ha comprobado que la disminución de la viscosidad en suspensiones puede deberse a dos efectos (Laurencio y Delgado, 2009):

- a) Disminución de interacciones en el medio dispersante.
- b) Debilitamiento de las estructuras formadas por las partículas al aumentar la temperatura.

Relacionado con el caso b, el efecto de la temperatura en la viscosidad se relaciona con una ecuación de tipo Arrhenius:

$$\eta = f(T) = \eta_{\infty} \exp \left[\frac{E_a}{RT} \right] \quad (16)$$

Donde E_a es la energía de activación [kJ/gmol], T es la temperatura [K], R la constante universal de los gases (8.3143 kJ/mol kg K) y η_{∞} es considerada como la viscosidad a una temperatura infinita (Pa.s) (Chang y Hartel, 1997).

3 Energía de activación

El concepto de la energía de activación al flujo fue introducido por Eyring en 1936 (citado en Salomón, 2001); considerando que en el estado líquido la estructura de la materia es similar a un estado sólido con la diferencia en la densidad, la cual es aproximadamente un 10% menor y que existe suficiente espacio libre para el movimiento de moléculas, permitiendo de este modo la deformación como consecuencia de la aplicación de un esfuerzo (Ortega, 2009). Si no existiera energía de activación al flujo cada molécula se movería de un lugar al espacio vacío contiguo con una frecuencia de vibración determinada por la temperatura. Pero ocurre que las moléculas contiguas se oponen al movimiento debido a su interacción con la molécula en cuestión. Suponiendo que las moléculas pasan de una posición de equilibrio (reposo) a otra cuando es cizallada (Figura 10) y para que esto ocurra es necesario superar cierta barrera de energía (energía de activación) para provocar el flujo que es característica para cada sistema. (Rao, 1999; Goodwin y Hughes, 2000).

La teoría de Eyring parte de la base que las moléculas del fluido están en constante movimiento. Este movimiento está limitado a la vibración debido al compacto empaquetado de una molécula del fluido dentro de los límites de las moléculas adyacentes como se observa en la Figura 10. Una molécula se mueve cuando escapa a un espacio vacío contiguo, para ello se debe vencer una barrera potencial de energía.

La teoría cinética de Eyring permite estimar la viscosidad a partir de otras propiedades físicas o dar cuenta de la posible configuración estructural de un fluido si se conoce su comportamiento reológico, para ello, esta teoría incluye términos como: el trabajo de arrastre de las gotas, la energía superficial, la energía de deformación y el trabajo que hacen las fuerzas de repulsión de las moléculas adsorbidas (Dolz y col., 2004).

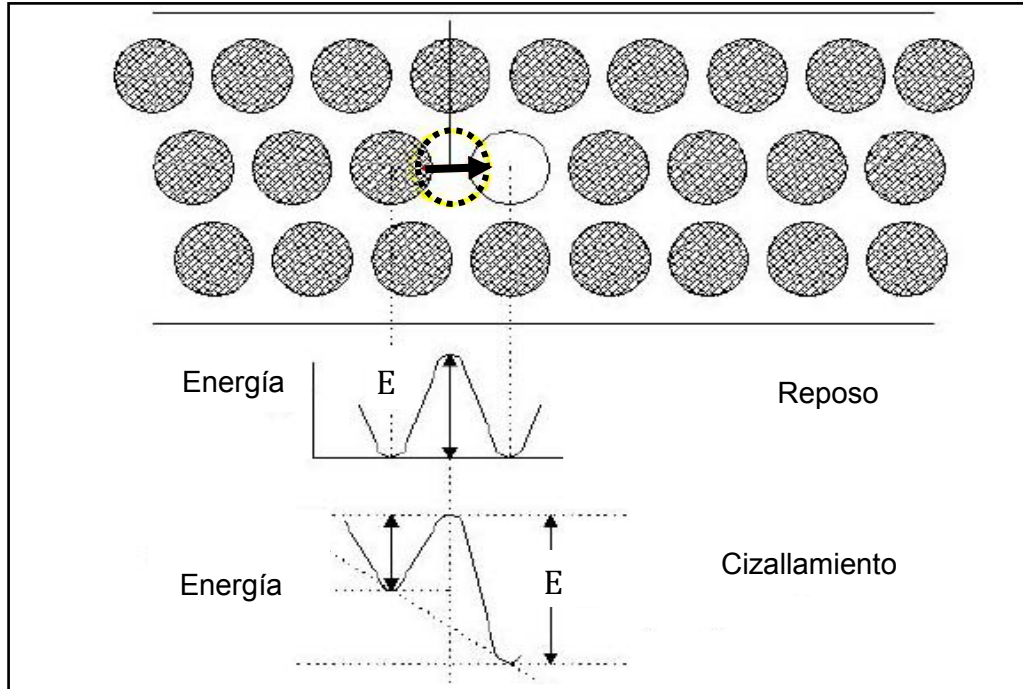


Figura 10. Energía de activación al flujo (Goodwin y Hughes, 2000).

En el Cuadro 2 se presentan los productos derivados de fruta en los cuales se han determinado los valores de energía de activación, estos productos han sido evaluados a temperaturas que van desde los 4 hasta 70 °C, reportando de manera general un intervalo de viscosidad de 0.003 a 3.3 Pa.s y energía de activación en el intervalo de 15.6 a 78.1 kJ/gmol.

Cuadro 2. Valores de viscosidad aparente y energía de activación en diferentes productos derivados de fruta.

Producto	°Bx	Intervalo de T (°C)	Intervalo de viscosidad (Pa.s)	$\dot{\gamma}$ (s ⁻¹)	Ea (kJ/gmol)	Referencia
Concentrado de naranja	65	19 a 30	3E-03-15E-03	---*	42.7-51.5	Vitali y Rao, 1984
Jugo de grosella	35-64	4 a 50	0.03-0.58	---*	45.8	Ibarz y col., 1988
Jugo de manzana	40-70	25 a 60	3E-03-3.30	---*	26.6-64.8	Cepeda y Villarán, 1999
Extracto de semilla de berros	38.9	10 a 70	0.10-0.75	0.78	15.6	Karazhiyan y col., 2009
Pasta de jengibre	70	25 a 65	0.79-1.46	0.37	34.4-46.2	Ahmed, 2004
Jugo de plátano	20-79	30 a 70	1.00-2.71	---*	25.1-78.1	Khalil, 1992
Jugo de grosellas	35-64	5 a 60	7E-03-1.65	---*	19.1-44.3	Ibarz y col., 1992

* Valor no reportado

Como se puede observar en el Cuadro 2, en su mayoría los estudios de productos derivados de fruta no reportan la velocidad de cizalla a la que se realizan las pruebas, siendo una variable de importancia en procesos como; mezclado, agitación y bombeo, ya que no permanece constante variando de 1 a 1000 s⁻¹ (Steffe, 1996) y con ellos se provoca cambios estructurales en la viscosidad, haciendo necesario establecer modelos matemáticos que permitan inferir valores de viscosidad en condiciones críticas de proceso.

CAPÍTULO II

METODOLOGÍA EXPERIMENTAL

2.1 OBJETIVOS

Objetivo general. Evaluar los parámetros reológicos (viscosidad aparente) de tres pulpas comerciales de frutas (fresa, guayaba y mango) a diferentes temperaturas, mediante cizalla rotacional estableciendo la correlación de la energía de activación al flujo con la velocidad de cizalla.

Objetivo particular 1. Determinar las propiedades fisicoquímicas, concentración de sólidos totales y dimensión mayor de partícula de las pulpas comerciales de frutas mediante técnicas estandarizadas para su caracterización.

Objetivo particular 2. Determinar los parámetros reológicos de pulpas comerciales de frutas a diferentes temperaturas (5, 15, 25, 35, 45, 55 y 65 °C), mediante cizalla rotacional para el cálculo de la viscosidad aparente y la energía de activación al flujo.

Objetivo particular 3. Establecer la correlación entre la energía de activación al flujo y la velocidad de cizalla en base al estudio reológico desarrollado para inferir el valor de la viscosidad aparente a diferentes condiciones de operación.

2.2 DESARROLLO EXPERIMENTAL

2.2.1 Materiales

Se utilizaron pulpas marca F-Diaz de México S.A. de C.V. de sabor fresa, guayaba y mango; la composición especificada en la etiqueta fue: pulpa (de acuerdo a la fruta), agua, ácido cítrico, benzoato de sodio, sorbato de potasio. Para evitar variaciones en los resultados se utilizaron muestras de un mismo lote.

En el Cuadro 3 se presenta la composición química reportada en la etiqueta de la pulpa de fresa, guayaba y mango de la marca comercial F-Diaz:

Cuadro 3. Composición química de pulpas comerciales de fresa, guayaba y mango.

Componente (%)	Fresa	Guayaba	Mango
Agua	91.83	91.03	90.70
Carbohidratos	7.60	8.20	8.40
Proteína	0.50	0.64	0.76
Vitaminas	0.06	0.12	0.11
Minerales	0.01	0.01	0.02

2.2.2 Métodos

2.2.2.1 Preparación de la muestra

Las muestras de pulpa de fruta se tomaron directamente del envase y se colocaron en vasos de precipitados para acondicionarlas a la temperatura de medición, en el caso de temperaturas bajas (5 y 15 °C) éstas fueron refrigeradas y para las temperaturas superiores a 25 °C, las muestras se colocaron en un baño térmico marca Grant.

2.2.2.2 Determinación de sólidos totales

Los sólidos totales se determinaron en una termobalanza marca Ohaus modelo MB45, la cual funciona en base del principio termogravimétrico. Para la determinación se pesaron 1.5 g de muestra dentro de la termobalanza. El equipo

se programó calentando a una temperatura de 75 °C por medio de una unidad desecadora y evaporando la humedad de la muestra por un tiempo aproximado a 1 minuto, reportando el valor de sólidos secos totales (Brand-Design, 2011). Se realizaron tres repeticiones para cada una de las pulpas.

2.2.2.3 Determinación de propiedades fisicoquímicas

Determinación de sólidos solubles (grados Brix)

Para la medición de grados Brix (°Bx) se utilizó un refractómetro Abbé modelo 16571 marca Erma Tokio. Dicha medición se basa en el ángulo de incidencia de un rayo luminoso sobre una muestra midiendo el cambio de dirección que se produce cuando el rayo de luz pasa de forma oblicua desde un medio a otro con diferente densidad. La presencia de compuestos sólidos disueltos en la muestra determina un cambio en el índice de refracción del solvente. Por ello es posible determinar la cantidad de soluto disuelto midiendo el índice de refracción de la solución acuosa que se investiga (Bertoumeo y García, 2009). La técnica empleada para la determinación de sólidos solubles, se realizó de acuerdo al método 22.024 de la AOAC (1984) para frutas y productos derivados de frutas, realizando cinco repeticiones para cada pulpa.

Determinación de pH.

El pH fue medido utilizando un Potenciómetro Testr 3 Oakton® combinado con un electrodo referencia de vidrio. Este instrumento se basa en la medida electrométrica de la actividad de los iones hidrógeno en una solución acuosa en la cual se genera una diferencia de potencial en el electrodo de medida con respecto al de referencia (Sawyer y McCarty, 1996).

El potenciómetro fue calibrado antes de cada media con una solución buffer de pH = 7 y buffer de pH = 4. El procedimiento usado para la determinación de pH se realizó de acuerdo al método 32.012 de la AOAC (1984); realizando cinco repeticiones para cada muestra.

2.2.2.4 Medición del tamaño de partícula

La medición del tamaño de partícula se realizó en un microscopio óptico marca Olympus modelo PL-A642 y objetivo de 10x, el cual permite obtener una imagen aumentada de un objeto y funciona mediante la refracción de la luz. La medición fue determinada en dos tiempos: donde la primera se realizó directamente del envase observando 10 campos de enfoque, obteniendo la medida de 70 partículas para cada una de las pulpas, mientras que la segunda determinación fue obtenida a partir de un tratamiento a cada pulpa, el cual consistió en un cizallamiento constante de 500 s^{-1} , durante un tiempo de 1110 segundos, tiempo en el que se obtuvieron valores de viscosidad aparente al equilibrio para una temperatura de $25 \text{ }^{\circ}\text{C}$, registrando la medición de 10 campos en un aproximado de 70 partículas.

2.2.2.5 Estudio del comportamiento al flujo bajo cizalla rotacional

Este estudio se basa en la transferencia de cantidad de movimiento de un fluido situado en el espacio comprendido entre dos cilindros concéntricos, uno de los cuales es rotatorio, en tanto que el otro permanece estacionario; el instrumento efectúa mediciones del torque aplicado al cilindro rotatorio, a diferentes velocidades angulares del cilindro rotatorio (Dondé, 2005).

El estudio del comportamiento al flujo de las pulpas de frutas para cada temperatura ($5, 15, 25, 35, 45, 55$ y $65 \text{ }^{\circ}\text{C}$) se realizó en un reómetro de cilindros concéntricos marca Haake modelo RT20, el reómetro cuenta con un sistema de enfriamiento y calentamiento con agua mediante un baño térmico marca Haake modelo C25 que permite mantener la temperatura de la muestra constante, la geometría usada fue el cilindro Z20-DIN con características de radio interno igual a 10 mm , radio externo igual a 10.85 mm , longitud equivalente de 30 mm y un volumen de 8.2 ml de muestra.

La determinación del comportamiento al flujo de las pulpas para cada temperatura se realizó empleando dos métodos: En el primer método la muestra fue cizallada a una velocidad de cizalla constante de 500 s^{-1} por un tiempo de cizallamiento de 50 segundos para la temperatura de $65 \text{ }^\circ\text{C}$ y de 1200 segundos para la temperatura de $5 \text{ }^\circ\text{C}$, registrando la evolución de la viscosidad en función del tiempo para alcanzar condiciones de flujo independiente al tiempo de cizallamiento. Inmediatamente se realizó una curva de descenso de una velocidad de cizalla de 500 a 0.1 s^{-1} por un periodo de 180 s en 60 puntos, seguido de un ascenso con una velocidad de cizalla de 0.1 a 500 s^{-1} durante 180 s en 60 puntos.

En el segundo método la muestra fue cizallada de una velocidad de 0.1 hasta 500 s^{-1} por un tiempo de 180 s en 60 puntos. Se mantuvo a una velocidad de cizalla constante de 500 s^{-1} por un tiempo de 50 s para la temperatura de $65 \text{ }^\circ\text{C}$ y de 1200 s para la temperatura de $5 \text{ }^\circ\text{C}$, se registró la evolución de la viscosidad en función del tiempo para alcanzar condiciones de equilibrio al tiempo de cizallamiento, posteriormente se realizó una curva de descenso a una velocidad de cizalla de 500 a 0.1 s^{-1} , por un tiempo de 180 s en 60 puntos seguido de una curva de ascenso de 0.1 a 500 s^{-1} . Para ambos métodos cada ensayo fue realizado por triplicado con una variación de temperatura de $\pm 0.6 \text{ }^\circ\text{C}$. Los datos de esfuerzo de cizalla, velocidad de cizalla y viscosidad fueron proporcionados por el software del equipo. En ambos métodos, de la curva de flujo de descenso y de ascenso se calculó el modelo reológico que mejor se ajustó a los datos experimentales.

Los datos se ajustaron al modelo de Ostwald-de Waele, graficando el esfuerzo de cizalla en función de la velocidad de cizalla, obteniendo la curva con una tendencia potencial (ecuación 12); dónde a la constante de proporcionalidad se le denomina índice de consistencia (K) y el exponente de la potencia recibe el nombre de índice de comportamiento al flujo (n):

$$\sigma = K\dot{\gamma}^n \quad (12)$$

El valor de la viscosidad aparente se obtuvo de acuerdo a la ecuación 11:

$$\eta_{ap} = \frac{\sigma}{\dot{\gamma}} \quad (11)$$

Sustituyendo el esfuerzo de cizalla de la ecuación 12 en la ecuación 11, la viscosidad aparente tiene la siguiente expresión:

$$\eta_{ap} = K\dot{\gamma}^{(n-1)} \quad (17)$$

La viscosidad aparente fue calculada para las velocidades de cizalla de 1, 10, 100, 200, 300, 400 y 500 s⁻¹.

2.2.2.6 Cálculo de la Energía de activación

El valor de la energía de activación (E_a) se obtiene al aplicar logaritmo natural a la ecuación tipo Arrhenius (Ecuación 16); de acuerdo al valor de viscosidad en estudio ya sea; viscosidad aparente (η_{ap}), viscosidad en condiciones de independencia al tiempo de cizalla (η_e), o el valor de viscosidad obtenida directamente del equipo (η), resultando la siguiente expresión:

$$\ln \eta = \ln \eta_{\infty} + \frac{E_a}{RT} \quad (18)$$

Esta ecuación se puede ajustar a una línea recta, por lo cuál se graficó el logaritmo natural de la viscosidad en el eje de las coordenadas y el inverso de la temperatura ($1/T$), en grados Kelvin en el eje de las abscisas, donde al multiplicar la pendiente por la constante universal de los gases ($R = 8.3143 \text{ kJ/kg mol K}$) se obtuvo el valor de la energía de activación, el cual es dividido por 1000 para obtener el valor de la energía de activación en unidades kJ/gmol y el antilog del valor de la ordenada al origen representa la constante η_{∞} que es considerada la viscosidad a una temperatura infinita (Chang y Hartel, 1997).

2.2.2.7 Tratamiento estadístico

A partir de los parámetros reológicos se calcularon las medidas de dispersión; promedio (\bar{X}), desviación estándar (σ_s) y coeficiente de variación (C.V.). Así mismo se realizó un análisis de diferencia mínima significativa (DMS) para indicar la diferencia entre los parámetros reológicos obtenidos por los dos métodos en el estudio bajo cizalla rotacional.

CAPÍTULO III

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1 Propiedades fisicoquímicas y sólidos totales

El Cuadro 4 muestra los resultados obtenidos de las propiedades fisicoquímicas y de los sólidos totales para las pulpas comerciales de fresa, guayaba y mango, reportando el valor promedio, desviación estándar y coeficiente de variación (%). Se observa que la pulpa de mango contiene 22.84% más sólidos solubles que la pulpa de guayaba y 44.51% más que la pulpa de fresa. El mayor contenido de sólidos solubles de la pulpa de mango se debe a su alto contenido en fructosa, glucosa y sacarosa (Cuadro 1). El contenido de fructosa, sacarosa y glucosa en la pulpa de mango es 61.22% y 18.35% mayor que la pulpa de fresa y guayaba respectivamente.

El pH de la pulpa de fresa es de 2.37, lo cual indica una mayor acidez en comparación a la pulpa de guayaba y mango. El valor del pH se debe a la presencia de ácidos orgánicos en las diferentes pulpas como es el ácido ascórbico, ácido málico, ácido acético. Otros estudios indican valores de pH superiores a los evaluados en este estudio, reportando para la pulpa de guayaba un intervalo de pH entre 3.29 y 4.6 (Andrade y col., 2009), en la pulpa de mango de 4.47 (Pelegrine y col., 2002) y un pH de 3.42 para la pulpa de fresa (Osorio, 2008). Las diferencias entre los resultados se deben a que las pulpas obtenidas sin procesamiento industrial conservan el pH de la fruta y las pulpas comerciales, además de contener ácidos orgánicos propios de la fruta, reportan en su etiqueta ácido cítrico que sirve como regulador de pH, así como conservador de alimentos y con ello se provoca que el pH sea menor.

La pulpa de mango presenta una mayor concentración de sólidos totales, en un 45.05% superior a la pulpa de fresa y 6.99% a la pulpa de guayaba.

La concentración de sólidos totales para la pulpa de guayaba se encuentra en el mismo intervalo a los estudios realizados por Moreno y col., (2009). Para las pulpas de mango y fresa no se tienen reportes.

Cuadro 4. Propiedades fisicoquímicas y concentración de sólidos totales de las pulpas comerciales de fresa, guayaba y mango.

Pulpa	Sólidos solubles			pH			Sólidos totales		
	°Bx	σ_s	C.V. (%)	pH	σ_s	C.V. (%)	(%)	σ_s	C.V. (%)
Fresa	7.48	0.17	2.27	2.37	0	0	7.55	0	0
Guayaba	10.40	0.10	0.96	2.42	0.02	0.83	12.78	0	0
Mango	13.48	0.13	0.96	2.47	0	0	13.74	0.13	0.95

σ_s : Desviación estándar

C.V. Coeficiente de variación (%)

3.2 Tamaño de partícula

Debido a la forma irregular que presentaron las partículas de las pulpas, se obtuvo el valor de la dimensión mayor de cada partícula. La Figura 11 muestra a las partículas que conforman la fase dispersa de la pulpa de fresa (11a), guayaba (11b) y mango (11c) obtenidas directamente del envase, las cuales presentaron una forma irregular. En la Figura 12 se observan las partículas para cada pulpa una vez cizalladas a una velocidad de cizalla constante de 500 s^{-1} durante 1110 segundos. Las partículas cizalladas mantuvieron su forma asimétrica, pero disminuye la dimensión mayor de partícula. Posiblemente por una rotura de las partículas provocada por el cizallamiento (Windhab, 1995).

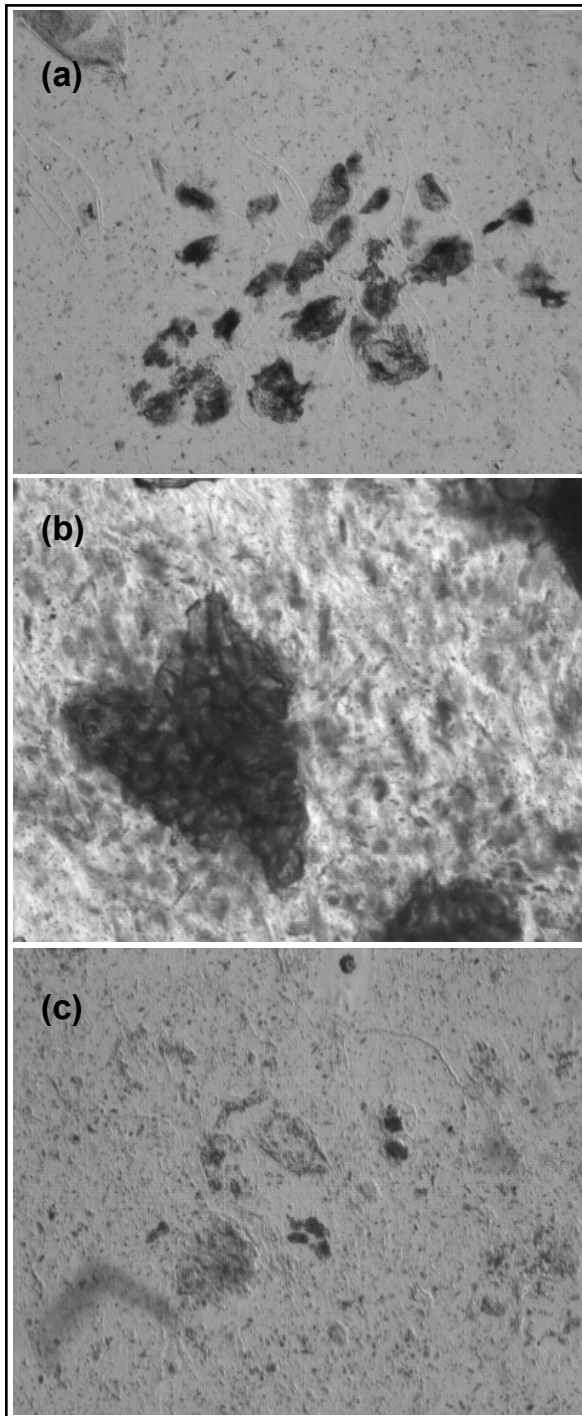


Figura 11. Fotografía a nivel microscópico de partículas cizalladas de la pulpa de (a) fresa, (b) guayaba y (c) mango.

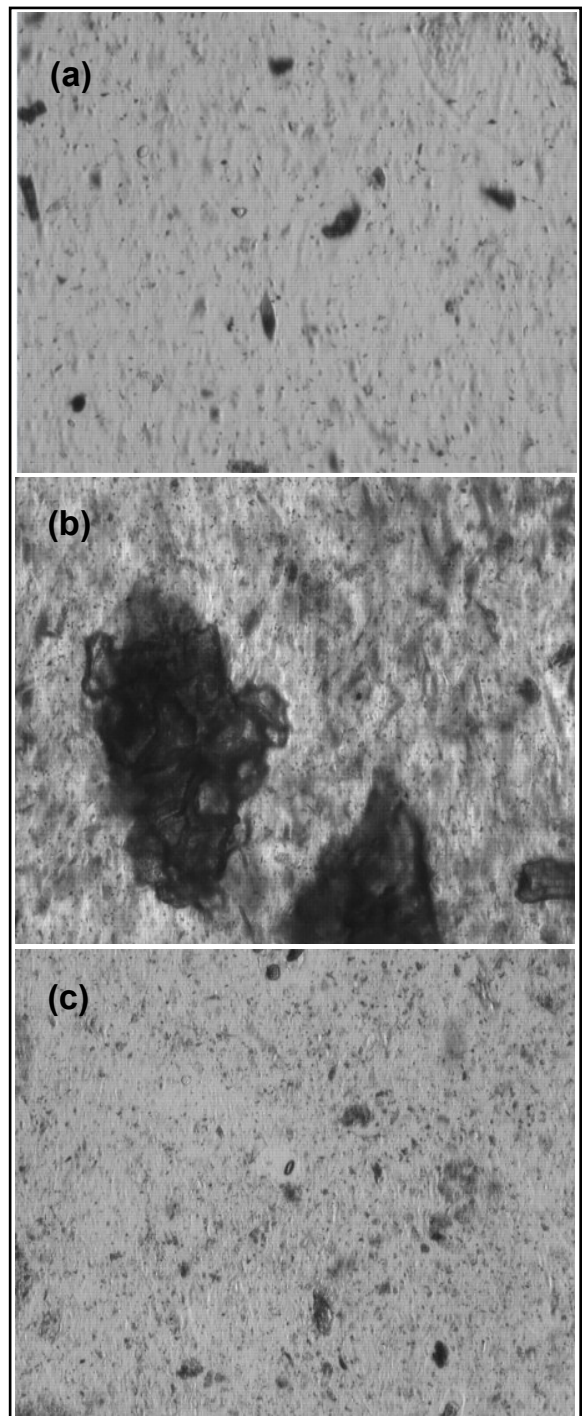


Figura 12. Fotografía a nivel microscópico de partículas sin cizallar de la pulpa comercial de (a) fresa, (b) guayaba y (c) mango.

El Cuadro 5 presenta los resultados obtenidos de 10 campos de medición reportando el valor promedio de 70 partículas. Se obtuvo que la dimensión mayor de la partícula determinada directamente del envase corresponde a la pulpa de guayaba siendo 33.77 μm mayor que las partículas de la pulpa de fresa y 39.16 μm que las partículas de la pulpa de mango.

El efecto del cizallamiento disminuyó en un 3.43% la dimensión de las partículas de la pulpa de guayaba, en un 35% la dimensión de las partículas de la pulpa de fresa y un 28.04% el tamaño de las partículas de la pulpa de mango. Por lo tanto se considera que las partículas de la pulpa de guayaba son duras y no es afectada por el cizallamiento de acuerdo con Vasco y col., (2005); los sólidos insolubles de la pulpa de guayaba se encuentran compuestos de fibra insoluble aproximadamente en un 80%, en contraste las partículas de pulpa de fresa y mango son consideradas de estructura flexible, lo que permite la disminución de su dimensión mayor.

Cuadro 5. Dimensión mayor de partículas de pulpa de fresa, guayaba y mango sin cizallar y cizalladas.

Pulpa	Dimensión mayor de partículas sin cizallar (μm)	Dimensión mayor de partículas cizalladas por 1110 s (μm)
Fresa	14.19 \pm 2.02	9.22 \pm 2.02
Guayaba	47.96 \pm 4.33	46.32 \pm 3.56
Mango	8.88 \pm 2.22	6.39 \pm 1.53

3.3 Comportamiento al flujo de pulpa de fresa

En la Figura 13 se representa el esfuerzo de cizalla en función de la velocidad de cizalla para ambos métodos empleados en la determinación del comportamiento al flujo de la pulpa de fresa. El método 1 consta de tres segmentos (Figura 13a) y el método 2 consta de 4 segmentos (Figura 13b), diferenciándose entre ellos por una curva de flujo de ascenso previa al cizallamiento constante (CC). Se observa que la pulpa de fresa es un fluido dependiente del tiempo, donde en el método 1 el cizallamiento constante es suficiente para alcanzar las condiciones de equilibrio (la curva de descenso-ascenso coinciden). En el método 2 la curva de flujo del primer ascenso con la curva de descenso no coinciden presentando histéresis, después del cizallamiento constante se alcanzan condiciones de independencia del tiempo de cizalla.

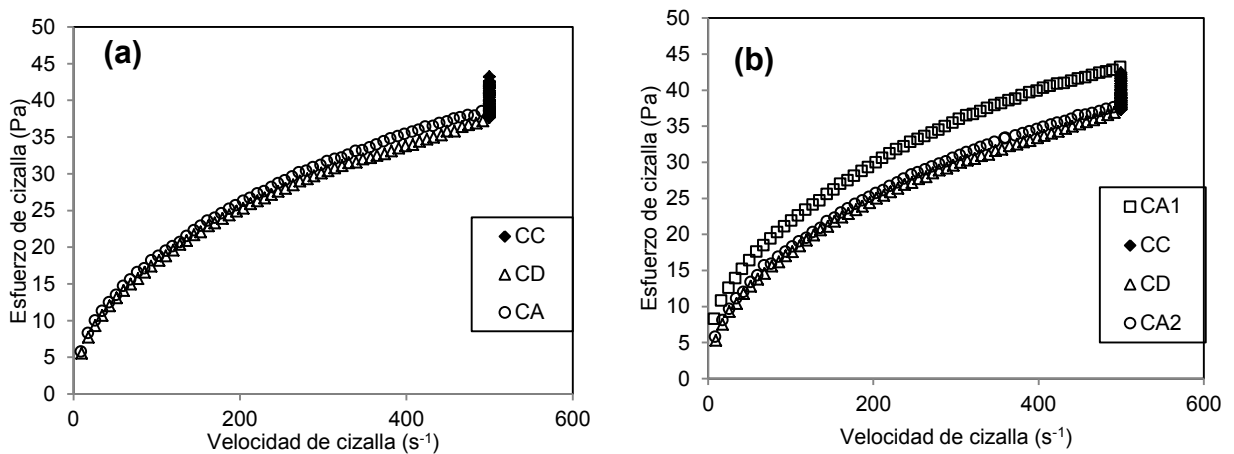


Figura 13. Esfuerzo de cizalla en función de la velocidad de cizalla de pulpa de fresa a 5 °C (a) Método 1 (b) Método 2, cizalla constante (CC), curva de flujo de ascenso (CA) y curva de flujo de descenso (CD).

De las condiciones de velocidad de cizalla constante se gráfico la viscosidad en función del tiempo para cada temperatura, presentándose en la Figura 14 ambos métodos. Se observa que la viscosidad decrece lentamente hasta hacerse constante con el tiempo de cizallamiento debido a la orientación o deformación de los sólidos por la acción de la cizalla (Windhab, 1995).

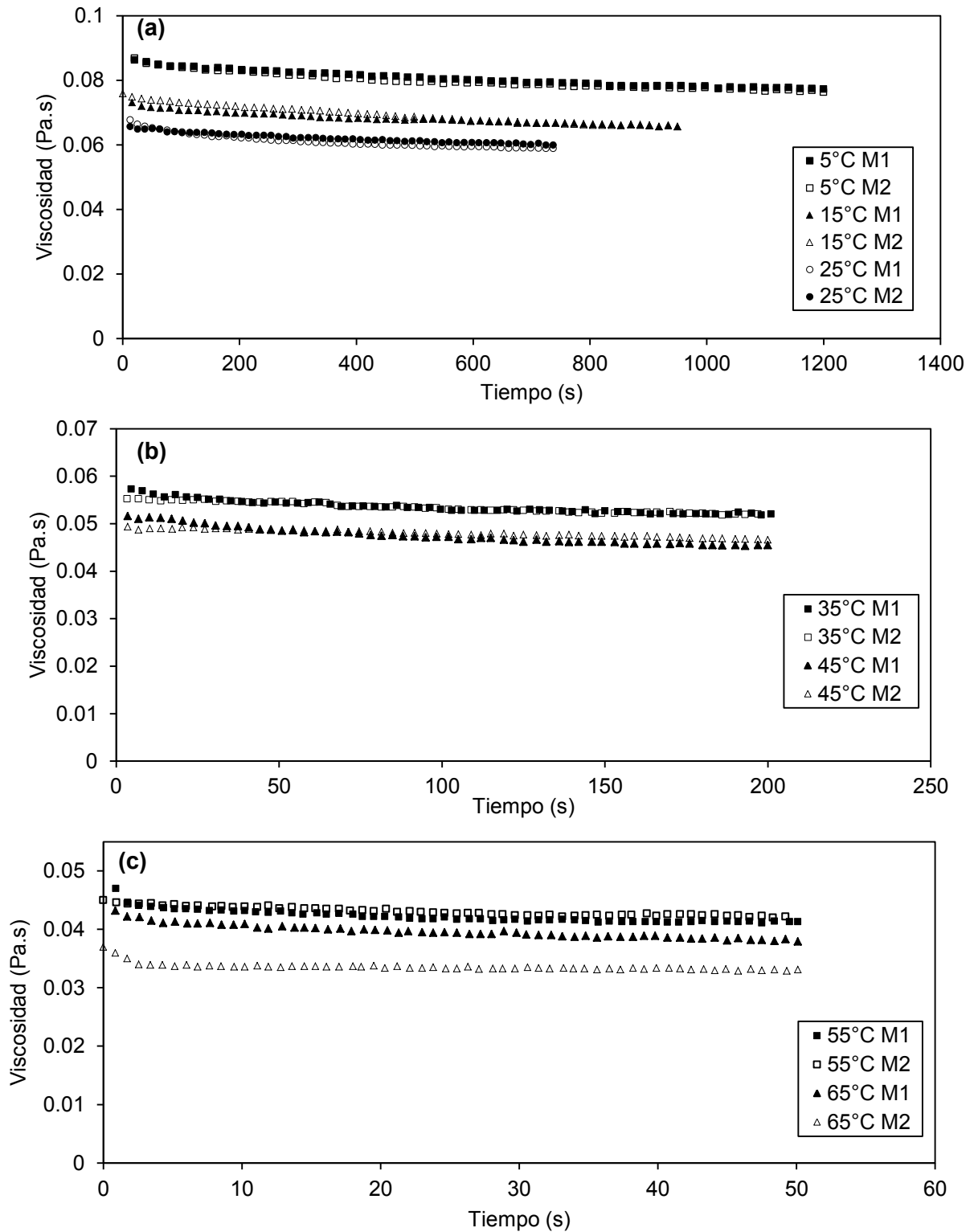


Figura 14. Viscosidad en función del tiempo de la pulpa de fresa del Método 1 (M1) y Método 2 (M2) (a) 5, 15, 25 °C (b) 35, 45 °C y (c) 55 y 65 °C.

De la Figura 14 se seleccionó el primero y el último valor de la viscosidad reportado por el software del equipo, el primer punto corresponde a un tiempo de 10 segundos y el último valor el tiempo depende de cada temperatura. El primer valor de la viscosidad es considerada en condiciones de dependencia del tiempo y el último valor es considerado en condiciones independientes del tiempo. Ambos valores se presentan en el Cuadro 6.

Cuadro 6. Tiempo de cizallamiento y viscosidad a las diferentes temperaturas de la pulpa de fresa de ambos métodos.

Temperatura (°C)	Tiempo de cizallamiento (s)	Método 1			Método 2		
		η (Pa.s)	σ_s	C.V. (%)	η (Pa.s)	σ_s	C.V. (%)
5	10	0.087	0.001	0.2	0.087	0.009	1.6
	1200	0.076	0.001	0.9	0.075	0.002	2.4
15	10	0.073	0.002	2.8	0.073	0.001	1.4
	950	0.067	0.002	2.9	0.064	0.002	2.7
25	10	0.066	0.001	1.1	0.065	0.001	1.1
	750	0.058	0.001	0.5	0.059	0.001	1.7
35	10	0.058	0.001	1.3	0.054	0.001	1.9
	200	0.051	0.001	1.9	0.051	0.001	1.4
45	10	0.051	0.001	1.3	0.050	0.001	1.8
	200	0.045	0.001	0.6	0.047	0.001	1.9
55	10	0.047	0.002	3.3	0.045	0.001	0.9
	50	0.042	0.002	3.8	0.042	0.001	0.8
65	10	0.043	0.001	1.2	0.037	0.001	1.2
	50	0.038	0.001	1.1	0.034	0.001	1.5

σ_s : Desviación estándar

C.V. Coeficiente de variación (%)

El valor de la viscosidad descendió 56.32% en el método 1 de 0.087 a 0.038 Pa.s y en el método 2 la viscosidad decrece un 60.91% de 0.087 a 0.034 Pa.s. En el método 1 la viscosidad desciende 12% por cada 10 grados de temperatura y en el método 2 disminuye un 8%. Asimismo, si se consideran sólo dos cifras del valor de la viscosidad, el método de evaluación no influye en el tiempo en que la viscosidad es independiente. El tiempo en que se alcanza las condiciones de viscosidad independiente del tiempo es menor con el aumento de la temperatura debido al incremento en la movilidad y ruptura de interacciones entre las macromoléculas que conforman la fase dispersa y con ello se ofrece una menor resistencia al flujo al incrementarse de temperatura (Daub, 2008).

Una vez que la pulpa de fresa alcanzó condiciones donde la viscosidad es independiente del tiempo, la pulpa fue cizallada en forma descendente y ascendente. En la Figura 15 se observa el esfuerzo de cizalla en función de la velocidad de cizalla para ambos métodos, presentando solo la curva de flujo de descenso. En todas las muestras el comportamiento que presenta la pulpa de fresa es no-newtoniano adelgazante a la cizalla, donde la viscosidad disminuye con el aumento de la velocidad de cizalla como se presenta en la Figura 16. El mismo comportamiento se presenta en la curva de flujo de forma ascendente (Anexo A.1). El comportamiento adelgazante de este tipo de fluidos se debe a que las partículas dispersas (sólidos insolubles, fibras y pectinas) en la fase continua, se orientan en la dirección de la velocidad de cizalla produciéndose así una disminución de la resistencia al flujo o de la viscosidad aparente (Windhab, 1995).

De los datos de las curvas de flujo se realizaron los cálculos para obtener los parámetros reológicos del modelo de Oswald-de Waele.

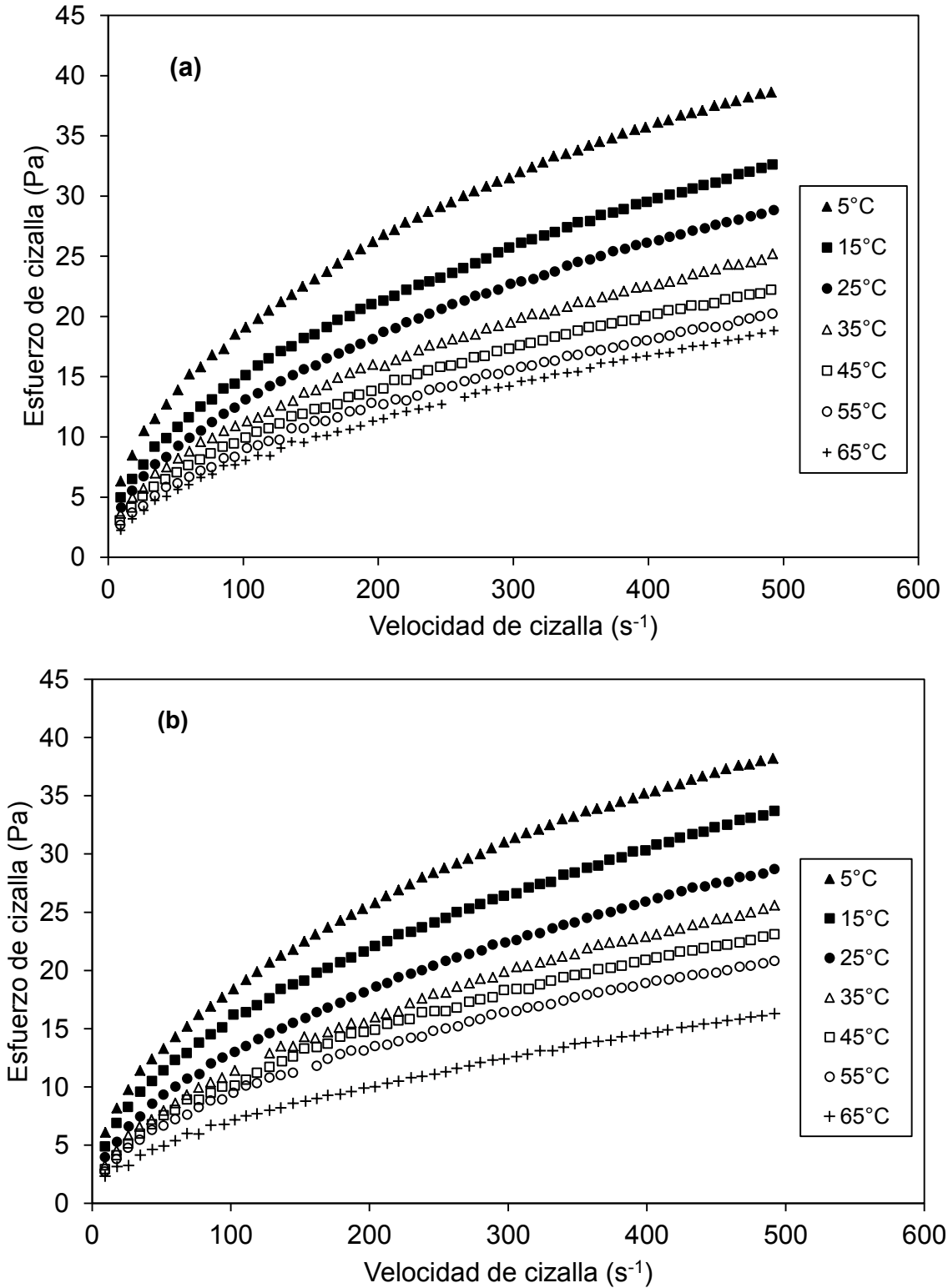


Figura 15. Esfuerzo de cizalla en función de la velocidad de cizalla de la pulpa de fresa (a) Método 1 y (b) Método 2.

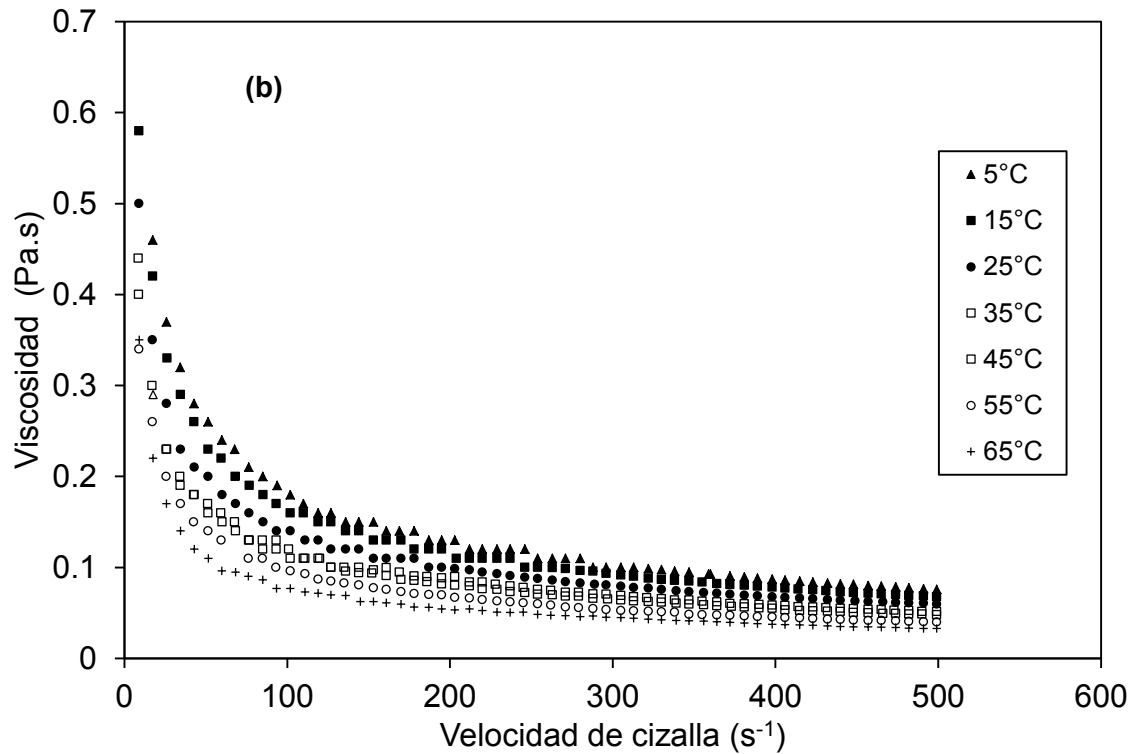
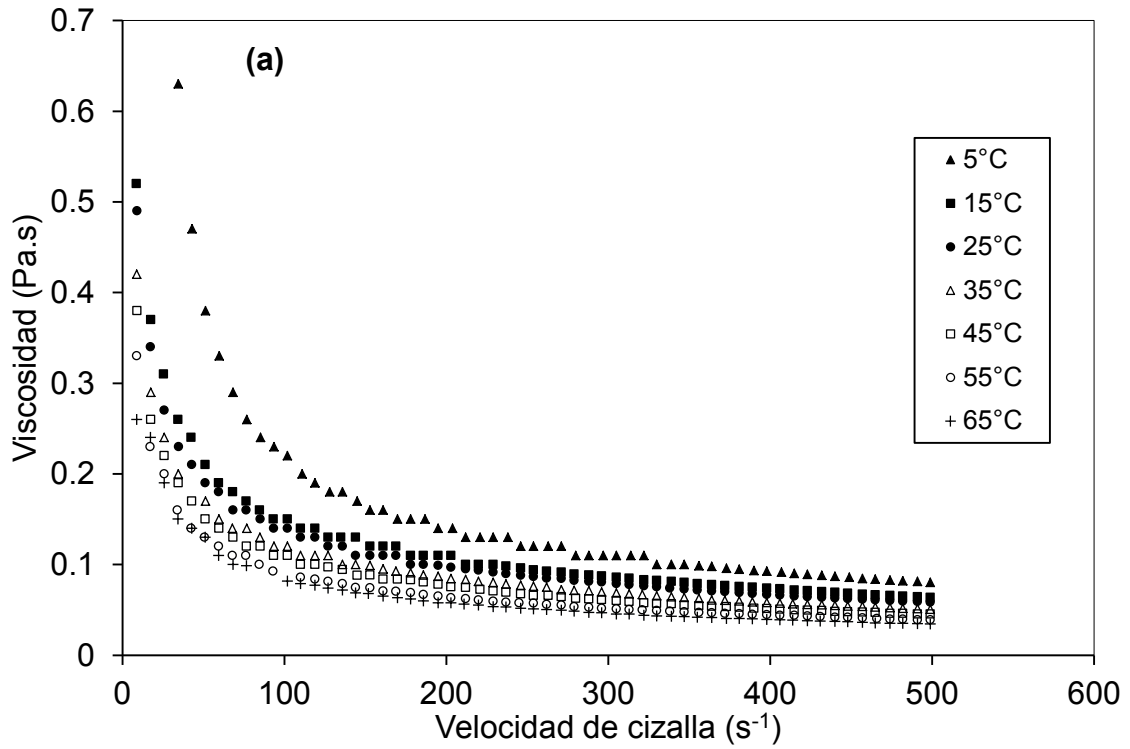


Figura 16. Viscosidad en función de la velocidad de cizalla de la pulpa de fresa (a) Método 1 y (b) Método 2.

En todas las muestras de ambos métodos el modelo que mejor define a los datos experimentales es el de Oswald-de Waele de acuerdo al valor del coeficiente de determinación (r^2), en el Cuadro 7 se muestra el índice de consistencia (K), índice de comportamiento al flujo (n) y el coeficiente de determinación (r^2). Por el valor de r^2 el 99.8% de los datos experimentales son definidos por este modelo.

Cuadro 7. Parámetros reológicos del modelo Oswald-de Waele de la pulpa de fresa a diferentes temperaturas para ambos métodos.

T (°C)	Método 1			Método 2		
	Oswald-de Waele			Oswald-de Waele		
	K (Pa.s ⁿ)	n	r ²	K (Pa.s ⁿ)	n	r ²
5	2.029 ±0.022 *1.104	0.474 ±0.001 *0.110	0.999	1.960 ±0.161 *3.880	0.478 ±0.007 *1.485	0.999
15	1.544 ±0.069 *4.469	0.489 ±0.003 *0.658	0.998	1.676 ±0.042 *2.482	0.482 ±0.002 *0.0347	0.999
25	1.242 ±0.031 *2.463	0.501 ±0.007 *1.345	0.999	1.259 ±0.010 *0.794	0.485 ±0.005 *1.037	0.998
35	1.132 ±0.035 *3.133	0.502 ±0.004 *0.855	0.999	1.055 ±0.022 *2.107	0.498 ±0.009 *1.709	0.999
45	0.998 ±0.018 *1.780	0.505 ±0.002 *0.396	0.999	1.014 ±0.051 *5.040	0.502 ±0.005 *0.942	0.999
55	0.852 ±0.042 *4.975	0.512 ±0.004 *0.721	0.999	0.841 ±0.070 *8.341	0.517 ±0.013 *2.427	0.999
65	0.817 ±0.119 *4.53	0.515 ±0.018 *3.452	0.999	0.671 ±0.101 5.001	0.518 ±0.027 *5.171	0.999

* Coeficiente de variación (%)

En la pulpa de fresa en el método 1, el índice de consistencia (K) disminuye de 2.029 a 0.817 Pa.sⁿ con el incremento de la temperatura y el índice de comportamiento al flujo (n) incrementa de 0.474 a 0.515. En el método 2, el índice de consistencia disminuye de 1.96 a 0.671 Pa.sⁿ y el índice de comportamiento incrementa de 0.462 a 0.518. En ambos métodos el incremento de la temperatura disminuye el carácter adelgazante de la pulpa de fresa. Usualmente los productos derivados de frutas tienden a mostrar éste comportamiento y se atribuye a la ruptura en enlaces de carbohidratos simples y sustancias de alto peso molecular como lo son pectinas y/o sólidos en dispersión, aumentando con ello las distancias entre moléculas y acomodo de las partículas en suspensión (Haminiuk y col., 2006; Andrade y col., 2010).

Osorio (2008), en pulpa de fresa, reporta en un intervalo de temperaturas de 55 a 90 °C valores de índice comportamiento al flujo entre 0.315 a 0.415 y para el índice de consistencia entre 1.12 a 3.02 Pa.sⁿ, los valores de ambos parámetros son inferiores a los obtenidos en este estudio por el intervalo de temperatura utilizado.

Comparando ambos métodos el índice de consistencia del método 1 es mayor que los obtenidos en el método 2. Considerando sólo el valor del índice de comportamiento al flujo, el método de evaluación en la pulpa de fresa no afecta esté parámetro de la curva de flujo cuando es evaluada en condiciones de equilibrio.

Para determinar si estadísticamente los valores de los parámetros reológicos son considerados iguales entre los dos métodos estudiados, para una misma temperatura, se utilizó el método de diferencia mínima significativa (DMS) con un nivel de significancia de 1% ($\alpha = 0.005$) y planteando las siguientes hipótesis:

$$H_0: K_{M1} = K_{M2} = 0 \quad (19)$$

$$H_i: K_{M1} \neq K_{M2} = 0 \quad (20)$$

En la hipótesis nula (H_0) se infiere que la diferencia entre el índice de consistencia del método 1 (M1) y del método 2 (M2) para una misma temperatura es igual a cero. La hipótesis alterna (H_i) propone que la diferencia entre el valor del índice de consistencia del método 1 (M1) y el índice de consistencia del método 2 (M2) es diferente a cero para la misma temperatura.

Las mismas hipótesis se plantearon para el índice de comportamiento al flujo, para cada temperatura y cada una de las pulpas.

En los cuadros 8 y 9 se presentan los resultados de los valores de DMS, el valor de la diferencia de medias y la aceptación o rechazo de la hipótesis para el índice de consistencia y el índice de comportamiento al flujo respectivamente de la pulpa de fresa.

Cuadro 8. Valores de diferencia mínima significativa (DMS) del índice de consistencia a las diferentes temperaturas para la pulpa de fresa.

Temperatura (°C)	DMS	$X_{M1}-X_{M2}$	Hipótesis
5	0.068	0.066	Acepta H_0
15	0.214	0.132	Acepta H_0
25	0.085	0.016	Acepta H_0
35	0.111	0.076	Acepta H_0
45	0.143	0.015	Acepta H_0
55	0.217	0.011	Acepta H_0
65	0.417	0.145	Acepta H_0

Cuadro 9. Valores de diferencia mínima significativa (DMS) del índice de comportamiento al flujo a las diferentes temperaturas para la pulpa de fresa.

Temperatura (°C)	DMS	$X_{M1}-X_{M2}$	Hipótesis
5	0.077	0.003	Acepta H_0
15	0.009	0.007	Acepta H_0
25	0.022	0.015	Acepta H_0
35	0.025	0.004	Acepta H_0
45	0.013	0.003	Acepta H_0
55	0.034	0.004	Acepta H_0
65	0.085	0.002	Acepta H_0

Cómo el valor de la diferencia de medias ($X_{M1}-X_{M2}$) es menor al valor de la diferencia mínima significativa (DMS) se acepta H_0 , por lo que estadísticamente no existe diferencia entre la obtención del índice de consistencia y el índice de comportamiento al flujo al emplear el método 1 ó el método 2 para cada temperatura de estudio, ya que en ambos métodos se alcanzaron condiciones de independencia del tiempo.

Cálculo de la viscosidad aparente a diferentes velocidades de cizalla

Con los parámetros obtenidos del modelo de Oswald-de Waele, se calculó la viscosidad aparente (ecuación 17) a diferentes velocidades de cizalla (1, 10, 100, 200, 300, 400, 500 s^{-1}) para cada temperatura (Cuadro 10). Se observa que con el incremento de la temperatura y velocidad de cizalla la viscosidad aparente disminuye. El valor de la viscosidad aparente a la velocidad de cizalla de 1 s^{-1} es igual al valor del índice de consistencia. Este valor disminuye en promedio un 96% de la velocidad de cizalla de 1 a 500 s^{-1} considerando la temperatura de 5°C.

Cuadro 10. Viscosidad aparente evaluada a diferentes velocidades de cizalla (1, 10, 100, 200, 300, 400 y 500 s⁻¹) y diferente temperatura (5, 15, 25, 35, 45, 55 y 65 °C) de la pulpa de fresa por ambos métodos.

Método 1							
T (°C)	Viscosidad aparente (Pa.s)						
	1 s⁻¹	10 s⁻¹	100 s⁻¹	200 s⁻¹	300 s⁻¹	400 s⁻¹	500 s⁻¹
5	2.029	0.604	0.180	0.125	0.101	0.087	0.077
15	1.544	0.476	0.147	0.103	0.084	0.072	0.064
25	1.242	0.394	0.125	0.088	0.072	0.062	0.056
35	1.132	0.360	0.114	0.081	0.066	0.057	0.051
45	0.998	0.319	0.102	0.072	0.059	0.051	0.046
55	0.852	0.277	0.090	0.064	0.053	0.046	0.041
65	0.817	0.267	0.088	0.063	0.051	0.045	0.040
Método 2							
T (°C)	Viscosidad aparente (Pa.s)						
	1 s⁻¹	10 s⁻¹	100 s⁻¹	200 s⁻¹	300 s⁻¹	400 s⁻¹	500 s⁻¹
5	1.960	0.589	0.177	0.123	0.100	0.086	0.076
15	1.676	0.508	0.154	0.108	0.087	0.075	0.067
25	1.259	0.385	0.118	0.082	0.067	0.058	0.051
35	1.055	0.332	0.104	0.074	0.060	0.052	0.047
45	1.014	0.322	0.102	0.072	0.059	0.051	0.046
55	0.841	0.276	0.091	0.065	0.053	0.047	0.042
65	0.671	0.221	0.073	0.052	0.043	0.037	0.034

3.4 Comportamiento al flujo de pulpa de guayaba

En la Figura 17 se representa el esfuerzo de cizalla en función de la velocidad de cizalla para los dos métodos empleados en el estudio bajo cizalla rotacional de la pulpa de guayaba. El método 1, como fue explicado para la pulpa de fresa, consta de tres curvas de flujo, mientras que el método 2 difiere del primero en una curva de flujo ascendente de velocidad de cizalla de 0.1 a 500 s⁻¹ previa al cizallamiento constante. La pulpa de guayaba presenta un comportamiento dependiente del tiempo y el cizallamiento constante permite alcanzar condiciones de equilibrio donde la curva de flujo de descenso y la curva de ascenso coinciden. Para el método 2 la curva del primer ascenso no coincide con la curva de descenso presentando histéresis, obteniendo un comportamiento similar al reportado para la pulpa de fresa. En la Figura 18 se presenta el comportamiento de la viscosidad con el tiempo de cizallamiento. Se observa que la viscosidad decrece lentamente hasta hacerse constante con el tiempo debido a la orientación o deformación de los sólidos por la acción de la cizalla (Windhab, 1995). Tanto la pulpa de fresa como de guayaba, una vez alcanzando condiciones donde la viscosidad es independiente del tiempo, el método de evaluación no afectó el comportamiento reológico.

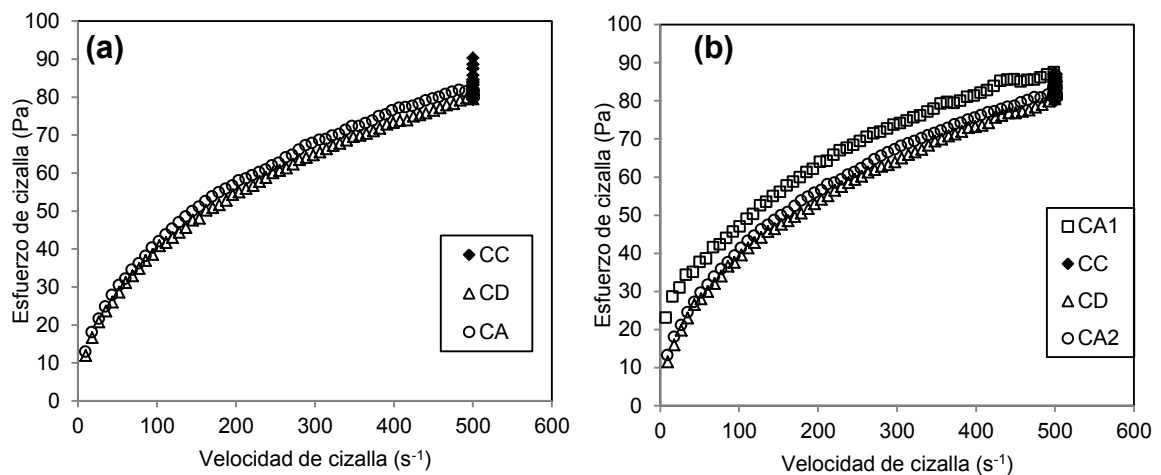


Figura 17. Esfuerzo de cizalla en función de la velocidad de cizalla de pulpa de guayaba a 5 °C (a) Método 1 (b) Método 2, cizalla constante (CC), curva de flujo de ascenso (CA) y curva de flujo de descenso (CD).

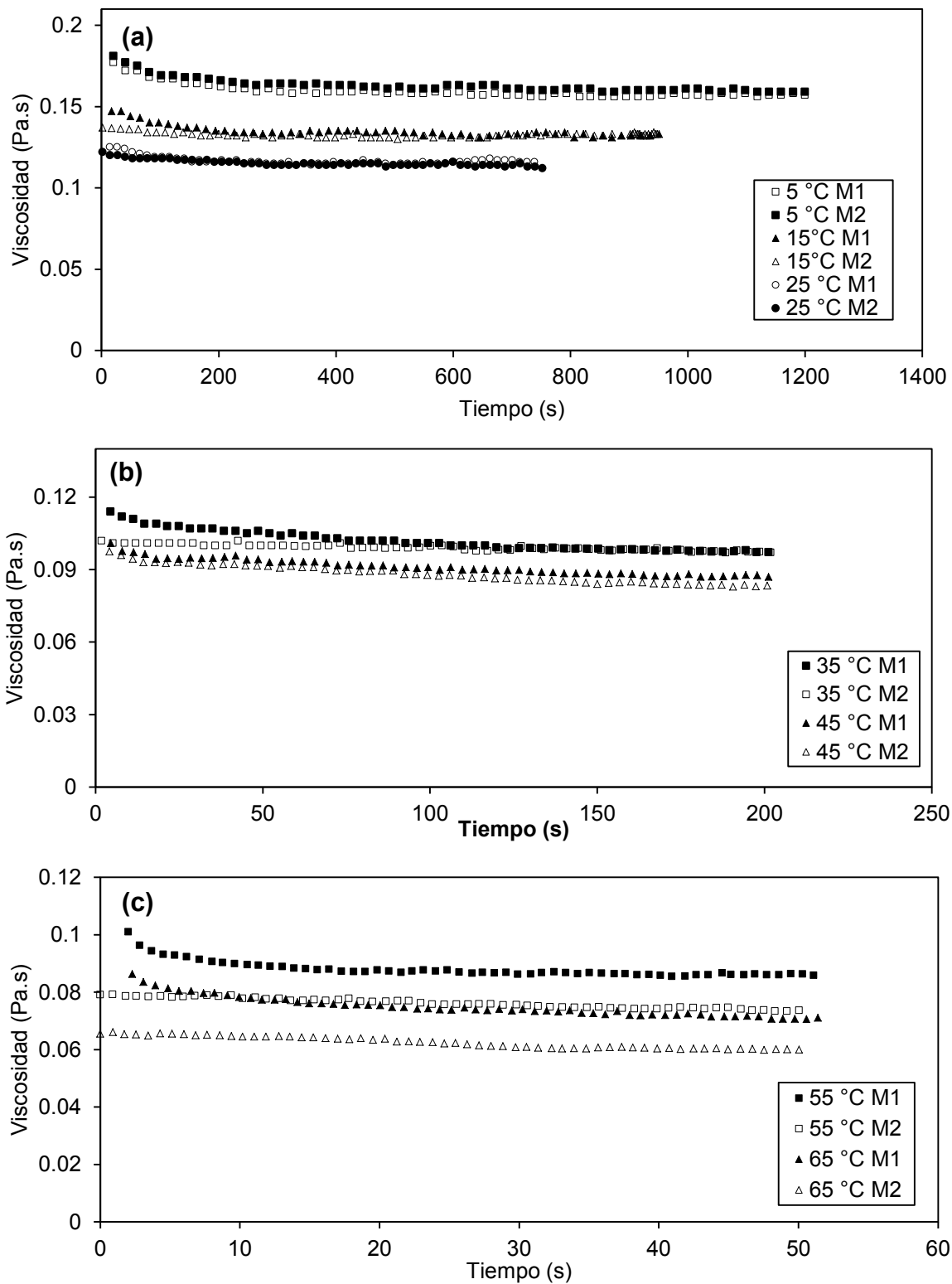


Figura 18. Viscosidad en función del tiempo de la pulpa de guayaba del Método 1 (M1) y Método 2 (M2) (a) 5, 15, 25 °C (b) 35, 45 °C y (c) 55 y 65 °C.

En el Cuadro 11 se presenta la viscosidad a diferentes tiempos de cizallamiento (velocidad de cizalla constante de 500 s^{-1}), la viscosidad a 10 segundos de cizallamiento así como la viscosidad al final del tiempo de cizallamiento para cada temperatura de ambos métodos. Mostrando que el tiempo en alcanzar condiciones de flujo independiente al tiempo de cizallamiento, desciende conforme aumenta la temperatura debido a la reorganización estructural afectada por la temperatura (Alvarado, 2001).

Cuadro 11. Tiempo de cizallamiento y viscosidad a las diferentes temperaturas de la pulpa de guayaba.

Temperatura (°C)	Tiempo de cizallamiento (s)	Método 1			Método 2		
		η (Pa.s)	σ_s	C.V. (%)	η (Pa.s)	σ_s	C.V. (%)
5	10	0.174	0.009	5.1	0.168	0.007	3.9
	1200	0.156	0.003	1.9	0.155	0.003	3.9
15	10	0.145	0.004	2.5	0.137	0.002	1.5
	950	0.132	0.001	1.1	0.131	0.002	1.2
25	10	0.125	0.003	2.3	0.121	0.001	0.9
	750	0.115	0.001	0.5	0.115	0.002	2.3
35	10	0.113	0.001	1.0	0.103	0.002	2.1
	200	0.099	0.002	2.1	0.098	0.002	2.3
45	10	0.102	0.001	1.4	0.089	0.001	1.5
	200	0.086	0.001	1.6	0.084	0.002	2.3
55	10	0.096	0.002	3.1	0.078	0.001	1.8
	50	0.081	0.004	4.5	0.072	0.002	2.7
65	10	0.088	0.003	2.9	0.066	0.002	2.4
	50	0.070	0.002	2.3	0.059	0.002	3.5

En la pulpa de guayaba el valor de la viscosidad disminuye 59.77% de 0.174 a 0.070 Pa.s en el método 1 y para el método 2 disminuye 64.88% de 0.168 a 0.059 Pa.s. Al igual que con la pulpa de fresa el método 2 es el que provoca un mayor porcentaje de la disminución de la viscosidad. A diferencia de la pulpa de fresa, en la pulpa de guayaba, en las temperaturas de 55 y 65 °C, el método de evaluación es importante, posiblemente por su alta concentración (52.5%) de carbohidratos simples (fructosa, glucosa y sacarosa) y/o el cizallamiento de la primera curva de ascenso previa a la curva de cizallamiento constante en el método 2, la cual destruyó estructuras complejas presentes en la pulpa de guayaba (Augusto, 2011). Tanto en la pulpa de fresa como de la guayaba, el tiempo en alcanzar condiciones de flujo independiente al tiempo de cizallamiento desciende conforme aumenta la temperatura, debido a la reorganización estructural afectada por la temperatura (Alvarado, 2001).

Después de que se alcanzaron condiciones donde la viscosidad es constante con el tiempo de cizallamiento, se obtuvieron curvas de flujo de descenso y ascenso presentando el comportamiento de la curva de descenso para ambos métodos en la Figura 19. En todas las muestras el comportamiento que presenta la pulpa de guayaba es no-newtoniano adelgazante a la cizalla, donde la viscosidad disminuye con el aumento de la velocidad de cizalla como se presenta en la Figura 20. El mismo comportamiento se presenta en la curva de flujo de forma ascendente (Anexo A.2).

El comportamiento reológico no newtoniano tipo adelgazante a la cizalla de la pulpa de guayaba lo han reportado Andrade y col., (2009); Cabral y col., (2007); Ferreira y col., (2002) y Sánchez y col., (2006). Estos autores lo atribuyen a las rupturas de estructuras e interacciones entre azúcares solubles, sólidos insolubles, fibras y sustancias de pectinas durante el cizallamiento.

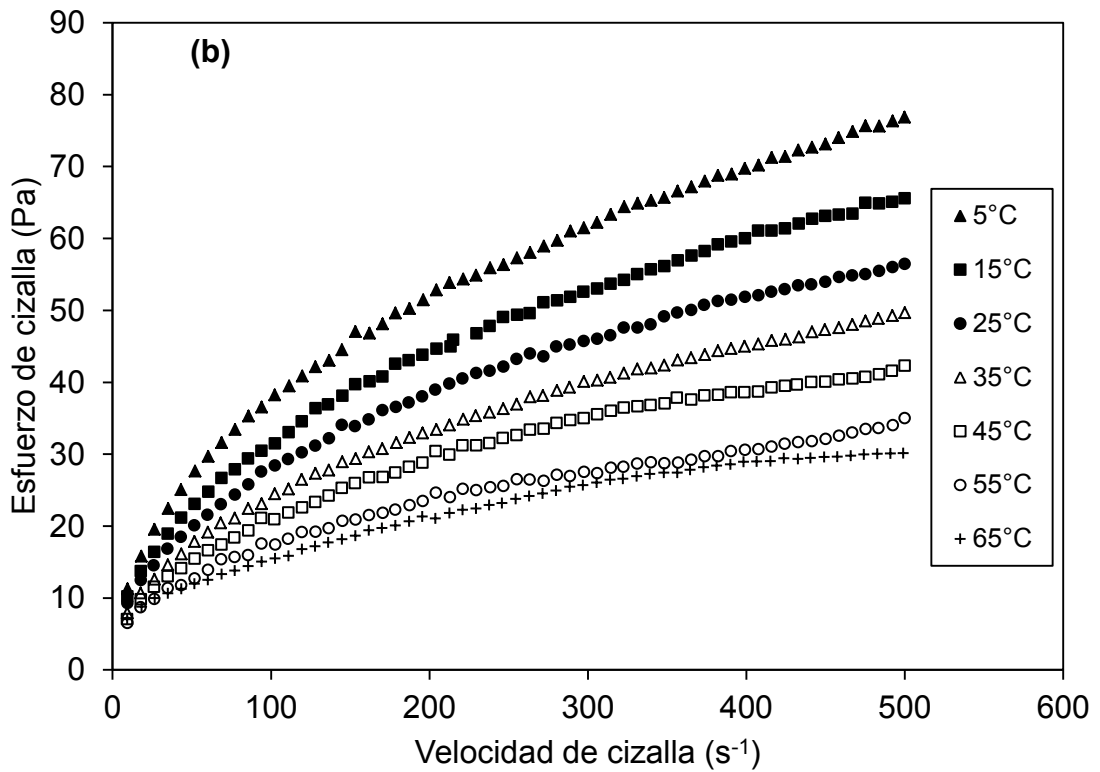
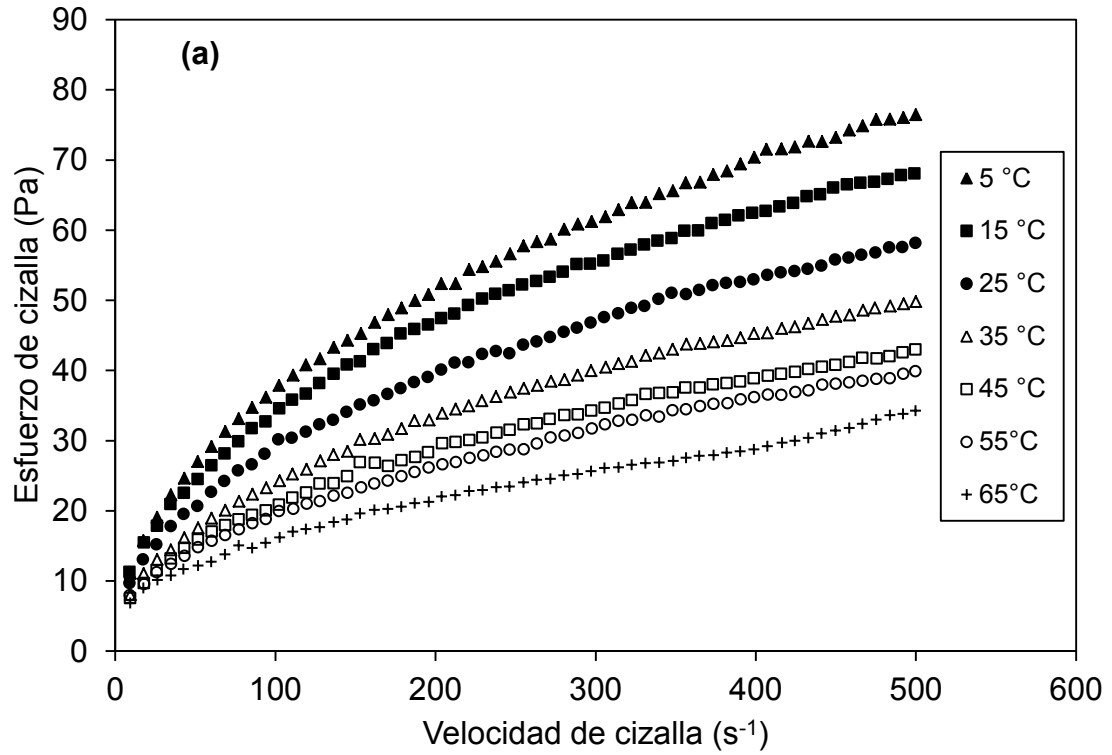


Figura 19. Esfuerzo de cizalla en función de la velocidad de cizalla de la pulpa de guayaba (a) Método 1 y (b) Método 2.

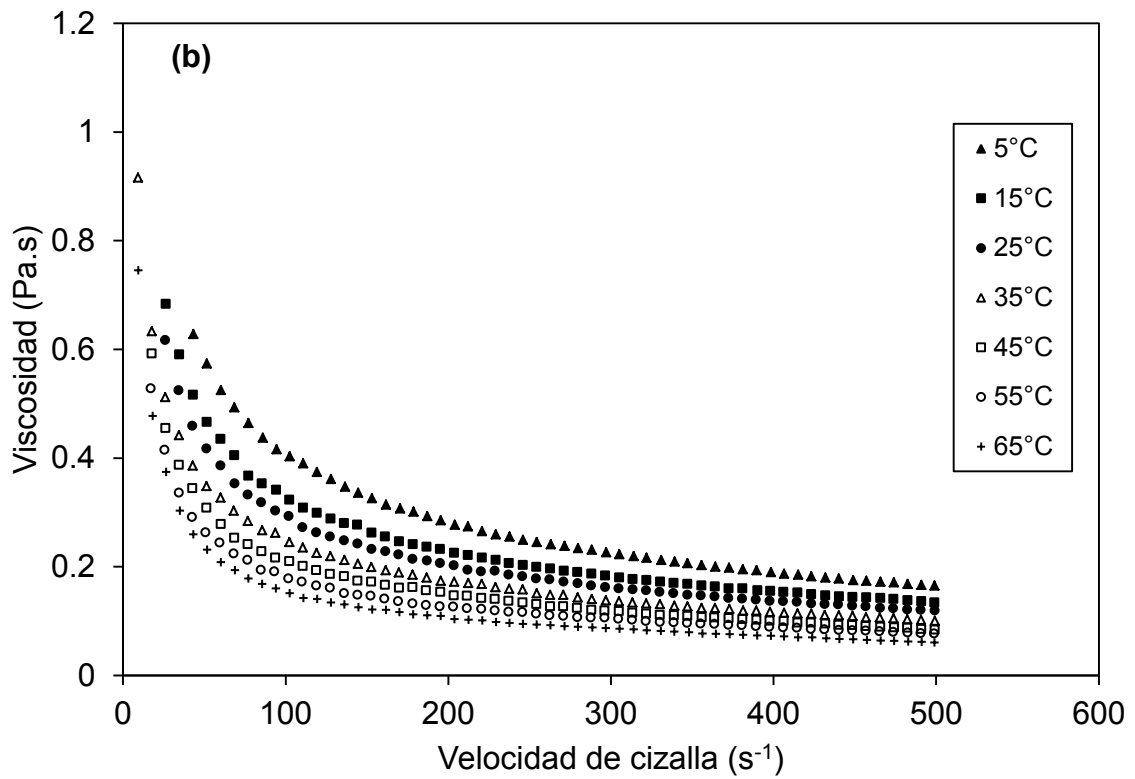
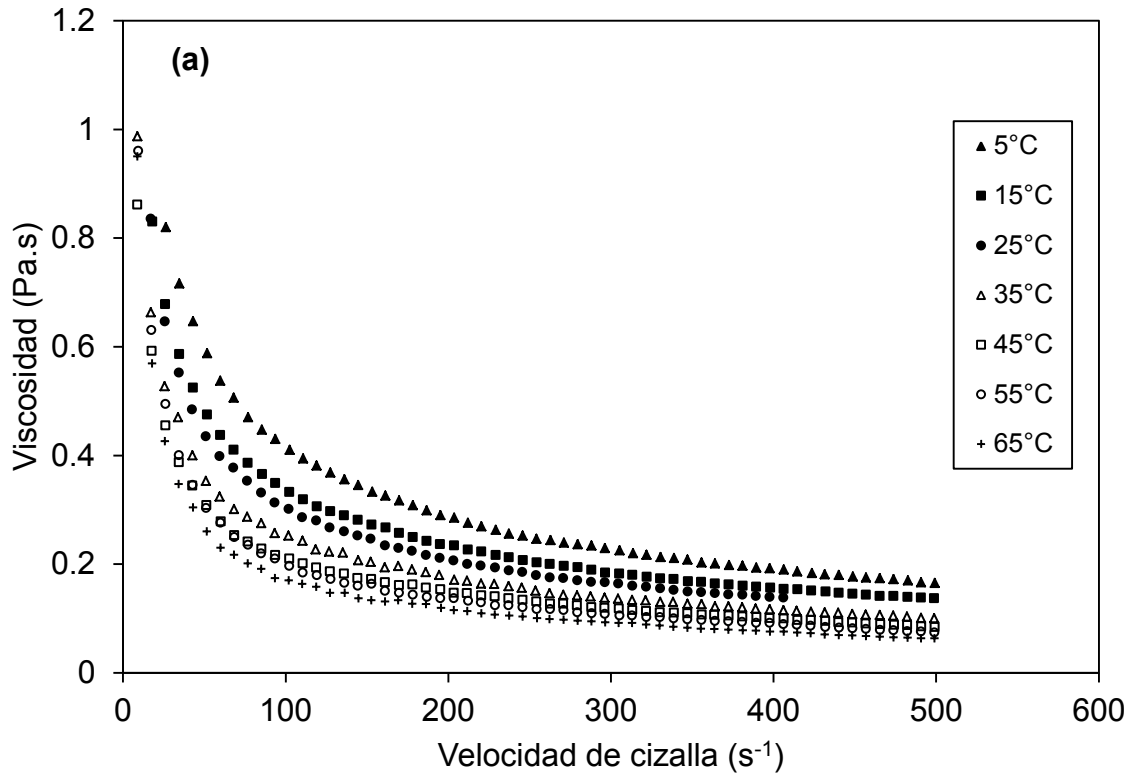


Figura 20. Viscosidad en función de la velocidad de cizalla de la pulpa de guayaba (a) Método 1 y (b) Método 2.

De las curvas de flujo de descenso como de ascenso de ambos métodos el modelo que mejor define a los datos experimentales es el de Oswald-de Waele, con un coeficiente de determinación (r^2) superior a 0.991, los parámetros reológicos de este modelo se presentan en el cuadro 12

Cuadro 12. Parámetros reológicos del modelo de Oswald-de Waele de la pulpa de guayaba a diferentes temperaturas para ambos métodos.

	Método 1			Método 2		
Modelo	Oswald-de Waele			Oswald-de Waele		
T (°C)	K (Pa.s ⁿ)	n	r ²	K (Pa.s ⁿ)	n	r ²
5	4.275 ±0.206 *4.825	0.473 ±0.005 *1.139	0.998	4.138 ±0.161 *3.880	0.478 ±0.007 *1.485	0.998
15	3.671 ±0.004 *0.101	0.469 ±0.001 *0.181	0.998	3.437 ±0.154 *4.466	0.477 ±0.009 *1.835	0.998
25	3.560 ±0.205 *5.749	0.451 ±0.008 *1.787	0.999	3.256 ±0.080 *2.454	0.464 ±0.005 *1.078	0.999
35	3.234 ±0.030 *0.938	0.442 ±0.011 *2.489	0.999	2.766 ±0.132 *4.761	0.464 ±0.023 *4.955	0.999
45	2.994 ±0.281 *9.394	0.435 ±0.015 *3.346	0.999	2.765 ±0.093 *3.375	0.441 ±0.007 *1.677	0.997
55	2.883 ±0.201 *7.083	0.426 ±0.003 *0.742	0.997	2.758 ±0.179 *6.505	0.415 ±0.011 *2.555	0.997
65	2.698 ±0.029 *1.077	0.400 ±0.002 *0.505	0.995	2.350 ±0.017 *7.246	0.408 ±0.005 *1.104	0.991

*coeficiente de variación (%)

En ambos métodos el índice de consistencia decrece con el incremento de la temperatura. En el método 1 disminuye un 36.88% de 4.275 a 2.698 Pa.sⁿ y en el método 2 un 43.20% de 4.138 a 2.350 Pa.sⁿ. El índice de comportamiento al flujo

disminuye con el aumento de la temperatura, aumentando su carácter fluidificante a causa de incrementar sus interacciones entre las partículas principalmente causado por la asociación o agregación entre las mismas por fuertes enlaces soluto-agua (Córdoba, 2005). Al igual que la presencia de fibra en la pulpa de guayaba permite formar una estructura organizada del sistema con el aumento de la temperatura (Grigelmo y col., 1999). En el método 1, el índice de comportamiento al flujo aumenta en un 15.43% de 0.473 a 0.4 y en el método 2 un 14.64% de 0.478 a 0.408. Si se considera sólo una cifra decimal en el valor del índice de comportamiento al flujo, para este parámetro la temperatura no influye ni el método de evaluación. Al igual que la pulpa de fresa, con el método 1 se obtienen valores mayores del índice de consistencia.

Comparando la pulpa de fresa y la pulpa de guayaba, considerando la temperatura de 5°C el índice de consistencia de la pulpa de guayaba es 52.53% mayor que la pulpa de fresa. En la pulpa de guayaba la temperatura no influye en el valor del índice de comportamiento.

Los valores de los parámetros reológicos obtenidos en este estudio no coinciden con los reportados por Andrade y col. (2009) y Cabral y col., (2007), para la pulpa de guayaba, el índice de comportamiento al flujo se encuentra en un intervalo de 0.164 a 0.613 y el índice de consistencia de 1.20 a 3.27 Pa.sⁿ, evaluados para una temperatura de 75 a 20 °C. Estas diferencias se deben a la concentración de sólidos solubles (25 a 36.1 °Bx) de las pulpas analizadas por estos autores.

Cómo en el caso de la pulpa de fresa, para la pulpa de guayaba se utilizó el método de diferencia mínima significativa (DMS), determinando si existe diferencia entre los valores de los parámetros reológicos al emplear el método 1 ó el método 2, las propuestas de hipótesis estadísticas empleadas son las mismas que para la pulpa de fresa (ecuación 19 y 20). En el Cuadro 13 se muestran los valores de DMS, el valor de la diferencia de medias y la aceptación de la hipótesis para el índice de consistencia y en el Cuadro 14 los resultados para el índice de comportamiento al flujo.

Cuadro 13. Valores de diferencia mínima significativa (DMS) del índice de consistencia a las diferentes temperaturas para la pulpa de guayaba

Temperatura (°C)	DMS	$X_{M1}-X_{M2}$	Hipótesis
5	0.694	0.137	Acepta H_0
15	0.408	0.233	Acepta H_0
25	0.584	0.304	Acepta H_0
35	0.479	0.468	Acepta H_0
45	0.787	0.229	Acepta H_0
55	0.715	0.075	Acepta H_0
65	0.459	0.347	Acepta H_0

Cuadro 14. Valores de diferencia mínima significativa (DMS) del índice de comportamiento al flujo a las diferentes temperaturas para la pulpa de guayaba.

Temperatura (°C)	DMS	$X_{M1}-X_{M2}$	Hipótesis
5	0.023	0.004	Acepta H_0
15	0.023	0.007	Acepta H_0
25	0.024	0.013	Acepta H_0
35	0.067	0.022	Acepta H_0
45	0.043	0.005	Acepta H_0
55	0.029	0.010	Acepta H_0
65	0.013	0.009	Acepta H_0

El valor de la diferencia entre las medias ($X_{M1}-X_{M2}$) es menor que la diferencia mínima significativa (DMS) en ambos parámetros reológicos se acepta H_0 , por lo que estadísticamente no existe diferencia significativa al emplear el método 1 ó el método 2 en la obtención del índice de consistencia y el índice de comportamiento al flujo para la pulpa de guayaba.

Cálculo de la viscosidad aparente a diferentes velocidades de cizalla.

Utilizando la ecuación 17 y los parámetros reológicos del modelo de Oswald-de Waele se calculó la viscosidad aparente para cada temperatura a diferentes velocidades de cizalla (1, 10, 100, 200, 300, 400, 500 s⁻¹). En el Cuadro 15 se presentan los valores de la viscosidad aparente la cual disminuye con el incremento de la temperatura y velocidad de cizalla.

Cuadro 15. Viscosidad aparente evaluada a diferentes velocidades de cizalla (1, 10, 100, 200, 300, 400 y 500 s⁻¹) y diferente temperatura (5, 15, 25, 35, 45, 55 y 65 °C) para la pulpa de guayaba por ambos métodos.

Método 1							
T (°C)	Viscosidad aparente (Pa.s)						
	1 s⁻¹	10 s⁻¹	100 s⁻¹	200 s⁻¹	300 s⁻¹	400 s⁻¹	500 s⁻¹
5	4.275	1.270	0.377	0.262	0.211	0.182	0.161
15	3.671	1.081	0.318	0.220	0.178	0.152	0.135
25	3.560	1.005	0.284	0.194	0.155	0.133	0.117
35	3.234	0.895	0.248	0.168	0.134	0.114	0.101
45	2.994	0.815	0.222	0.150	0.119	0.101	0.089
55	2.833	0.755	0.201	0.135	0.107	0.091	0.080
65	2.698	0.678	0.170	0.112	0.088	0.074	0.065
Método 2							
T (°C)	Viscosidad aparente (Pa.s)						
	1 s⁻¹	10 s⁻¹	100 s⁻¹	200 s⁻¹	300 s⁻¹	400 s⁻¹	500 s⁻¹
5	4.138	1.245	0.374	0.261	0.211	0.182	0.162
15	3.437	1.030	0.309	0.215	0.174	0.150	0.133
25	3.256	0.948	0.276	0.190	0.153	0.131	0.116
35	2.766	0.806	0.235	0.162	0.130	0.112	0.099
45	2.765	0.762	0.210	0.143	0.114	0.097	0.085
55	2.758	0.717	0.186	0.124	0.098	0.083	0.073
65	2.350	0.601	0.154	0.102	0.080	0.068	0.059

En ambos métodos, a la temperatura de 5 °C, la viscosidad aparente disminuye 96% con el incremento de la velocidad de cizalla de 1 a 500 s⁻¹. Considerando que la viscosidad aparente de la pulpa de fresa disminuye con el mismo porcentaje (96%), el efecto de la temperatura es similar en ambas pulpas, la diferencia es el valor de la viscosidad la cual depende de la propia naturaleza y la composición de la fruta.

3.5 Comportamiento al flujo de pulpa de mango

Cómo ya se ha presentado en las pulpas de fresa y guayaba, en la Figura 21 se presenta el esfuerzo de cizalla en función de la velocidad de cizalla de los dos métodos empleados en el estudio bajo cizalla rotacional de la pulpa de mango. La pulpa de mango presenta un comportamiento dependiente del tiempo presentando histéresis (método 2) la curva de flujo del primer ascenso de velocidad de cizalla (0.1 a 500 s⁻¹) no coincide con la curva de flujo de descenso de velocidad de cizalla (500 a 1 s⁻¹). Con los datos del cizallamiento constante se graficó la viscosidad en función del tiempo los cuales se presentan en la Figura 22. Se observa que la viscosidad decrece lentamente hasta un valor constante con el tiempo, como ya se ha explicado en la pulpa de fresa y guayaba, debido a la orientación o deformación de los sólidos por la acción de la cizalla (Windhab, 1995). A diferencia de la pulpa de fresa y guayaba, en la pulpa de mango el método de evaluación si afecta en las temperaturas superiores a 45°C. En el método 2 a la temperatura de 45, 55 y 65°C la viscosidad es constante en los primeros minutos del cizallamiento.

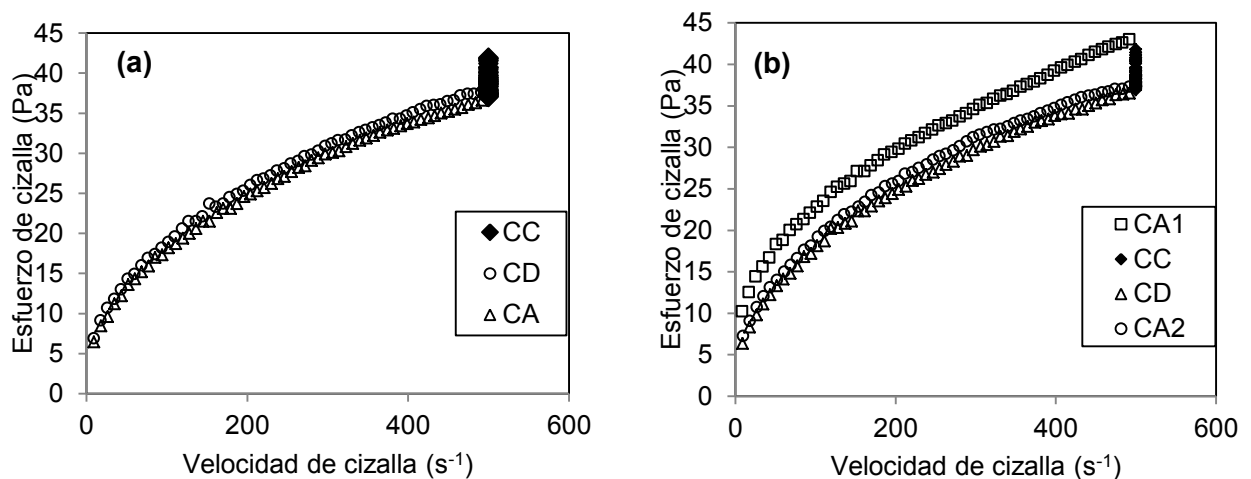


Figura 21. Esfuerzo de cizalla en función de la velocidad de cizalla de pulpa de mango a 5 °C (a) Método 1 (b) Método 2, cizalla constante (CC), curva de flujo de ascenso (CA) y curva de flujo de descenso (CD).

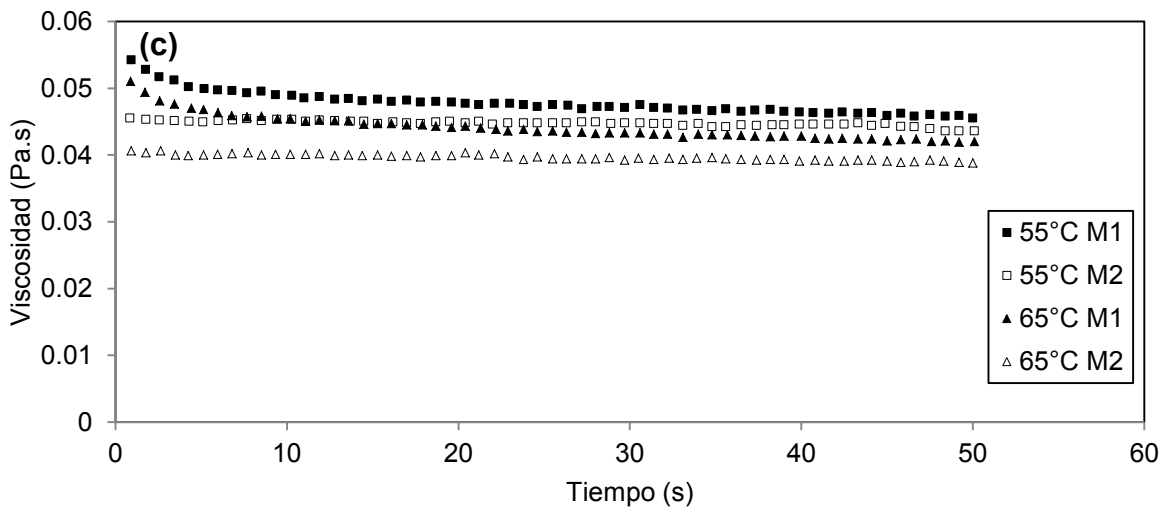
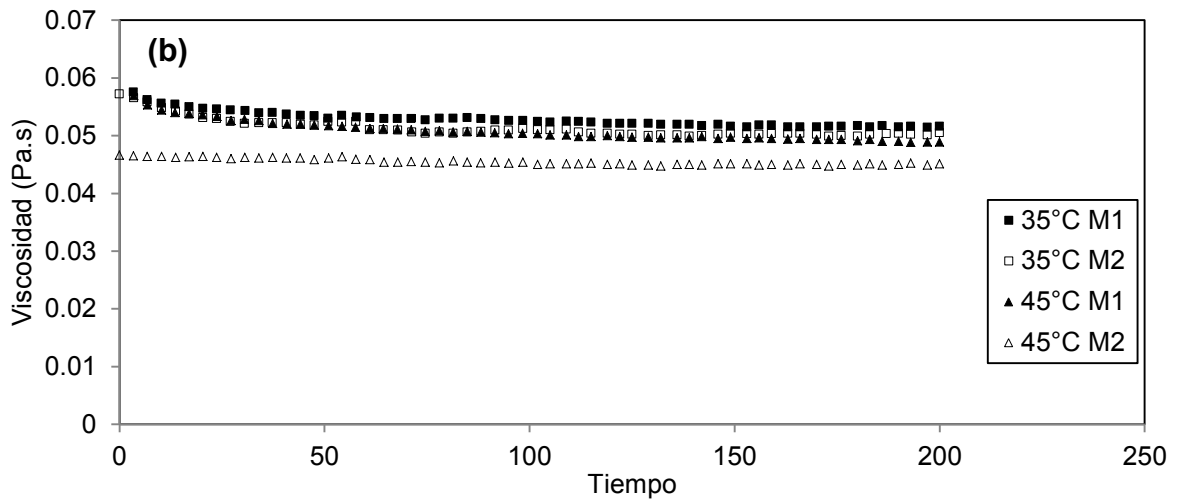
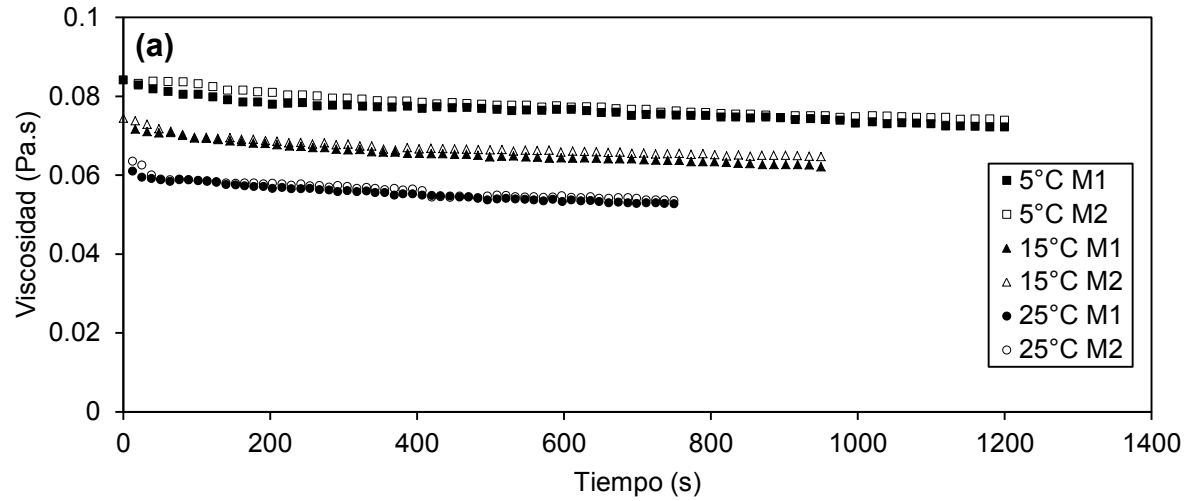


Figura 22. Viscosidad en función del tiempo de la pulpa de mango del Método 1 (M1) y método 2 (M2) (a) 5, 15, 25 °C (b) 35, 45 °C y (c) 55 y 65 °C.

Como en los casos anteriores se seleccionaron los valores de la viscosidad a un tiempo de 10 segundos y al tiempo final donde la viscosidad es independiente del tiempo para cada temperatura. Ambos valores se presentan en el Cuadro 16.

Cuadro 16. Tiempo de cizallamiento y viscosidad a las diferentes temperaturas de la pulpa de mango

Temperatura (°C)	Tiempo de cizallamiento (s)	Método 1			Método 2		
		η (Pa.s)	σ_s	C.V. (%)	η (Pa.s)	σ_s	C.V. (%)
5	10	0.084	0.001	0.7	0.083	0.001	0.7
	1200	0.072	0.001	0.8	0.074	0.001	1.7
15	10	0.071	0.001	0.4	0.071	0.002	2.2
	950	0.062	0.001	1.3	0.064	0.001	1.7
25	10	0.061	0.001	0.4	0.060	0.001	2.4
	750	0.054	0.001	1.3	0.053	0.01	3.0
35	10	0.058	0.001	0.9	0.057	0.001	2.4
	200	0.051	0.001	0.9	0.051	0.001	0.9
45	10	0.056	0.00	1.9	0.047	0.001	0.1
	200	0.048	0.001	1.6	0.045	0.001	1.7
55	10	0.054	0.001	5.5	0.045	0.001	2.6
	50	0.046	0.001	0.9	0.043	0.002	5.3
65	10	0.053	0.002	4.3	0.041	0.001	0.3
	50	0.043	0.002	4.2	0.039	0.001	1.3

En el método 1 la viscosidad disminuye un 48.19% de 0.084 a 0.043 Pa.s, en el método 2 disminuye un 53.01% de 0.083 a 0.39 Pa.s. En las tres pulpas el método 2 presenta un porcentaje mayor en la disminución de la viscosidad. En la pulpa de mango el efecto del método de evaluación es más importante en las temperaturas de 45, 55 y 65 °C, debido a su alto contenido de sólidos solubles como lo demostraron estudios realizados por Haminiuk y col., (2006), en pulpa de zarzamora, que a temperaturas superiores a 40°C se presentan mayores cambios a nivel molecular en la estructura de los componentes de la fase dispersa principalmente en carbohidratos simples.

Con las condiciones donde la viscosidad es independiente del tiempo, las muestras fueron cizalladas mediante una curva de flujo de descenso y ascenso presentando el comportamiento de la curva de descenso para ambos métodos y para cada temperatura en la Figura 23. En todas las muestras el comportamiento que presenta la pulpa de mango es no-newtoniano adelgazante a la cizalla, donde la viscosidad disminuye con el aumento de la velocidad de cizalla como se presenta en la Figura 24. El mismo comportamiento se presenta en la curva de flujo de forma ascendente (Anexo A.3).

El comportamiento adelgazante a la cizalla también ha sido descrito en estudios realizados por Vidal y col., (2004) y Dak y col., (2007) en pulpa de mango obtenida directamente sin procesamiento industrial y sin adición de otros componentes en la fruta de la misma variedad (*Mangifera indica*). Este tipo de comportamiento se debe al continuo rompimiento de los arreglos estructurales resultado de la baja resistencia del fluido (Rha, 1998); donde la presencia de carbohidratos en las pulpas de frutas como fructosa, glucosa y sacarosa de bajo peso molecular y las partículas en suspensión, son el factor de la explicación del comportamiento adelgazante a la cizalla en la caracterización de éste fluido (Dak y col., 2007).

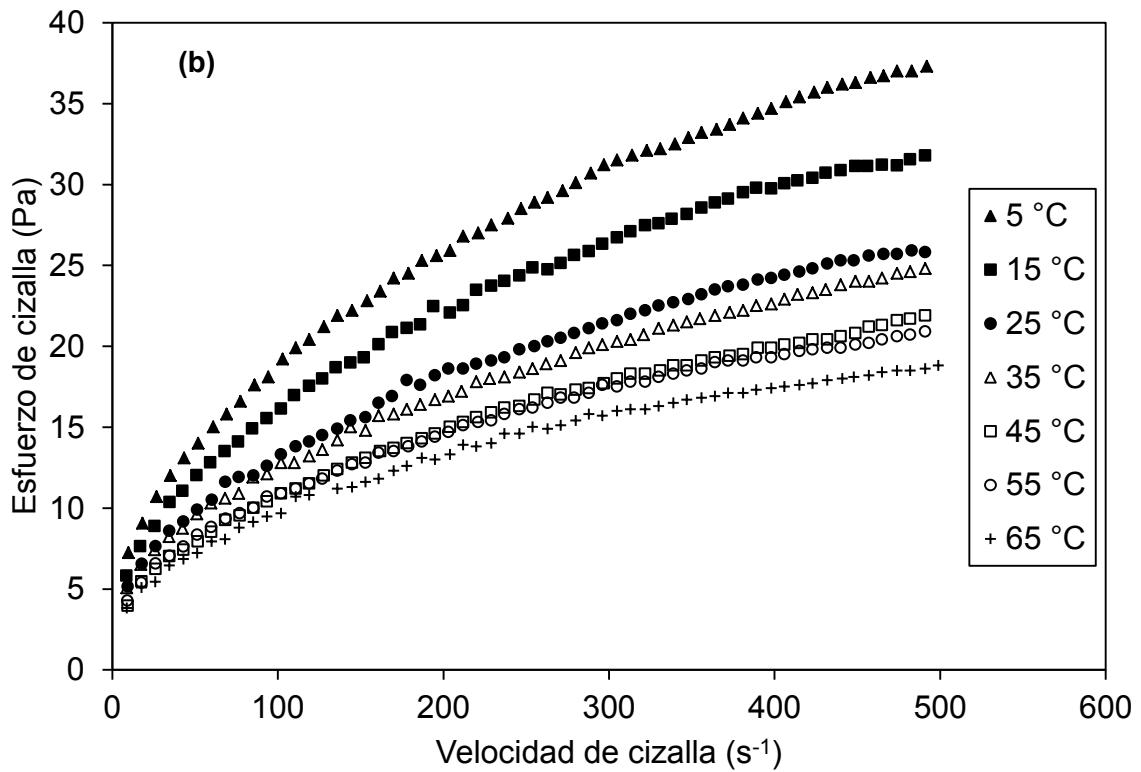
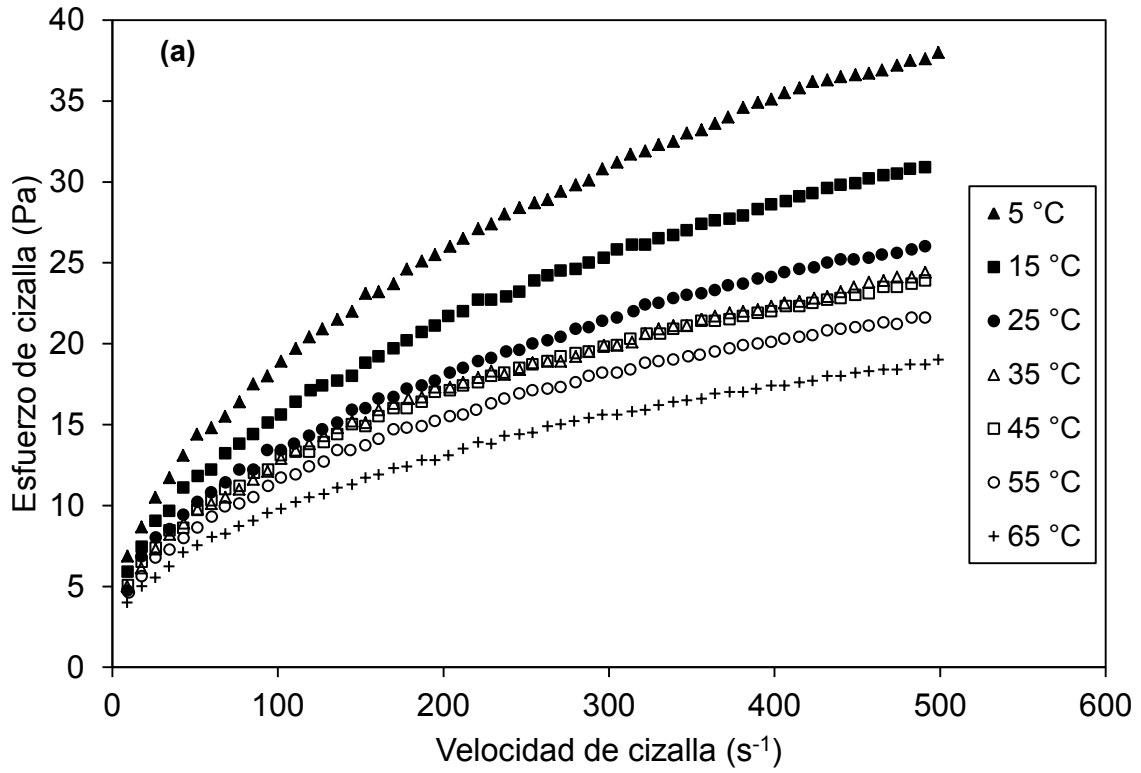


Figura 23. Esfuerzo de cizalla en función de la velocidad de cizalla de la pulpa de mango (a) Método 1 y (b) Método 2.

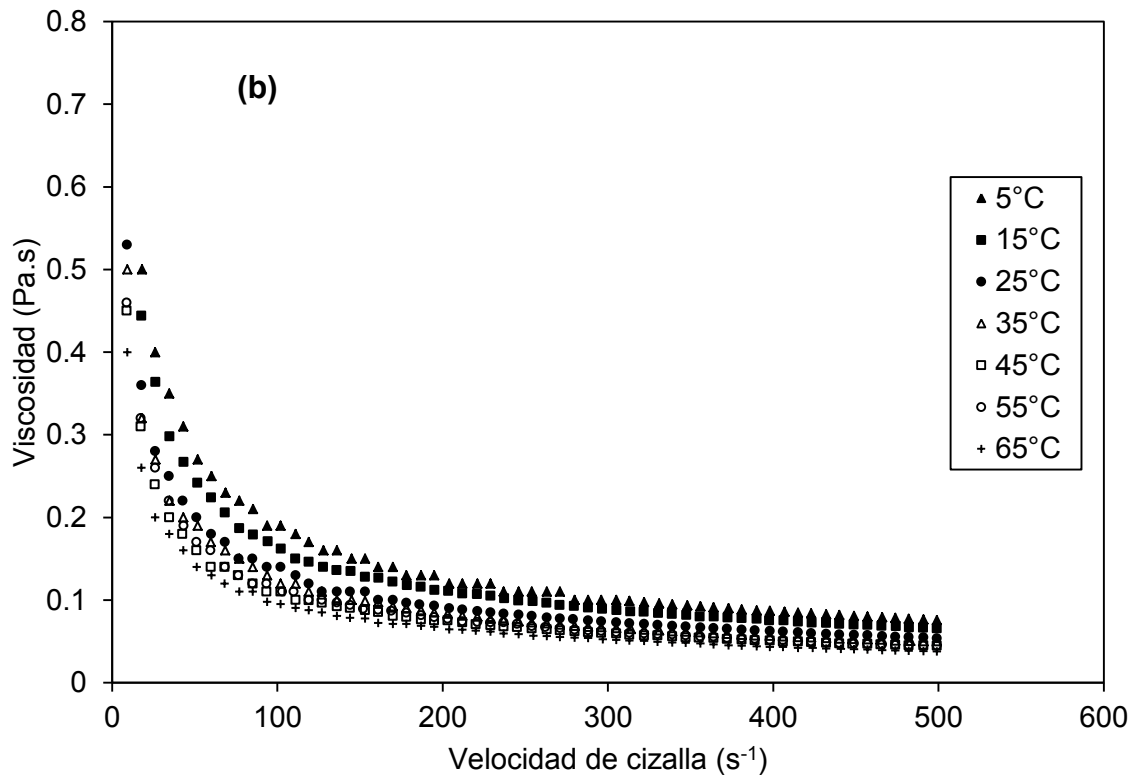
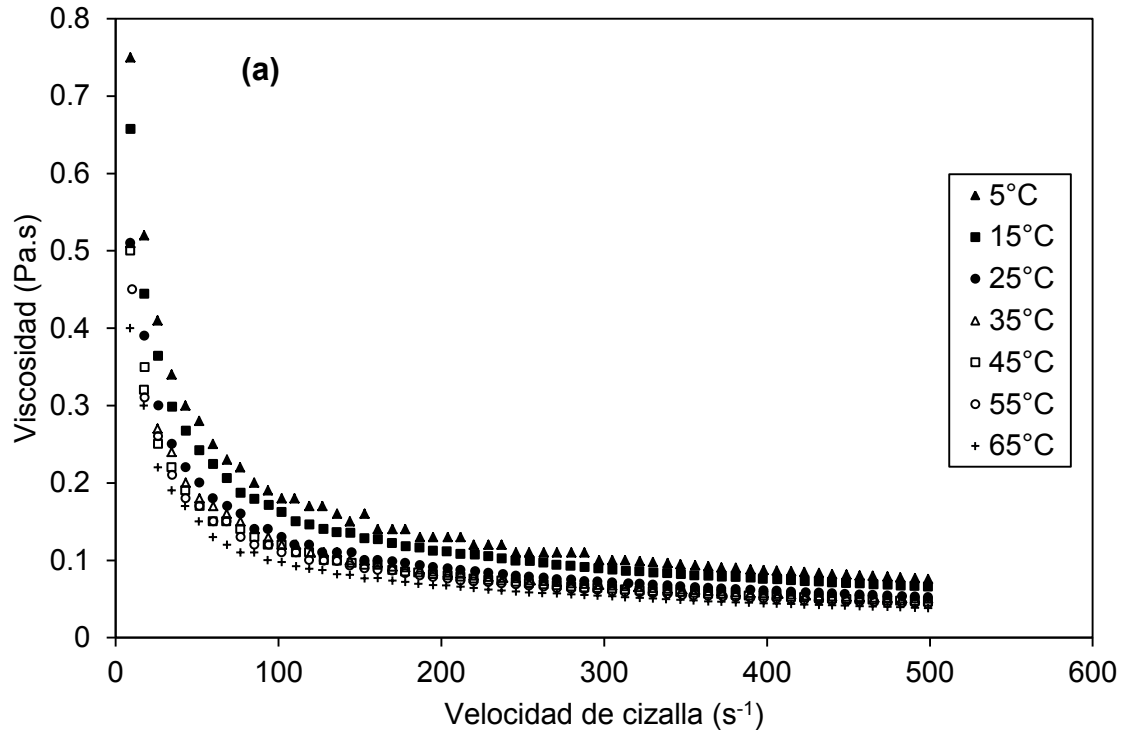


Figura 24. Viscosidad en función de la velocidad de cizalla de la pulpa de mango (a) Método 1 y (b) Método 2.

Los datos de la curva de flujo en descenso y ascenso son definidos por el modelo de Oswald-de Waele con un coeficiente de determinación superior a 0.998, en el Cuadro 17 se presentan los valores de los parámetros reológicos para éste modelo.

Cuadro 17. Parámetros reológicos del modelo Oswald-de Waele de la pulpa de mango a diferentes temperaturas para ambos métodos.

	Método 1			Método 2		
Modelo	Oswald-de Waele			Oswald-de Waele		
T (°C)	K (Pa.s ⁿ)	n	r ²	K (Pa.s ⁿ)	n	r ²
5	2.306 ±0.155 *5.001	0.446 ±0.007 *1.570	0.999	2.348 ±0.161 *3.880	0.458 ±0.007 *1.485	0.999
15	1.915 ±0.042 *2.211	0.451 ±0.002 *0.340	0.999	1.880 ±0.080 *4.248	0.459 ±0.006 *1.416	0.999
25	1.614 ±0.019 *1.203	0.452 ±0.004 *0.831	0.999	1.585 ±0.046 *2.881	0.456 ±0.002 *0.639	0.999
35	1.464 ±0.041 *2.828	0.461 ±0.005 *1.184	0.999	1.458 ±0.097 *6.650	0.460 ±0.012 *2.576	0.999
45	1.454 ±0.142 *9.758	0.451 ±0.013 *2.780	0.999	1.256 ±0.081 *6.449	0.464 ±0.014 *2.914	0.999
55	1.420 ±0.021 *1.468	0.445 ±0.004 *0.961	0.999	1.196 ±0.015 *1.232	0.463 ±0.012 *2.583	0.998
65	1.208 ±0.050 *4.124	0.455 ±0.004 *0.790	0.999	1.095 ±0.021 *1.951	0.464 ±0.003 *0.596	0.999

* Coeficiente de variación (%)

El valor del índice de consistencia tanto en el método 1 (2.306 a 1.208 Pa.sⁿ) como en el método 2 (2.348 a 1.095 Pa.sⁿ) disminuye con el incremento de la temperatura un 47.61% y 53.36% respectivamente. Sin embargo el valor del índice de comportamiento al flujo para ambos métodos no presenta una tendencia definida y en general se puede considerar con un valor de 0.4 por lo que puede inferirse que la temperatura y el método de evaluación no influyen en este parámetro, similar que en la pulpa de guayaba.

El índice de consistencia de la pulpa de mango es menor (46.06% por el método 1 y 43.24% por el método 2) que la pulpa de guayaba, pero mayor (12.03% por el método 1 y 16.53% por el método 2) que la pulpa de fresa.

Los resultados obtenidos en los parámetros reológicos realizado en este estudio, se encuentran dentro de los valores reportados por Vidal y col., (2006) y Dak y col., (2007) para el intervalo de temperatura de 10 a 70 °C, para pulpa de mango obtenida directamente de la fruta de la misma variedad (*Mangífera indica*); indicando para el índice de comportamiento al flujo un intervalo de 0.3 a 0.77 y de 0.45 a 2.89 Pa.sⁿ para el índice de consistencia.

Para determinar si existe diferencia en la obtención de los parámetros reológicos entre el método 1 y el método 2, al igual que en la pulpa de fresa y la pulpa de guayaba, se utilizó el método de diferencia mínima significativa (DMS), planteando las hipótesis estadísticas de las ecuaciones 19 y 20.

En el Cuadro 18 se muestran los resultados del cálculo de la diferencia mínima significativa (DMS), de la diferencia entre medias, así como la hipótesis de aceptación para el índice de consistencia y en el Cuadro 19 para el índice de comportamiento al flujo, evaluados para cada de temperatura.

Cuadro 18. Valores de diferencia mínima significativa (DMS) del índice de consistencia a las diferentes temperaturas para la pulpa de mango.

Temperatura (°C)	DMS	$X_{M1}-X_{M2}$	Hipótesis
5	0.366	0.042	Acepta H_0
15	0.240	0.035	Acepta H_0
25	0.131	0.029	Acepta H_0
35	0.280	0.005	Acepta H_0
45	0.434	0.198	Acepta H_0
55	0.267	0.223	Acepta H_0
65	0.144	0.113	Acepta H_0

Cuadro 19. Valores de diferencia mínima significativa (DMS) del índice de comportamiento al flujo a las diferentes temperaturas para la pulpa de mango.

Temperatura (°C)	DMS	$X_{M1}-X_{M2}$	Hipótesis
5	0.029	0.012	Acepta H_0
15	0.017	0.008	Acepta H_0
25	0.011	0.003	Acepta H_0
35	0.034	0.001	Acepta H_0
45	0.049	0.012	Acepta H_0
55	0.033	0.017	Acepta H_0
65	0.012	0.009	Acepta H_0

El valor de la diferencia entre medias ($X_{M1}-X_{M2}$) es menor que la diferencia mínima significativa (DMS) en ambos parámetros reológicos, lo cual indica como en el caso de la pulpa de fresa y guayaba que no existe diferencia al emplear el método 1 ó el método 2 para la obtención de los parámetros reológicos de la pulpa de mango en el intervalo de temperatura de 5 a 65 °C.

Cálculo de la viscosidad aparente a diferentes velocidades de cizalla.

Con los parámetros reológicos del Oswald-de Waele y la ecuación 17 se calculó la viscosidad aparente de la pulpa de mango evaluada a diferentes velocidades de cizalla (1, 10, 100, 200, 300, 400, 500 s⁻¹) y en el intervalo de temperatura de 5 a 65 °C para ambos métodos. En el Cuadro 20 se presentan los valores de la viscosidad aparente la cual disminuye con el incremento de la temperatura y velocidad de cizalla, tendencias similares a la pulpa de fresa y guayaba.

Cuadro 20. Viscosidad aparente evaluada a diferentes velocidades de cizalla (1, 10, 100, 200, 300, 400 y 500 s⁻¹) y diferente temperatura (5, 15, 25, 35, 45, 55 y 65 °C) de la pulpa de mango por ambos métodos.

Método 1							
T (°C)	Viscosidad aparente (Pa.s)						
	1 s⁻¹	10 s⁻¹	100 s⁻¹	200 s⁻¹	300 s⁻¹	400 s⁻¹	500 s⁻¹
5	2.306	0.644	0.180	0.122	0.098	0.083	0.074
15	1.915	0.540	0.153	0.104	0.083	0.071	0.063
25	1.614	0.457	0.129	0.089	0.071	0.061	0.054
35	1.464	0.423	0.122	0.084	0.068	0.058	0.051
45	1.454	0.411	0.116	0.079	0.064	0.054	0.048
55	1.420	0.396	0.110	0.075	0.060	0.051	0.045
65	1.208	0.344	0.098	0.067	0.054	0.046	0.041
Método 2							
T (°C)	Viscosidad aparente (Pa.s)						
	1 s⁻¹	10 s⁻¹	100 s⁻¹	200 s⁻¹	300 s⁻¹	400 s⁻¹	500 s⁻¹
5	2.348	0.675	0.194	0.133	0.107	0.091	0.081
15	1.880	0.540	0.155	0.107	0.086	0.073	0.065
25	1.585	0.453	0.129	0.089	0.071	0.061	0.054
35	1.458	0.420	0.121	0.083	0.067	0.057	0.051
45	1.256	0.365	0.106	0.073	0.059	0.051	0.045
55	1.196	0.347	0.101	0.069	0.056	0.048	0.042
65	1.095	0.319	0.093	0.064	0.051	0.044	0.039

El valor de la viscosidad aparente en la pulpa de mango también disminuye un 96% de la velocidad de cizalla de 1 a 500 s⁻¹ para la temperatura de 5°C. Por lo que el efecto de la temperatura en las tres pulpas estudiadas es el mismo, las diferencias se deben a la naturaleza y composición de la fruta como ya se explicó en el caso de la pulpa de guayaba.

3.6 Energía de activación

Para determinar el efecto que la temperatura ejerce sobre la viscosidad reportada por el software del reómetro y viscosidad aparente en las pulpas de fresa, guayaba y mango para cada método, se ajustó a una ecuación de tipo Arrhenius en condiciones de equilibrio y no equilibrio.

3.6.1 Energía de activación en condiciones de equilibrio

Las condiciones de equilibrio son consideradas cuando el valor de la viscosidad es constante con el tiempo de cizallamiento y posteriormente se realizó la curva de flujo de descenso de velocidad de cizalla. Con los parámetros de esta curva de flujo se calculó la viscosidad aparente (Cuadros 10, 15 y 20). En la Figura 25 se representa el logaritmo natural de la viscosidad aparente ($\ln \eta$) en función al inverso de la temperatura (K^{-1}) donde, de la pendiente, se calcula la energía de activación (E_a) si se divide entre la constante de los gases (R) y del antilogaritmo de la ordenada al origen, se calcula la viscosidad aparente a una temperatura infinita (η_∞), las líneas continuas corresponden a la ecuación de regresión para la pulpa de fresa. Se tiene la misma tendencia en las pulpas de guayaba y mango las cuales se presentan en el anexo B.

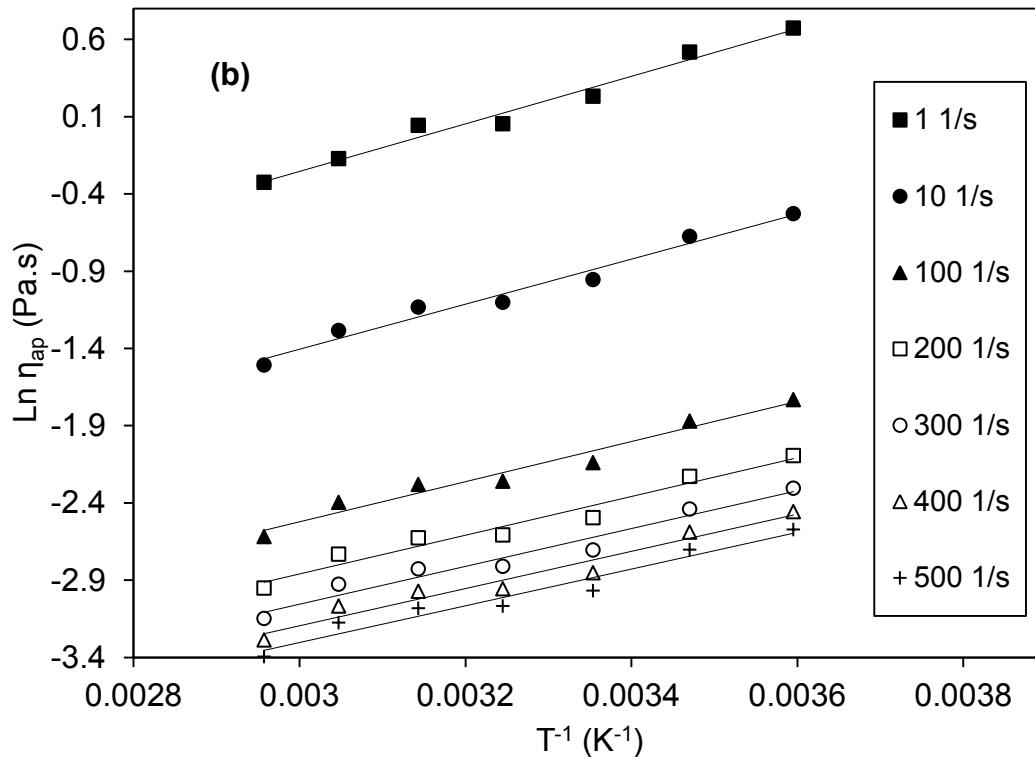
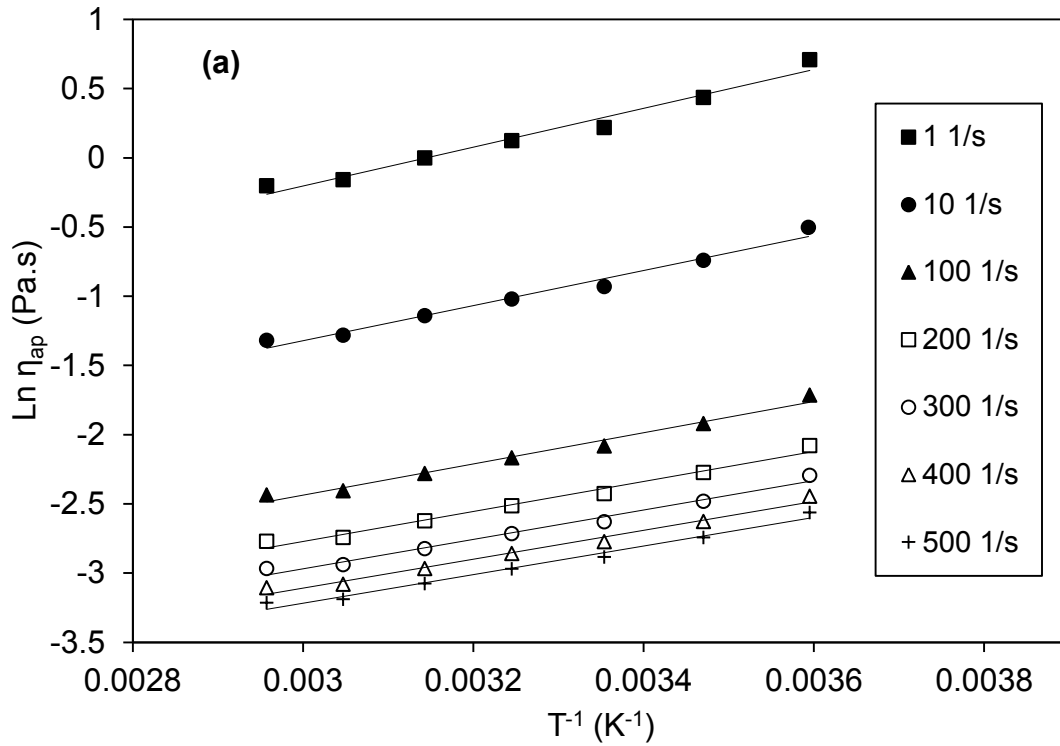


Figura 25. Logaritmo natural de la viscosidad aparente en función del inverso de la temperatura para la pulpa de fresa (a) Método 1 y (b) Método 2 a diferentes velocidades de cizalla.

Los valores de los parámetros de la ecuación de Arrhenius para la viscosidad aparente, de la pulpa de fresa, guayaba y mango para cada velocidad de cizalla se muestran en el Cuadro 21 de ambos métodos.

Cuadro 21. Parámetros del modelo de Arrhenius para evaluar el efecto de la temperatura en la viscosidad aparente de las pulpas comerciales a diferentes velocidades de cizalla.

Pulpa	$\dot{\gamma}$ (s ⁻¹)	Método 1			Método 2		
		E _a (kJ/gmol)	η_{∞} (Pa.s)	r ²	E _a (kJ/gmol)	η_{∞} (Pa.s)	r ²
Fresa	1	11.7	1.21E-02	0.974	12.2	5.82E-03	0.981
	10	10.5	5.97E-03	0.977	12.1	3.08E-03	0.975
	100	9.4	2.97E-03	0.981	10.8	1.63E-03	0.964
	200	9.0	2.40E-03	0.982	10.4	1.34E-03	0.960
	300	8.8	2.12E-03	0.983	10.2	1.20E-03	0.957
	400	8.7	1.95E-03	0.984	10.0	1.11E-03	0.955
	500	8.6	1.82E-03	0.984	9.9	1.04E-03	0.953
Guayaba	1	5.8	3.35E-01	0.983	6.5	2.38E-01	0.924
	10	7.9	4.16E-02	0.995	8.8	2.74E-02	0.981
	100	9.9	5.16E-03	0.995	11.0	3.16E-03	0.993
	200	10.5	2.75E-03	0.994	11.7	1.65E-03	0.993
	300	10.9	1.91E-03	0.994	12.1	1.13E-03	0.993
	400	11.2	1.47E-03	0.993	12.4	8.54E-04	0.992
	500	11.5	1.14E-03	0.993	12.6	6.99E-04	0.992
Mango	1	7.5	8.53E-03	0.924	9.7	3.39E-02	0.976
	10	7.4	2.52E-02	0.945	9.5	1.06E-02	0.973
	100	7.3	7.43E-03	0.962	9.2	3.33E-03	0.969
	200	7.2	5.14E-03	0.966	9.2	2.35E-03	0.968
	300	7.2	4.15E-03	0.968	9.1	1.92E-03	0.967
	400	7.2	3.56E-03	0.969	9.1	1.66E-03	0.966
	500	7.2	3.17E-03	0.970	9.1	1.48E-03	0.966

La energía de activación al flujo para la pulpa de guayaba por ambos métodos aumenta conforme se incrementa la velocidad de cizalla, es decir que a una velocidad de cizalla baja se necesita un valor bajo de energía de activación (Cuadro 21); en estas condiciones las interacciones entre partículas son menores. Al aumentar la velocidad de cizalla las partículas se orientan de forma homogénea, incrementando los enlaces entre partículas de la pulpa de guayaba, haciendo que la energía de activación necesaria para poder fluir sea mayor (Ramírez, 2006).

En el caso de la pulpa de mango y fresa la energía de activación al flujo tiene una relación inversa al aumento de la velocidad de cizalla (Cuadro 21), conforme aumenta la velocidad de cizalla, las partículas de la fase dispersa, que en un principio se encuentran formando parte de redes y aglomerados entre los componentes de la fase dispersa, son separadas por la acción de la cizalla debilitando los enlaces interpartícula, provocando de este modo que la energía necesaria para poder fluir, disminuya conforme aumenta la velocidad de cizalla (Rha, 1998).

El valor de la energía de activación al flujo es menor en la pulpa de mango, ya que al tener las partículas de menor tamaño, tiende a hacer interacciones débiles entre las partículas y con ello se requiere un menor valor de energía de activación, por lo que se supone que el tamaño de partícula influye directamente en la energía de activación de cada pulpa de fruta.

La viscosidad aparente a una velocidad de cizalla de 1 s^{-1} corresponde al valor del índice de consistencia, por ello que el valor de la energía de activación para la velocidad de cizalla de 1 s^{-1} corresponda al valor de la energía de activación para el índice de consistencia. Analizando sólo los valores de los parámetros del modelo de Arrhenius a esta velocidad de cizalla en el Cuadro 21, la pulpa de fresa es más sensible a los cambios ocasionados por la temperatura al obtener los valores mayores en la energía de activación (Steffe, 1996), resultando ser 50.4% superior a la pulpa de guayaba y 35.9% a la pulpa de mango en el método 1 y 46.7% a la pulpa de guayaba y 20.5% a la pulpa de mango en el método 2, estos resultados concuerdan a lo reportado con el efecto causado por la temperatura en el índice de consistencia para la pulpa de fresa (apartado 3.3) donde en comparación de la pulpa de guayaba y mango, ocurre un mayor descenso en el índice de consistencia ocasionado por la temperatura disminuyendo su valor un 59.7% en el método 1 y un 65.8% en el método 2.

Los valores obtenidos de la energía de activación por este estudio son menores a los reportados en productos similares debido a la forma de obtención de cada producto, a la adición de otros componentes y el intervalo de temperatura en el cual se llevó cada estudio (Cuadro 22).

Cuadro 22. Valores de índice de consistencia y energía de activación en diferentes productos derivados de fruta.

Producto	Intervalo de T (°C)	Intervalo de K (Pa.s ⁿ)	E _a (kJ/gmol)	Referencia
Pasta de jengibre	25 a 65°	2.93-2.69	46.2	Ahmed, 2004
Pulpa de mango	10 a 60	2.89-0.45	13.7	Vidal y Gasparetto, 2000
Pulpa de zapote	10 a 65	6.37-3.80	23.9	Andrade y col., 2010

Los valores de la energía de activación (E_a) del Cuadro 21 se graficaron en función de la velocidad de cizalla la cual se muestra en la Figura 26.

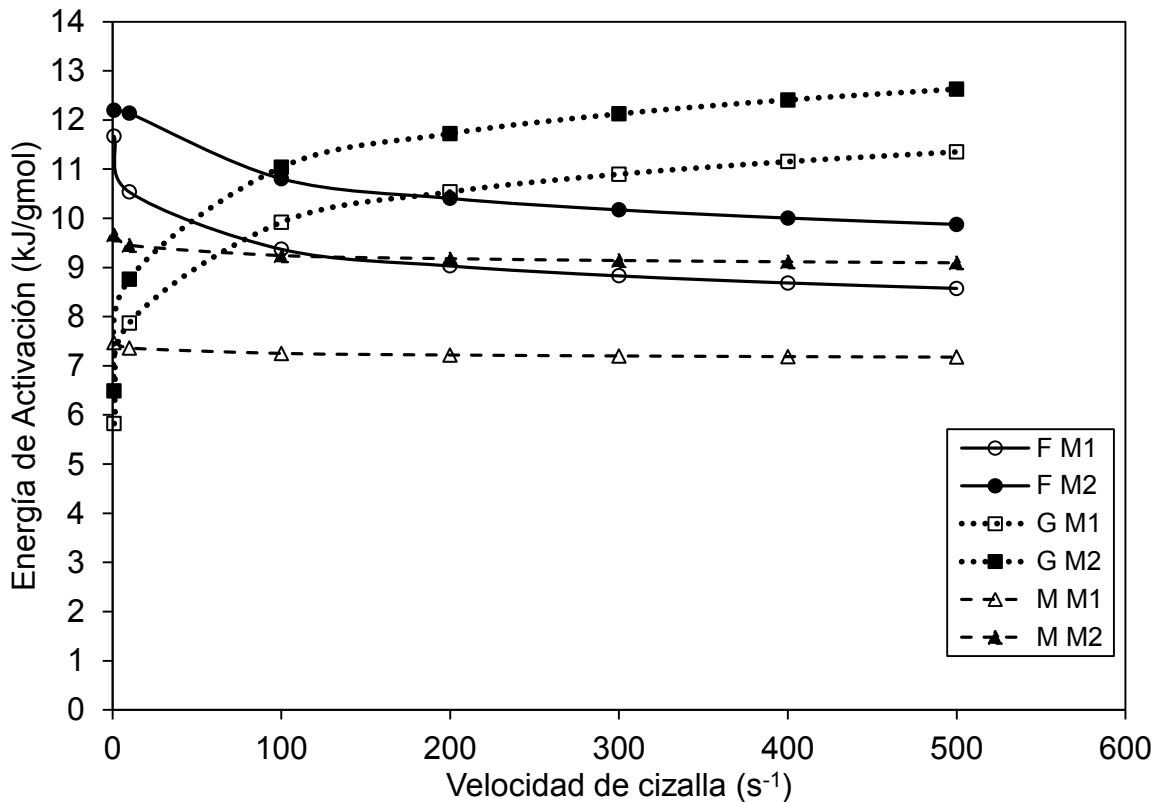


Figura 26. Energía de activación en función de la velocidad de cizalla de la pulpa comercial de fresa (F), guayaba (G) y mango (M) para el Método 1 (M1) y Método 2 (M2).

Se observa que en todas las pulpas el valor de la energía de activación es menor cuando se utiliza el método 1. En la pulpa de fresa los valores E_a son muy cercanos para ambos métodos si se considera la velocidad de cizalla de $1 s^{-1}$ y disminuye con el incremento de la velocidad de cizalla. En la pulpa de guayaba el método utilizado afecta el valor de la E_a con una diferencia de una unidad. En esta pulpa la E_a aumenta con el aumento de la velocidad de cizalla. En la pulpa de mango la diferencia de la E_a entre ambos métodos es de 2 unidades y su valor es constante con el incremento de la velocidad de cizalla. El valor de la energía de activación es menor para la pulpa de mango y mayor para la pulpa de guayaba cuando la velocidad de cizalla es superior a $100 s^{-1}$.

En el caso de la pulpa de mango para ambos métodos en el intervalo de velocidades de cizalla de 10 a 500 s⁻¹, la energía de activación permanece constante, por lo que una vez que se han alcanzado condiciones de equilibrio las moléculas se han alineado en dirección del flujo y con ello, la energía de activación al flujo es una constante en ambos métodos.

3.6.2 Energía de activación en condiciones de no equilibrio

El efecto de la temperatura también se analizó para la viscosidad en condiciones de no equilibrio seleccionando la viscosidad determinada por el software del equipo a un tiempo de 10 s de la curva de cizallamiento constante del método 1, así como a la viscosidad reportada por el equipo de la primer curva de flujo de ascenso del método 1 a una velocidad de cizalla de 10 y 500 s⁻¹. Los parámetros del modelo de Arrhenius para estas condiciones son presentados en el Cuadro 23.

En el Cuadro 24 se presentan los parámetros del modelo de Arrhenius del efecto de la temperatura para la viscosidad en condiciones de equilibrio. En este caso los valores se obtuvieron en base a la viscosidad reportada por el software del equipo de la curva de velocidad de cizalla constante (500 s⁻¹) en el momento durante el cual, la viscosidad permaneció independiente de la velocidad de cizalla.

Así mismo en el Cuadro 24, la energía de activación se calculó en base a la viscosidad aparente para una velocidad de cizalla de 10 s⁻¹ y 500 s⁻¹, a partir de los parámetros reológicos del ajuste en el modelo de Oswald de Waele de la curva de descenso de velocidad de cizalla, reportando el promedio de ambos métodos de estudio.

Cuadro 23. Parámetros del modelo de Arrhenius en las pulpas de fresa, guayaba y mango en condiciones de no equilibrio.

Pulpa	No equilibrio								
	Cizallamiento constante (500 s ⁻¹) a 10 s			Primer curva de flujo de ascenso de velocidad de cizalla a 10 s ⁻¹			Primer curva de flujo de ascenso de velocidad de cizalla a 500 s ⁻¹		
	E _a (kJ/gmol)	η _∞ (Pa.s)	r ²	E _a (kJ/gmol)	η _∞ (Pa.s)	r ²	E _a (kJ/gmol)	η _∞ (Pa.s)	r ²
Fresa	9.3	1.52E-03	0.993	10.7	3.21E-03	0.986	10.2	9.62E-04	0.991
Guayaba	9.6	4.00E-03	0.985	9.4	4.80E-02	0.966	12.0	9.60E-04	0.997
Mango	5.7	6.61E-03	0.902	7.4	3.16E-02	0.940	9.7	1.22E-03	0.979

Cuadro 24. Parámetros del modelo de Arrhenius en las pulpas de fresa, guayaba y mango en condiciones de equilibrio.

Pulpa	Equilibrio								
	Cizallamiento constante (500 s ⁻¹)			Parámetros reológicos de la curva de descenso a 10 s ⁻¹			Parámetros reológicos de la curva de descenso a 500 s ⁻¹		
	E _a (kJ/gmol)	η _∞ (Pa.s)	r ²	E _a (kJ/gmol)	η _∞ (Pa.s)	r ²	E _a (kJ/gmol)	η _∞ (Pa.s)	r ²
Fresa	9.4	1.33E-03	0.997	11.3	4.53E-03	0.977	9.3	1.43E-03	0.984
Guayaba	11.3	1.30E-03	0.996	8.4	3.45E-02	0.995	12.1	9.20E-04	0.993
Mango	6.4	5.49E-03	0.999	8.4	1.80E-02	0.973	8.2	2.32E-03	0.970

Considerando sólo las condiciones de cizallamiento constante, se obtuvieron valores mayores de energía de activación para las tres pulpas cuando la viscosidad es independiente al tiempo de cizallamiento (equilibrio). En estado de equilibrio las partículas sólidas y componentes de la fase dispersa, se encuentran próximas unas de otras, lo que hacen que se formen redes o mallas que atrapan la fase dispersa de forma homogénea, provocando de este modo que la energía necesaria para poder fluir sea mayor. Siendo para la pulpa de fresa 1.06% mayor la energía de activación por el método 1 respecto al método 2, para la pulpa de guayaba 15.04% superior y 10.94% mayor para la pulpa de mango.

De forma general, se obtienen mayores valores de energía de activación en condiciones de equilibrio para la pulpa de guayaba (12.1 kJ/gmol) al calcularse mediante la viscosidad aparente obtenida de los parámetros reológicos de la curva de flujo de ascenso de velocidad de cizalla a 500s^{-1} . En la pulpa de guayaba a diferencia de la pulpa de fresa y mango, las partículas sólidas de la fase dispersa son de mayor dimensión y poco afectadas por el efecto de la cizalla durante el cizallamiento constante (reducción de 3.42%); por lo cual el espacio entre cada partícula y su distribución homogénea es menor, permitiendo con ello formar fuertes enlaces estructurales e hidrodinámicos así cómo entre soluto-agua, lo que hace que se requiera de una mayor energía de activación para poder desplazar una partícula de otra (Windhab, 1995).

Tanto en condiciones de equilibrio como en condiciones de no equilibrio se obtuvo la mayor energía de activación en la pulpa de guayaba (12 y 12.1 kJ/gmol). Esto indica que las interacciones entre las partículas de la guayaba tienden a ser fuertes, ya que la energía de activación es una barrera que se tiene que vencer para que las moléculas se muevan de una posición a otra y esta depende de las interacciones existentes entre las moléculas, por lo tanto en un sistema con enlaces fuertes, la energía de activación es mayor (Tonon y col., 2009). El valor mayor de energía de activación en la pulpa de guayaba indica un rápido cambio ocasionado en la viscosidad de la pulpa a causa de la temperatura (Steffe, 1996).

La energía de activación para la pulpa de mango tiende a ser mayor en condición de no equilibrio, calculada en base a la viscosidad reportada durante la primer curva de ascenso de velocidad de cizalla a 500s^{-1} . En condición de no equilibrio previo al cizallamiento constante, las partículas de la pulpa de mango tienen una mayor dimensión en su tamaño, formando fuertes interacciones y enlaces, los cuales disminuyen por la acción de la cizalla al pasar a un estado de equilibrio, homogeneizando el sistema de acuerdo a la organización estructural orientada por la dirección del flujo (Ramírez, 2006). Al disminuir la dimensión del tamaño de las partículas, se aumentan los espacios entre los sólidos insolubles, haciendo que la energía de activación necesaria para desplazar a las partículas; unas de otras sea menor en condiciones de equilibrio, ya que cuentan con el suficiente espacio para poder ocupar el espacio contiguo.

La energía de activación para la pulpa de mango fue la más baja, reportando en condición de no equilibrio un valor de 5.7 kJ/gmol debido a que el tamaño como la distribución de formas en las partículas encontradas en la observación microscópica fue la de menor dimensión respecto a las tres pulpas, por lo cual las interacciones a nivel estructural son mínimas y con ello, la energía de activación que se requiere sea menor.

Los valores de energía de activación obtenidos en este estudio para las tres pulpas comerciales de frutas, se encuentran por debajo de los valores reportados en el Cuadro 2 en productos similares a base de frutas, posiblemente se debe a la concentración de sólidos solubles manejada por estos estudios, las cuales son superiores a las reportadas en este trabajo, que se encuentran en un intervalo de 20 a $79\text{ }^\circ\text{Bx}$, otro factor es el intervalo de temperatura a la cual se realiza cada estudio, así como la composición y forma de obtención de cada uno de los productos provenientes de frutas.

IV. CONCLUSIONES

1. Las pulpas presentaron, en el intervalo de temperatura estudiado (5 a 65°C), un comportamiento dependiente del tiempo y en condiciones de equilibrio, el modelo reológico que mejor definió los datos experimentales es el descrito por el modelo de Ostwald-de Waele tipo adelgazante a la cizalla, donde el índice de consistencia disminuye su valor con el incremento de la temperatura y el índice de comportamiento al flujo no presenta una tendencia definida a la temperatura.
2. Estadísticamente el método de evaluación no afectó los valores de la viscosidad y de los parámetros reológicos de las pulpas comerciales estudiadas.
3. El índice de consistencia de la pulpa de guayaba fue 52.54% mayor que la pulpa de fresa y 44.62% que la pulpa de mango. El índice de comportamiento al flujo se encontró en un intervalo de 0.462 a 0.518 en la pulpa de fresa, de 0.400 a 0.478 en la pulpa de guayaba y en la pulpa de mango de 0.445 a 0.464. El índice de comportamiento al flujo de la pulpa de mango no es afectado por la temperatura.
4. La energía de activación al flujo en el intervalo de velocidad de cizalla de 10 a 500 s⁻¹ sigue una relación inversa, para el caso de la pulpa de fresa (11.8 a 8.7 kJ/gmol) y de la pulpa de mango (9.7 a 7.0 kJ/gmol), mientras que en la pulpa de guayaba tiene una relación directa (5.8 a 12.7 kJ/gmol).
5. La energía de activación de la pulpa de fresa y de la pulpa de guayaba es mayor en condición de equilibrio (11.1 y 12.1 kJ/gmol respectivamente), mientras que para la pulpa de mango la energía de activación mayor es en condición de no equilibrio (9.7 kJ/gmol).

6. La energía de activación al flujo depende de la conformación estructural de cada pulpa de fruta; concentración de sólidos totales, sólidos solubles, sólidos insolubles (concentración, tamaño y forma). Siendo mayor la energía de activación de este estudio para la pulpa de guayaba.

V. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Aguado, J. (2003). Ingeniería de la industria alimentaria: Conceptos básicos. Zaragoza, España: Síntesis.
- Ahmed, J. (2004). Effect of temperature on rheological characteristics of ginger paste. *International Journal of Food Science & Technology*. 23: 34-39.
- Ahmed, J., Ramaswamy, H. y Hiremath, N. (2005). The effect of high pressure treatment on rheological characteristics and color of mango pulp. *International Journal of Food Science & Technology*. 40: 885-895.
- Alvarado, J. (2001). Ingeniería de la industria alimentaria. España: Síntesis.
- AOAC. (1984). Official Methods Of Analysis (14th ed) Association Of Official Analytical Chemist. Washington, D.C.
- Andrade, R., Torres, R., Montes, E. y Pérez, O. (2009). Efecto de la temperatura en el comportamiento reológico de la pulpa de níspero. *Revista de la Facultad de Agronomía*, 26: 599-612.
- Andrade, R., Torre, R., Montes, E., Pérez, O., Bustamante, C. y Mora, B. (2010). Effect of temperature on the rheological behavior of zapote pulp (*Calocarpum sapota merr*). *Revista de Tecnología e ingeniería*. 33: 138-144.
- Augusto, P., Cristianini, M. y Ibarz A. (2011). Effect of temperature on dynamic and steady-state shear rheological properties of siriguela (*Spondias purpurea L.*) pulp. *Journal of Food Engineering*. 108: 283-289.
- Barnes, H. (1997). Thixotropy - a review. *Journal Fluid Mech*. 70: 1-33.
- Bertoumeo, J. y García, A. (2009). Instrumentos científicos. México. Consultado 22 de noviembre del 2011. Disponible en: <http://xurl.es/g13uq>
- Bird, R., Stewart, E. y Lightfoot, E. (1992). Fenómenos de transporte. México: Reverté.
- Brand-Design (2011). Ohaus scales: Cooper instruments & systems. USA. Consultado 06 de diciembre del 2011 Disponible en: <http://xurl.es/6ilnq>
- Cabral, R., Telis-Romero, J., Telis, V., Gabas, A. y Finzer J. (2007). Effect of apparent viscosity on fluidized bed drying process parameters of guava pulp. *Journal of Food Engineering*. 80: 1096-1106

- Camacho, O. (2010). Procesamiento y conservación de frutas. Universidad Nacional de Colombia sede Bogotá (en línea). Colombia. Consultado 20 de septiembre, 2011. Disponible en: <http://xurl.es/e55c8>
- Cepeda, E. y Villaran, M. (1999). Density and viscosity of *Malus floribunda* juices as a function of concentration and temperature. *Journal of Food Engineering*, 54: 103-107.
- Chang, Y. y Hartel R. (1997). Flow properties of freeze-concentrated skim milk. *Journal of Food Engineering*. 31: 375-386
- Córdoba, A. (2005). Caracterización de propiedades relacionadas con la textura de suspensiones de fibras alimentarias. Universidad politécnica de Valencia. Departamento de Tecnología de Alimentos (Food Science and Technology International). Valencia. España. Consejo superior de investigaciones científicas.
- Costell, E. y Durán, L. (1982). Reología fisico-química de los zumos y purés de fruta. *Agroquímica Tecnología Alimentaria*. 22: 80-84.
- Dak, M., Verma, R. y Sharma, G. (2006). Flow characteristics of juice of “*Totapuri*” mangoes. *Journal of Food Engineering*. 76: 557-561.
- Dak, M., Verna, R. y Jaaffrey S. (2007). Effect of temperature and concentration on rheological properties of “*Kesar*” mango juice. *Journal of Food Engineering*. 80: 1011-1015.
- Daub, A. (2008). Modeling on rheological properties of tropical fruit juices. *Research Somche*. 39: 851-856
- Dolz, M., Hernández, M., Cabezas, C., Casanovas, A. y Delgado, J. (2004). Analysis of stability of food emulsions by Eyring's theory: Influence of different biopolymers. *Journal of Applied Polymer Science*, 43: 2653-2657.
- Dondé, M. (2005). Transporte de momentum y calor: Teoría y aplicaciones a la ingeniería de proceso. México: UADY.
- Ferreira, G., Melo, A., Da-Conceicao, R. y Gasparetto C. (2002). Efeito da temperatura no comportamento reológico das polpas de caju e goiaba. *Ciencias da Revista*. 4: 175-184.

- Gaetano, A. (1991). Procesamiento de frutas y hortalizas durante procesos artesanales y de pequeña escala. Santiago de Chile: Oficina Regional de la FAO.
- Garza, S. (1999). Caracterización reológica, microbiológica y cinéticas de deterioro en cromogenado de melocotón. Tesis doctoral de la Universidad de Lleida. Biblioteca virtual Miguel de Cervantes, España. 12: 1-74.
- Geankoplis, C. (1998). Proceso de transporte y operaciones unitarias. México: CECSA.
- Gélvez, C. (1998). Manejo Post-cosecha y comercialización de Guayaba (*Psidium guajava L.*). Convenio SENA: Colombia
- Goodwin, J. y Hughes, R. (2000). Rheology for chemist on introduction. UK: Royal Society of Chemistry.
- Grigeldo, M., Gorinstein, S. y Martín, O. (1999). Characterization of peach dietary fiber concentrate as food ingredient. Food Chemistry. 65, 175-181.
- Haminiuk, C., Sierakowski, M., Vidal, J. y Masson, M. (2006). Effect of Heat Treatment on Pectic Fractions and Apparent Viscosity of Whole Blackberry (*Rubus spp.*) Pulp. Journal of Food Engineering. 39: 426-430.
- Hermida, J. (2000). Fundamentos de ingeniería de procesos agroalimentarios. Madrid: Mundi-prensa.
- Ibarz, A., Vicente, M. y Graell, J. (1988). Rheological behavior of Apple and pear juices and their concentrates. Journal of Food Engineering. 6: 257-267
- Ibarz, A. (1989). Rheological properties of clarified pear juice concentrates. Journal of Food Engineering. 10: 57-63.
- Ibarz, A., Pagán, J. y Sanz R. (1992). Rheology of clarified Fruit Juices. I: Blackcurrant Juices. Journal of Food Engineering. 15: 63-73.
- Ibarz, A. y Barbosa-Cánovas, G. (2000). Métodos experimentales de la ingeniería alimentaria. Zaragoza, España. Acribia.
- Ibarz, A. (2005). Operaciones unitarias en la ingeniería en alimentos. Madrid: Mundi-Prensa.
- Karazhiyan, H., Razavi, S., Philips, G., Fang, Y., Al-Assaf, S., Nishinari y Farhoosh, R. (2009). Rheological properties of *Lepidium sativum* seed

- extract as a function of concentration, temperature and time. *Food Hydrocolloids*. 23: 2062-2068.
- Khalil, K. (1989). Rheological Behaviour of clarified Banana Juice: Effect of Temperature and Concentration. *Journal of Food Engineering*, 2:231-240.
- Khalil, K. (1992). Rheological behaviour of clarified banana juice: effect of temperature and concentration. *Journal of Food Engineering*. 10: 231-240
- Laurencio, H. y Delgado, Y. (2009). Propiedades reológicas de emulsiones de petróleo en agua. *Revista Chilena de Ingeniería*. 16: 244-249.
- Lewis, M. (1993). Propiedades físicas de los alimentos y de los sistemas de procesado. Zaragoza, España: Acribia.
- Massa, A., González, C., Maestro, A., Labanda, J. y Ibarz, A. (2010). Rheological study of two peach purees. *Food Inova*. 19: 175-179.
- Moreno, A., Marín, M., Peña, D., Toyo, E. y Sandoval, L. (2009). Contenido de humedad, materia seca y cenizas totales en guayaba (*Psidium guajava L.*) cosechadas en granjas del municipio Mara del estado de Zulia. *Revista de la Facultad de Agronomía Universidad del Zulia*. 16: 1-10.
- Muller, H. (1988). Introducción a la reología de los alimentos. España: Acribia.
- Muñoz, E., Gallegis, C. y Flores V. (2008). Comparación de parámetros reológicos mediante la técnica de retroextrusión con los datos obtenidos por viscosimetría rotacional. *Ciencia e Ingeniería en alimentos*, 19: 93-99.
- Nindo, C., Tang, J.; Powers T. y Taknar P. (2005). Rheological properties of blueberry puree for processing applications. *Food Science and Technology*. 3: 23: 1-8
- Ortega, M. (2009). Comportamiento reológico de disoluciones acuosas de surfactantes comerciales no iónicos. Editorial de la Universidad de Granada. 20: 54-58.
- Osorio, O. (2008). Influencia de tratamiento térmico en la calidad y estabilidad del puré de fresa. Universidad politécnica de Valencia. Departamento de Tecnología de Alimentos (Food Science and Technology International). Valencia. España. Consejo superior de investigaciones científicas.

- Pelegrine, D., Silva, F. y Gasparetto, C. (2002). Rheological behavior of pineapple and mango pulps. *Food Science and Technology*. 35: 645-648.
- Primo, E. (1999). *Química agrícola: Alimentos*. Tomo III. Madrid: Alhambra.
- Qiu, C. y Rao, M. (1998). Role of pulp content and particle size in yield stress of apple sauce. *Journal of Food Science*. 4: 1165-1170.
- Ramírez, J. (2006). *Introducción a la reología de los alimentos*. Colombia: Universidad del Valle.
- Rao, M. (1987). Flow properties of concentrated juices at low temperatures. *Food Technology*. 11: 113-119.
- Rao, M. (1999). *Rheology of fluids and semisolid foods: Principles and Applications*. Gaithersburg, USA: Aspen publishers.
- Rao, M. y Quintero, C. (2005). *Rheological properties of solid food*. Engineering Properties of Food. USA: Taylor & Francis Group.
- Rha, C. (1998). Rheology of fluid foods. *Food Technology*. 32: 77-82
- Roudot, A. (2004). *Reología y análisis de la textura de los alimentos*. Zaragoza, España: Acribia.
- Salomón, D. (2001). Determinación de la energía de activación al flujo en ligantes asfálticos. *Technical, Quality, and Purchasing Manager*. 15: 3-19.
- Sánchez, C., Oria R. y Sánchez-Gimeno, A. (2006). Efecto de la temperatura en las propiedades reológicas de purés de guayaba (*Psidium Guajava L.*) España: Orihuela.
- Sand, F. (1996). Investigation of yeasts strains isolated from scandinavian soft drinks. *Brauwissenschaft*. 19: 353-355.
- Sawyer, C. y McCarty, P. (1996). *Chemistry for environmental engineering*. New York: McGraw Hill.
- Shames, I. (1995). *Mécanica de fluidos*. Bogota, Colombia: McGraw-Hill.
- Shamsudin, R., Roud, S. y Mandreal P. (2007). Influence of temperature and soluble solid contents on rheological properties of the josapine variety of pineapple fruit (*Ananas comosus L.*). *International Journal of Engineering and Technology*, 12: 213-220.

- Singh, P. y Heldman, D. (1998). Introducción a la ingeniería en alimentos. Zaragoza, España: Acribia.
- Stanford, A. (2003). Handbook of tropical foods. USA: Marcel Dekker:
- Steffe, J. (1996). Rheological methods in food process Engineering. USA: Freeman press.
- Tanner, R. (1985). Engineering rheology. New york. Oxford science publications.
- Tonon, R., Alexandre, D., Hubinger, M. y Cunha, R. (2009). Steady and dynamic shear rheological properties of açai (*Euterpe oleraceae*). 92: 425-431.
- Torrales, R., Vendruscolo, J. y Vendruscolo, C. (2006). Reología de puré homogenizado de Pêssego: Efeito da temperatura e concentração. Journal of Food Engineering. 9:1-8
- Tscheuschner, H. (2001). Fundamentos de tecnología en alimentos. España: Acribia.
- Tung, M. y Paulson, A. (1995). Rheological concepts for probing ingredient interactions in food systems. New York, USA: En Gaonkar.
- Vasco, N., Toro, J. y Padilla, S. (2005). Composición química de la semilla de guayaba. Revista de ciencia en alimentos. 2:12-15
- Vidal, J. y Gasparetto, C. (2000). Rheological behavior of mango pulp (*Mangífera indica L.*) Effect of insoluble solids. Ciencia e Tecnología de Alimentos 20: 172-175.
- Vidal, J., Pelegrine, D. y Gasparetto, C. (2004). Efeito da temperatura no comportamento reológico da polpa de manga (*Mangífera indica L-Keitt*). Ciência dos Tecnologia em. Alimentos. 24: 39-42.
- Vidal, J., Sierakowski, M., Haminiuk, C. Y Masson, M. (2006). Rheological properties of centrifuged mango (*Mangífera indica L-Keitt*). Ciências agrotecnológicas. 5: 955-960.
- Vitali, A. y Rao, M. (1984). Flow behavior of guava puree as a function of temperture and concentration. Journal of Texture Studies. 13: 275-289.
- Windhab, E. (1995). Rheology in food processing. Physico-chemical aspects of food processing. Blackie Academic and Professional. 8: 80-88.
- Zemel, G., Sims, C., Marshall, M. y Balaban, M. (1990). Low pH inactivation of polyphenoloxidase in Apple juice. Journal of Food Science. 55: 562-563.

ANEXO A.1

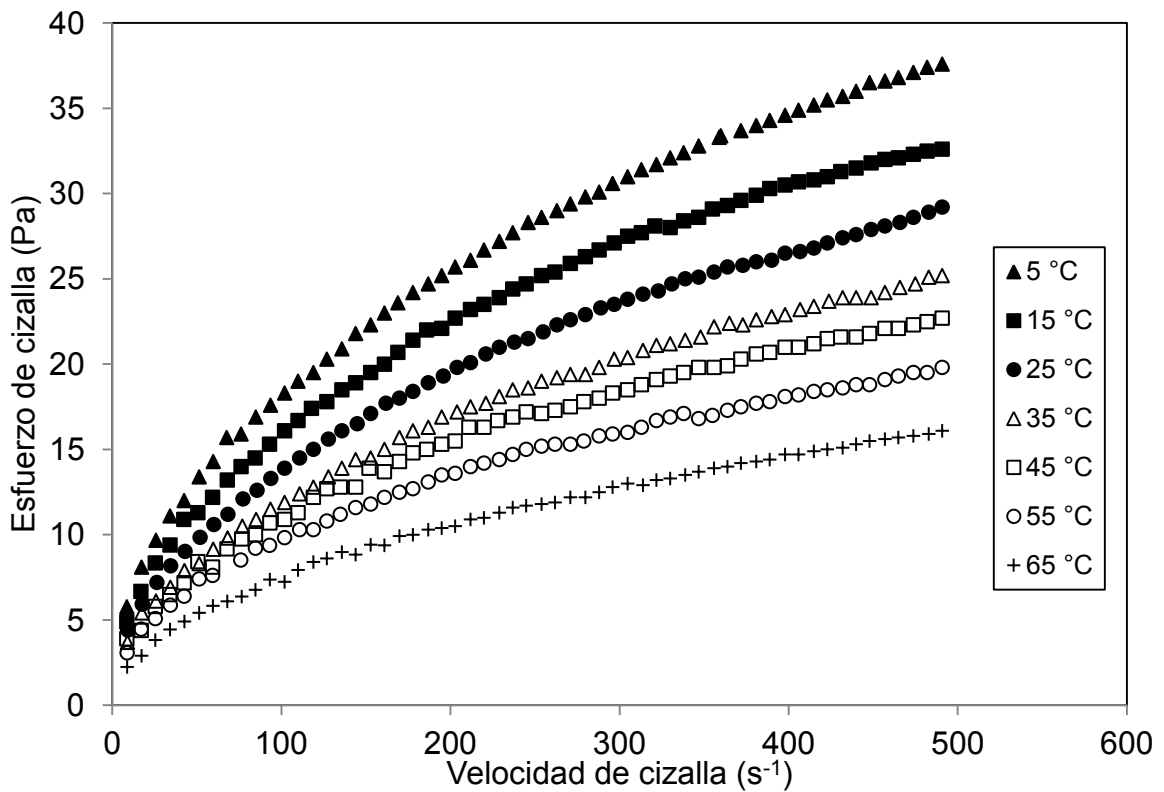
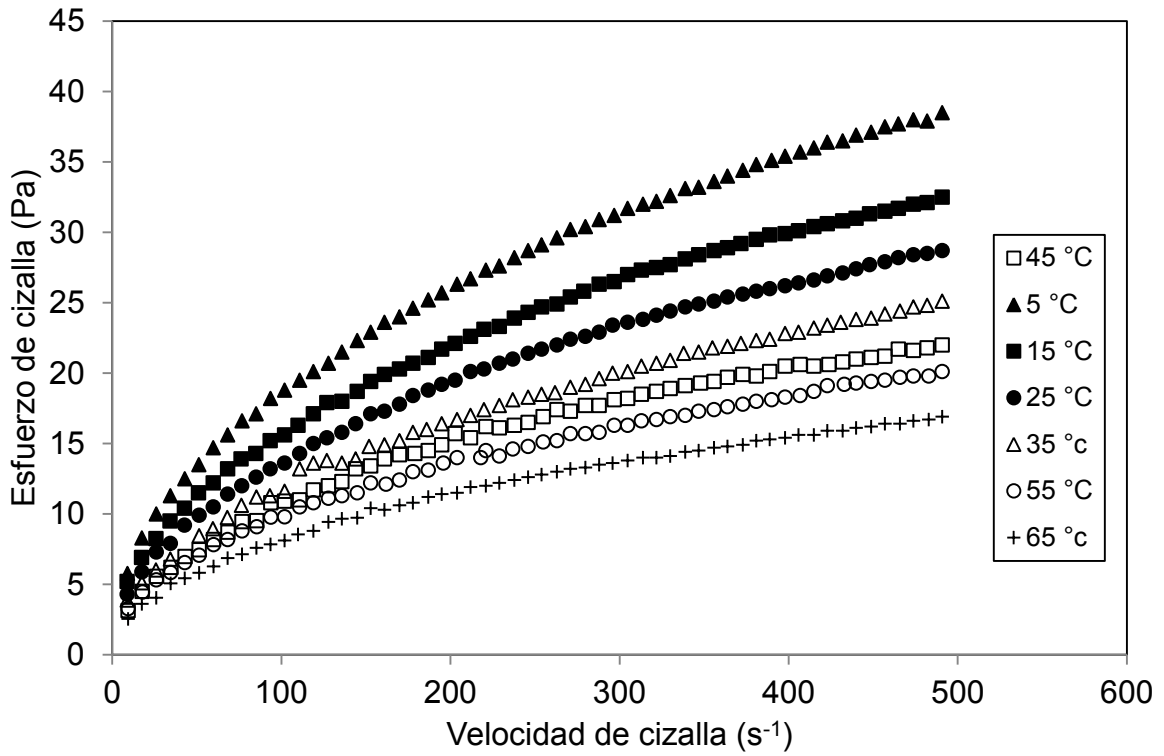


Figura A.1. Esfuerzo de cizalla en función de la velocidad de cizalla de la pulpa de fresa para la curva de ascenso de velocidad de cizalla (a) Método 1 y (b) Método 2.

ANEXO A.2

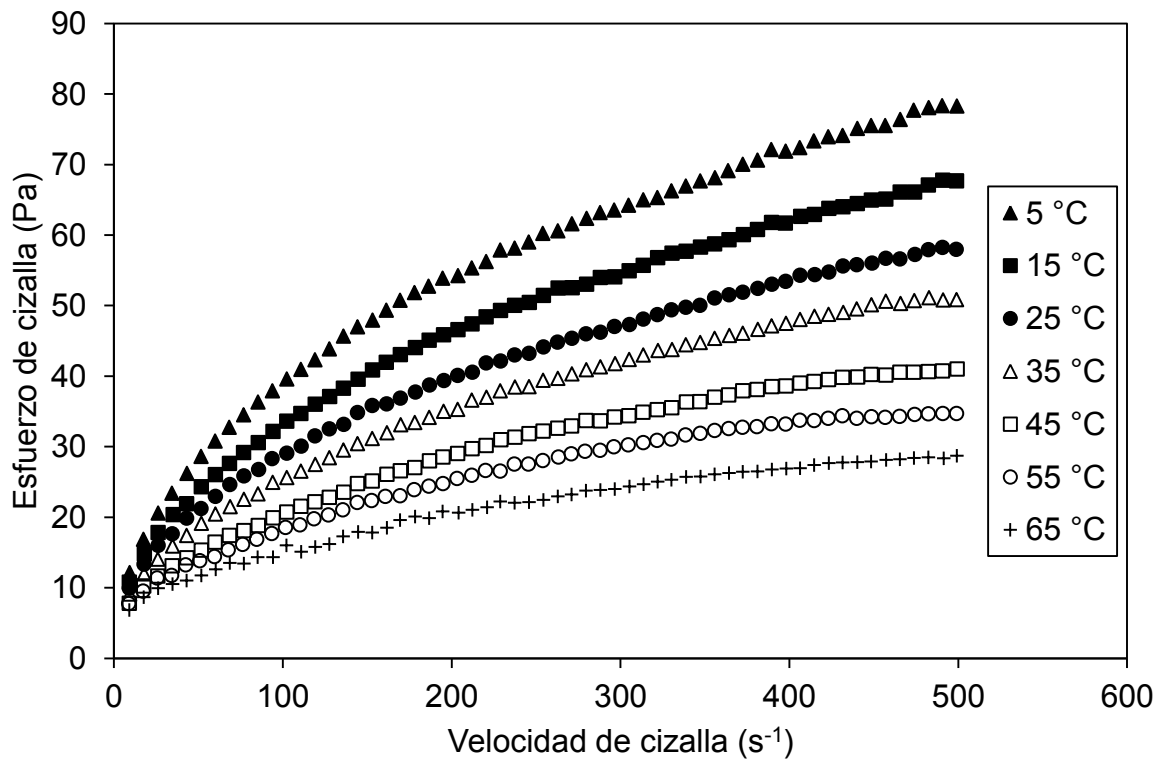
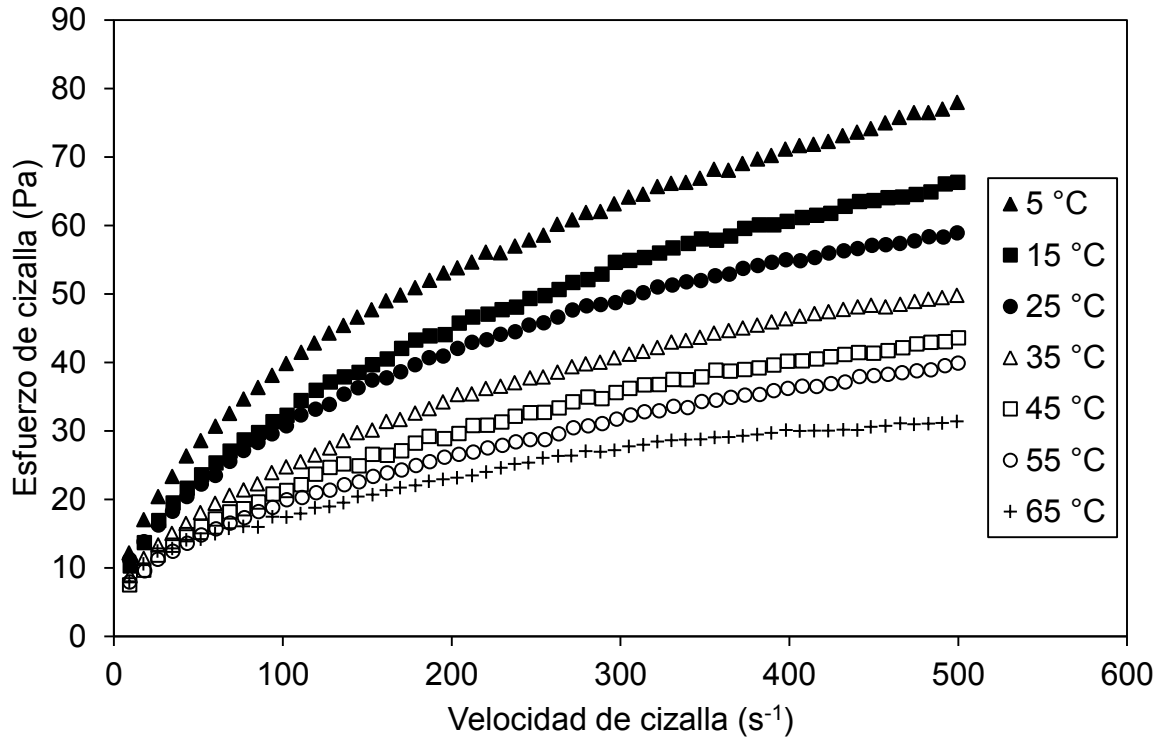


Figura A.2. Esfuerzo de cizalla en función de la velocidad de cizalla de la pulpa de guayaba para la curva de ascenso de velocidad de cizalla (a) Método 1 y (b) Método 2.

ANEXO A.3

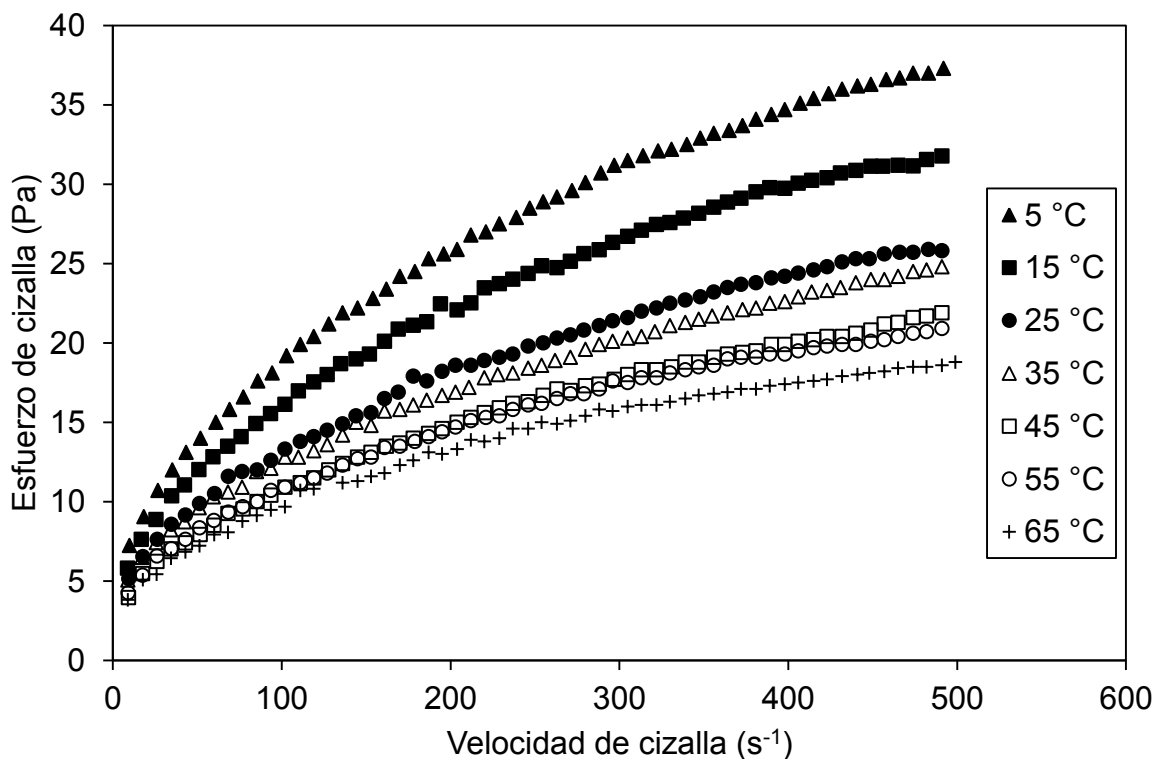
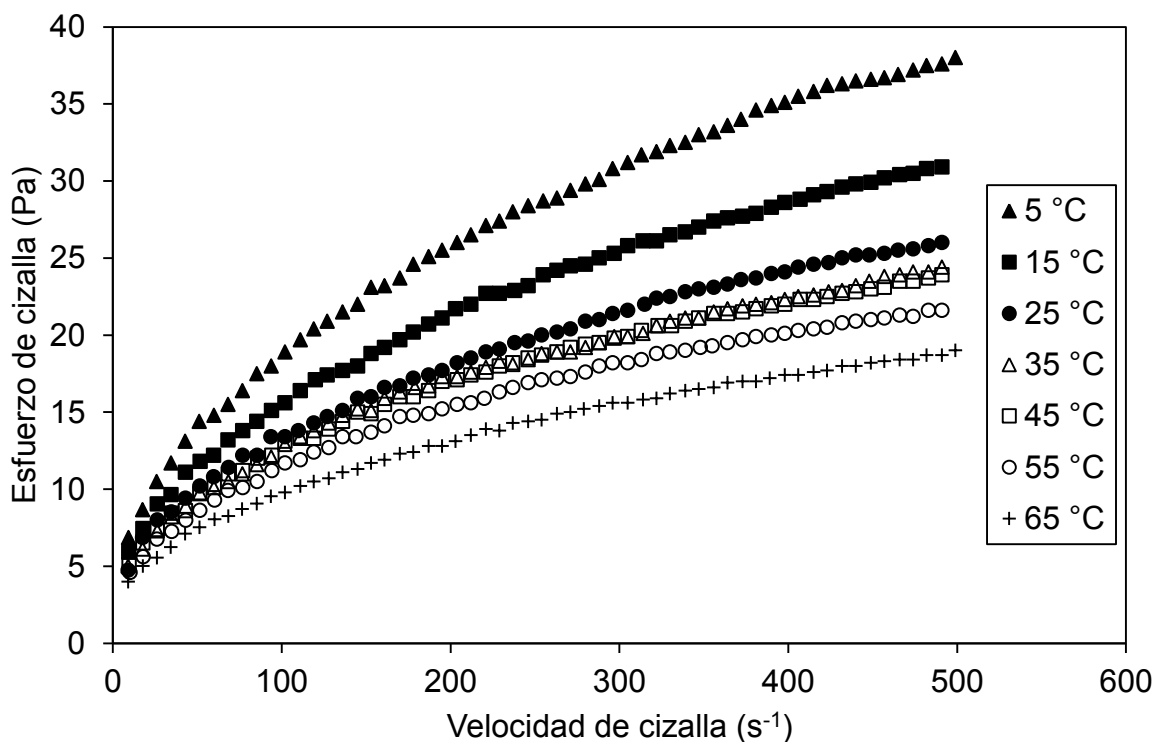


Figura A.3. Esfuerzo de cizalla en función de la velocidad de cizalla de la pulpa de mango para la curva de ascenso de velocidad de cizalla (a) Método 1 y (b) Método 2.

ANEXO B

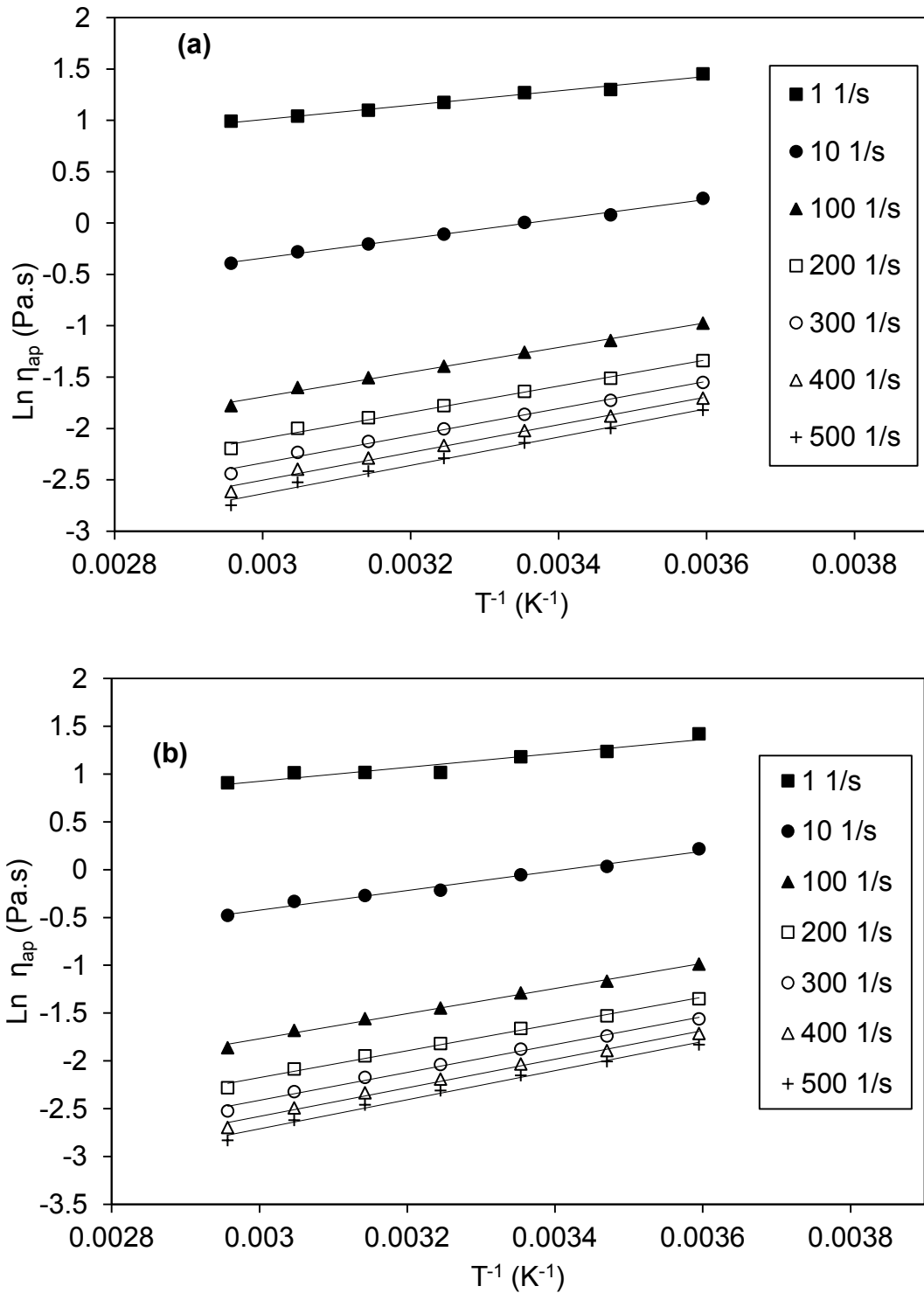


Figura B.1. Logaritmo natural de la viscosidad aparente en función del inverso de la temperatura para la pulpa de guayaba (a) Método 1 y (b) Método 2 a diferentes velocidades de cizalla.

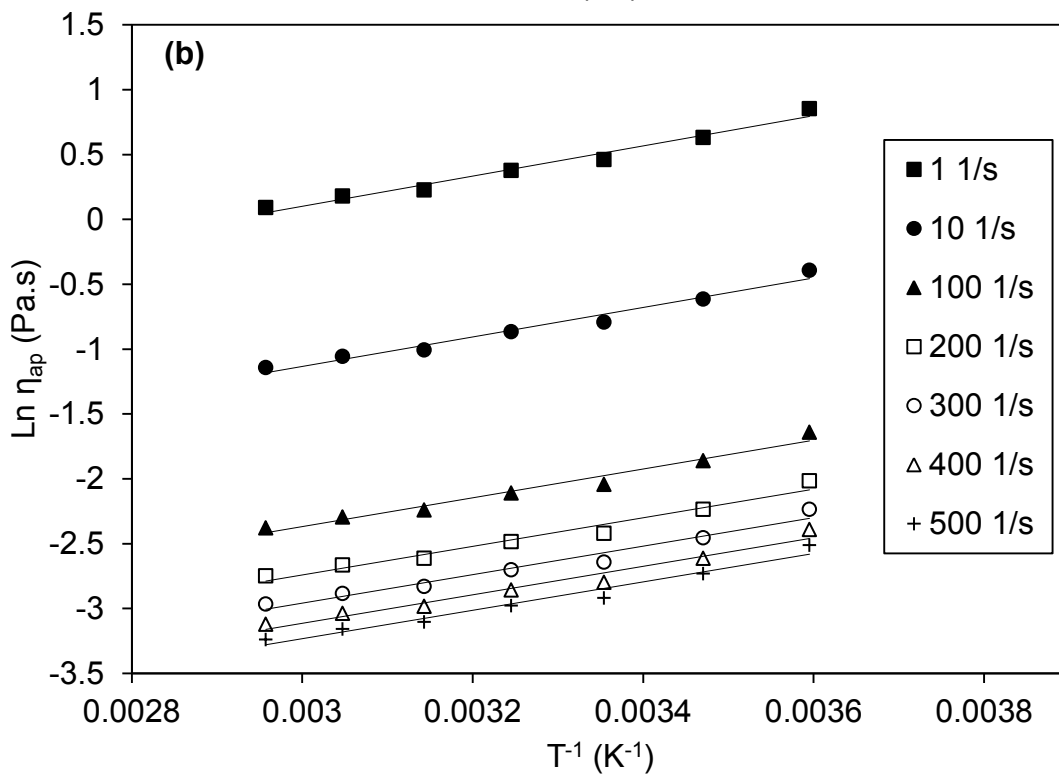
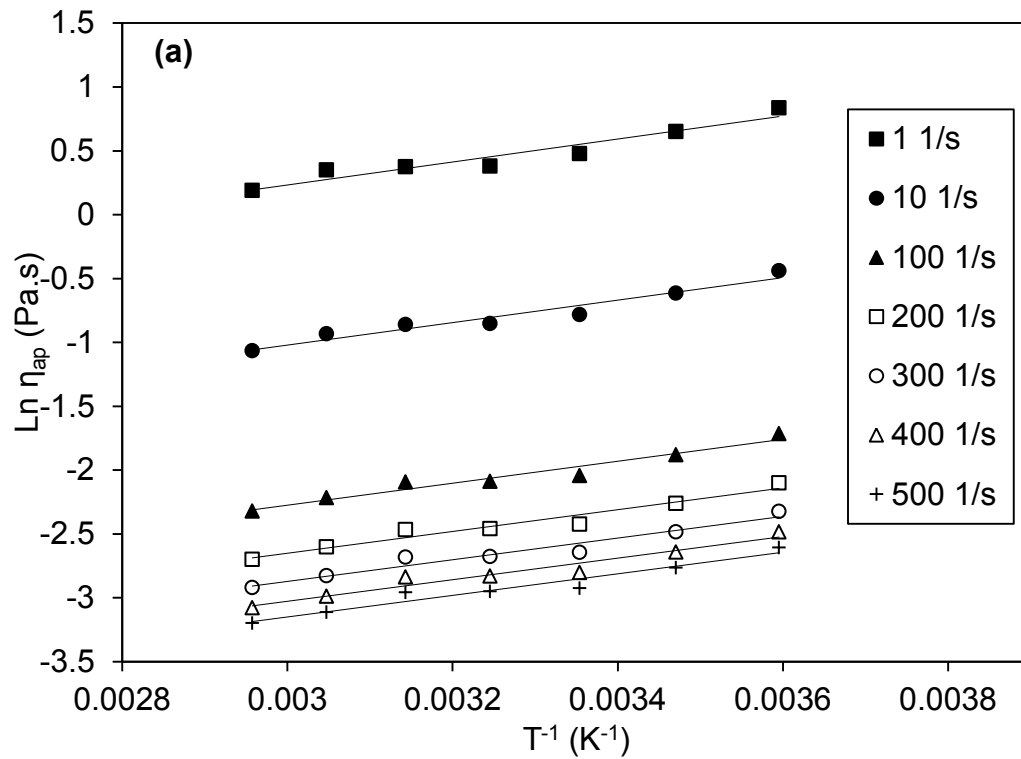


Figura B.2. Logaritmo natural de la viscosidad aparente en función del inverso de la temperatura para la pulpa de mango (a) Método 1 y (b) Método 2 a diferentes velocidades de cizalla.