

Comportamiento reológico en pulpa edulcorada de mango (*Mangifera indica* L. cv. Magdalena river)

Rheological behavior in sweetened mango pulp (*Mangifera indica* L. cv. Magdalena river)

Comportamento reológico em polpa adoçada de manga (*Mangifera indica* L. cv. Magdalena river)

Jorge Antonio Figueroa-Flórez,^{*1} Katerine Barragán-Viloria,² Jairo Guadalupe Salcedo-Mendoza³

¹ Profesor, Universidad de Sucre, Facultad de Ingeniería, Sincelejo, Colombia. Correo: joafigueroafl@unal.edu.co

² Estudiante de Maestría Ciencias Agroalimentarias, Universidad de Córdoba, Facultad de Ingeniería, Montería, Colombia. Correo: kbarraganviloria@correo.unicordoba.edu.co

³ Profesor titular, Universidad de Sucre, Facultad de Ingeniería, Departamento de Ingeniería Agroindustrial, Sincelejo, Colombia. Correo: jairo.salcedo@unisucra.edu.co

Fecha recepción: 18/07/2016

Fecha aprobación: 10/03/2017

Para citar este artículo: Figueroa-Flórez, J. A., Barragán-Viloria, K., & Salcedo-Mendoza, J. G. (2017). Comportamiento reológico en pulpa edulcorada de mango (*Mangifera indica* L. cv. Magdalena river). *Corpoica Ciencia y Tecnología Agropecuaria*, 18(3), 615-627

DOI: https://doi.org/10.21930/rcta.vol18_num3_art:748

* Autor de correspondencia

Resumen

El mango es un fruto exótico con gran potencial agroindustrial y de elevado consumo debido a su valor nutricional, su sabor agridulce y su aroma agradable. Sin embargo, son escasas las investigaciones acerca de algunas propiedades físicas utilizadas en procesos agroindustriales, específicamente, en el comportamiento reológico de pulpas edulcoradas. El objetivo del presente estudio fue evaluar el efecto de la temperatura (10-50 °C) y de la concentración de sacarosa (0-25 %) en las propiedades reológicas de la pulpa de mango de hilacha (*Mangifera indica*

cv. Magdalena river). La ley de potencia presentó el mejor ajuste al comportamiento reológico con altos valores del coeficiente de determinación ($R^2 = 0,997$). La pulpa edulcorada de mango evidenció un comportamiento pseudoplástico al ser expuesta a adelgazamiento por cizalladura ($n < 1$). El coeficiente de consistencia depende de la temperatura y la concentración de sólidos solubles, descritos por la relación de Arrhenius y un modelo exponencial, respectivamente.

Palabras clave: fluidos, *Mangifera indica*, propiedades reológicas, sacarosa, temperatura, viscosidad

Abstract

Mango is an exotic fruit with great agro-industrial potential and high consumption due to its high nutritional value, bittersweet flavor and pleasant aroma. However, few studies have been conducted on its physical properties used in agroindustrial processes, specifically regarding the rheological behavior of sweetened pulp. The aim of this study was to evaluate the effect of temperature (10-50 °C) and sucrose concentration (0-25%) in the rheological properties of the sweetened pulp of hilacha mango

(*Mangifera indica* L. cv. Magdalena river). The power law showed the best adjustment to the rheological behavior with high determination coefficient values ($R^2=0,997$). Sweetened mango pulp exhibited a pseudoplastic behavior when exposed to shear thinning ($n < 1$). The consistency coefficient was found to be dependent on the temperature and concentration of soluble solids described by the Arrhenius relationship and an exponential model, respectively.

Key words: Fluids, *Mangifera indica*, Rheological properties, Sucrose, Temperature, Viscosity

Resumo

A manga é uma fruta exótica com grande potencial agroindustrial e de elevado consumo devido a seu valor nutricional, seu sabor agridoce e seu aroma agradável. Contudo, são poucas as pesquisas sobre algumas propriedades físicas utilizadas em processos agroindustriais, especificamente, no comportamento reológico de polpas adoçadas. O objetivo deste estudo foi avaliar o efeito da temperatura (10-50 °C) e da concentração de sacarose (0-25 %) nas propriedades reológicas da polpa de manga de hilacha (*Mangifera*

indica cv. Magdalena river). A lei de potência apresentou o melhor ajuste ao comportamento reológico com altos valores do coeficiente de determinação ($R^2 = 0,997$). A polpa adoçada de manga evidenciou um comportamento pseudoplástico ao ser exposta a emagrecimento por cisalhamento ($n < 1$). O coeficiente de consistência depende da temperatura e da concentração de sólidos solúveis, descritos pela relação de Arrhenius e por um modelo exponencial, respectivamente.

Palavras chaves: fluido, *Mangifera indica*, propriedade reológica, sacarose, temperatura, viscosidade

Introducción

Las medidas reológicas son consideradas como una herramienta analítica importante para generar conocimientos sobre la organización estructural de los alimentos y sobre su calidad, así como para predecir cambios durante la formulación, procesamiento, transporte y almacenamiento de estos (Ortega, Salcedo, Arrieta, & Torres, 2015; Vidal, Pelegrine, & Gasparetto, 2004). A su vez, se ha determinado que en pulpas de frutas el comportamiento reológico está condicionado por diversos factores como la temperatura, la concentración, la presión, el tamaño de partículas, la variedad de la fruta y el grado de madurez, entre otros. Dichas variables afectan los parámetros reológicos que finalmente definen el tipo de fluido durante operaciones de calentamiento, enfriamiento, mezcla o bombeo (Haminiuk, Sierakowski, Vidal, & Masson, 2006; Nambi, Thangavel, Rajeswari, Manickavasagan, & Geetha, 2016; Pereira, Resende, & Giarola, 2014).

Como resultado de la interacción compleja entre los azúcares, las sustancias pécticas y los sólidos en suspensión, la gran mayoría de las pulpas de frutas son fluidos no newtonianos. Diversas investigaciones han demostrado el comportamiento reológico de las pulpas a través de modelos como la ley de potencias, el modelo Herschel-Bulkley, el Mizrahi-Berk y el Casson. El modelo matemático más utilizado para la caracterización reológica es el de la ley de potencia, debido a su gran aplicabilidad (en él se relaciona la fuerza de cizallamiento con la variación del gradiente de cizalla). Este modelo se ha utilizado para describir el comportamiento reológico de la pulpa de varias frutas como el mango, el níspero, la ciruela, la fresa y la frambuesa, entre otras (Andrade et al., 2009; Gundurao, Ramaswamy, & Ahmed, 2011; Maceiras Álvarez, & Cancela, 2007; Ortega et al., 2015).

Otros modelos se han implementado para estudiar el efecto de la temperatura o la concentración de sólidos en la reología de jugos y pulpas concentradas. Son muchos los autores que en sus investigaciones han correlacionado el efecto de la temperatura sobre la viscosidad mediante una ecuación de tipo Arrhenius,

y el efecto de la concentración de sólidos a través del modelo de la ley de potencia o el modelo exponencial (Haminiuk et al., 2006; Maceiras et al., 2007; Ortega et al., 2015; Quek, Chin, & Yusof, 2013; Vidal et al., 2004).

El mango (*Mangifera indica* L., Anacardiaceae) es una de las especies frutales con mayor proyección de agroindustrialización y de exportación como fruta exótica. Es un producto muy atractivo por su color, su valor nutricional y su apetecible sabor. Se ha demostrado que es fuente de ácido cítrico, ácido ascórbico, fibra y sustancias fitoquímicas como los carotenoides (Danalache, Carvalho, Alves, Moldão, & Mata, 2016; Oliveira et al., 2016). No obstante, los frutos de mango presentan cuantiosas pérdidas por el manejo inadecuado en la poscosecha y la falta de procesos de agroindustrialización. La edulcoración es un método sencillo de conservación, basado en la adición de sacarosa en un porcentaje máximo del 40 %, lo que logra aumentar el contenido de sólidos solubles, modificar las propiedades reológicas y disminuir la actividad de agua, lo que le confiere una mayor estabilidad al producto durante el almacenamiento (Instituto Colombiano de Normas Técnicas [Icontec], 2007; Tirado, Acevedo, & Montero, 2014).

En pulpas de mango se ha descrito un comportamiento pseudoplástico, con buen ajuste al modelo de la ley de potencia. Algunos autores han resaltado cambios significativos en las propiedades reológicas del mango, debido a efectos de temperatura y a la concentración de sólidos solubles (Gundurao et al., 2011; Ortega et al., 2015). A su vez, se ha resaltado el efecto del grado de madurez, asociado a cambios fisiológicos y bioquímicos que sufre el fruto durante el periodo de poscosecha (Nambi et al., 2016). Sin embargo, es bastante escasa la literatura existente sobre los valores típicos de los parámetros reológicos en la pulpa de mango edulcorada. Por lo tanto, esta investigación fue realizada para determinar el efecto de la temperatura y de la adición de sacarosa en el comportamiento de parámetros reológicos de pulpa de mango de la variedad Magdalena river, localmente conocida como *mango de hilacha*.

Materiales y métodos

Materia prima y preparación de pulpas edulcoradas

Esta investigación se realizó en la Planta Piloto de Operaciones Unitarias del programa de Ingeniería Agroindustrial de la Universidad de Sucre, sede Perico. Se utilizaron frutos frescos de mango de hilacha (*Mangifera indica* cv. Magdalena river) adquiridos en el mercado local de Sincelejo (Sucre, Colombia), con grado de madurez tipología color 5 (Icontec, 2004). Se utilizó sacarosa comercial marca Incauca con un contenido de humedad de 0,10 %. Los mangos fueron lavados, desinfectados, lavados y cortados. La pulpa se obtuvo mediante una procesadora D1000 Ci Talsa (Colombia) de malla de 1,5 mm, de acuerdo con las especificaciones del proceso industrial.

La cantidad de sacarosa (base seca) se estimó con base en el peso total de la pulpa fresca (Icontec, 2007). Se homogenizaron las pulpas en un dispersor UltraTurrax, IKA - T25 (Alemania), durante un (1) minuto a 5.000 rpm, y se caracterizaron fisicoquímicamente: se determinó la acidez titulable y los sólidos solubles totales (SST) de acuerdo con los protocolos de la Association of Official Agricultural Chemists [AOAC] (2005).

Comportamiento reológico

Se determinaron las curvas de flujo en un reómetro Anton Paar, MCR 302 (Austria) en modo rotacional, para lo cual se empleó la geometría de cilindros concéntricos (SC4-21, 2,5 cm de diámetro). Con el fin de eliminar la posible tixotropía presentada por el producto, se realizaron barridos de tasa de deformación ($\dot{\gamma}$) en el rango de 0 a 200 s^{-1} , primero en forma ascendente, luego en forma descendente y finalmente de manera ascendente.

Para estudiar el comportamiento reológico de la pulpa se tomó como referencia la curva obtenida del último procedimiento. Los valores experimentales del comportamiento de curvas de flujo se ajustaron a los siguientes modelos reológicos: ley de potencia (ecuación 1), Herschel-Bulkley (ecuación 2), Casson

(ecuación 3) y Mizrahi-Berk (ecuación 4), para los cuales n es el índice de flujo, K es el coeficiente de consistencia ($Pa \cdot s^n$), σ es el esfuerzo cortante (Pa) y σ_0 es el esfuerzo mínimo para iniciar el flujo (Augusto, Cristianini, & Ibarz, 2012).

$$\sigma = K (\dot{\gamma}^n) \quad (\text{Ecuación 1})$$

$$\sigma = \sigma_0 + K (\dot{\gamma}^n) \quad (\text{Ecuación 2})$$

$$\sigma^{0.5} = (\sigma_0)^{0.5} + K (\dot{\gamma}^{0.5}) \quad (\text{Ecuación 3})$$

$$\sigma^{0.5} = (\sigma_0)^{0.5} + K (\dot{\gamma}^n) \quad (\text{Ecuación 4})$$

Las medidas reológicas se realizaron en cinco niveles de temperaturas (10 °C, 20 °C, 30 °C, 40 °C y 50 °C) para las diferentes pulpas edulcoradas de mango, en las cuales se establecieron cuatro réplicas por tratamiento.

Efecto de la temperatura y la concentración sobre los parámetros reológicos

El efecto de la temperatura sobre el coeficiente de consistencia (K) y el índice de comportamiento de flujo (n) se describieron mediante la relación de Arrhenius (ecuaciones 5 y 6) y las relaciones lineales con la temperatura (ecuaciones 7 y 8) (Andrade et al., 2009).

$$K = K_0 \exp\left(\frac{E_a}{RT}\right) \quad (\text{Ecuación 5})$$

$$n = n_0 \exp\left(\frac{E_a}{RT}\right) \quad (\text{Ecuación 6})$$

$$K = A_k + B_k (T) \quad (\text{Ecuación 7})$$

$$n = A_n + B_n (T) \quad (\text{Ecuación 8})$$

Los factores de frecuencia K_o y n_o se estimaron a partir de la relación de Arrhenius, en la que R es la constante universal de los gases. Los coeficientes A_k , A_n , B_k y B_n fueron constantes que describieron el comportamiento lineal del coeficiente de consistencia y del índice de flujo con la temperatura absoluta.

El efecto de la concentración sobre el coeficiente de consistencia (K) se describió por la ley de potencia y una relación exponencial. Ambas expresiones (ecuaciones 9 y 10) se linealizaron para obtener los parámetros K_1 , K_2 , n_1 y n_2 .

$$K = K_1 C^{n_1} \quad (\text{Ecuación 9})$$

$$K = K_2 \exp(n_2 C) \quad (\text{Ecuación 10})$$

El efecto combinado de temperatura y concentración en las pulpas edulcoradas se evaluó a través del coeficiente de consistencia, mediante la combinación de la relación de Arrhenius y relaciones de tipo exponencial (Quek et al., 2013). Ambas expresiones (ecuaciones 11 y 12) se linealizaron para obtener las constantes K_3 , K_4 , n_3 , n_4 y la energía de activación (E_a).

$$K = K_3 C^{n_3} \exp\left(\frac{E_a}{RT}\right) \quad (\text{Ecuación 11})$$

$$K = K_4 \exp\left(\frac{E_a}{RT} + n_4 C\right) \quad (\text{Ecuación 12})$$

Análisis estadístico

Se estableció un diseño factorial variando los niveles de temperatura (10 °C, 20 °C, 30 °C, 40 °C y 50 °C) y el porcentaje de sacarosa (0 %, 5 %, 10 %, 15 %, 20 % y 25 %). Los datos obtenidos se ajustaron

por regresión no lineal a los modelos reológicos propuestos, y se tuvieron en cuenta parámetros estadísticos como el coeficiente de determinación (R^2), el cuadrado medio del error (CME) y la prueba de Fischer para el nivel de significancia del modelo. Se realizó un análisis de varianza y prueba de Tukey para la comparación de medias a un nivel de significancia del 5 % mediante el *software* Statgraphics versión XVI.I.

Resultados y discusión

El aumento en la concentración de sacarosa provocó el incremento del contenido de SST y, por ende, una disminución del porcentaje de acidez en las pulpas edulcoradas de mango (tabla 1). Esto puede deberse a que el contenido de sacarosa disminuye la proporción de agua libre en la pulpa, lo que ocasiona que iones hidrógenos disponibles en los ácidos orgánicos formen puentes de hidrógeno y se provoque la protonización de grupos carboxilos y la disminución de la acidez. Resultados similares se obtuvieron en mermeladas de mango (Basu & Shivhare, 2010).

Comportamiento reológico

La tabla 2 muestra los valores de R^2 y CME para cada uno de los modelos que se ajustaron a los datos experimentales. Se puede observar que los modelos reológicos presentaron buen ajuste de los datos, en especial, Herschel-Bulkley, Mizrahi-Berk y la ley de potencia ($R^2 > 0,99$). Esta última mostró el CME más bajo. En el modelo de Mizrahi-Berk, se estimaron valores negativos para σ_o que no tienen sentido desde el punto de vista físico (Gratão, Silveira, & Telis-Romero, 2007). En el modelo de Herschel-Bulkley, los valores del umbral de fluencia fueron muy bajos ($\sigma_o \approx 0$), razón por la cual se pueden omitir (Rao, 2006). En este sentido, la discusión de los parámetros reológicos se limitará al modelo de la ley de potencia de acuerdo con parámetros estadísticos, simplicidad del modelo y el amplio uso en el estudio del comportamiento reológico de pulpas de frutas (Haminiuk et al., 2006; Ortega et al., 2015; Vidal et al., 2004).

Tabla 1. Características fisicoquímicas de la pulpa edulcorada de mango de hilacha

Pulpa (%)	Sacarosa (%)	SST (°Brix)	Acidez (% ácido cítrico)
100	0	15,1 ± 0,058 ^a	0,374 ± 0,014 ^a
95	5	20,0 ± 0,006 ^b	0,354 ± 0,015 ^a
90	10	25,3 ± 0,010 ^c	0,322 ± 0,006 ^a
85	15	30,1 ± 0,006 ^d	0,317 ± 0,014 ^b
80	20	35,1 ± 0,052 ^e	0,294 ± 0,009 ^b
75	25	40,2 ± 0,005 ^f	0,269 ± 0,008 ^c

^{a, b, c, d, e, f} Las medias en una columna con distintas letras presentan diferencias estadísticas ($p < 0,05$).

Nota: El ácido cítrico contribuye cerca del 95 % para el total de los ácidos orgánicos en el mango (Thanaraj, Terry, & Bessant, 2009), por ello el porcentaje (%) de acidez se expresó en ácido cítrico.

Fuente: Elaboración propia

Tabla 2. Parámetros estadísticos de los modelos reológicos

Modelo*	R ²	CME
Ley de potencia	0,997 ± 0,005	0,396 ± 0,141
Herschel-Bulkley	0,995 ± 0,002	1,042 ± 1,454
Casson	0,964 ± 0,019	1,290 ± 0,592
Mizrahi-Berk	0,997 ± 0,001	1,580 ± 1,376

* Los modelos fueron estadísticamente significativos con un nivel de confianza del 5 %.

Fuente: Elaboración propia

Los parámetros ajustados al modelo de la ley de potencia se muestran en la tabla 3. Se evidenció el comportamiento pseudoplástico de las pulpas edulcoradas de mango, con valores del índice de comportamiento de flujo menores a la unidad ($n < 1$), para las diferentes condiciones de temperatura y concentración. Esto se relaciona con el comportamiento de las curvas de flujo en diferentes concentraciones, como se detalla en la figura 1, en la cual se observa una disminución del esfuerzo de corte a medida que se incrementa la tasa de deformación. El mismo comportamiento se encontró en estudios realizados en pulpa de arazá, cereza y ciruela (Augusto et al., 2012; Haminiuk et al., 2006; Pereira et al., 2014).

Por otra parte, el índice de consistencia aumentó con la adición de sacarosa, tomando valores entre 3,39 y 6,15 Pa.sⁿ. Lo anterior se puede explicar porque el aumento de la concentración de azúcar disminuye la disponibilidad de agua libre en la pulpa y, por consiguiente, la posibilidad de formación de puentes de hidrógeno, lo que provoca una mayor resistencia al flujo. Este comportamiento se asocia a la estabilidad de la estructura interna del alimento y a la reestructuración de las moléculas en la pulpa cuando son sometidas a un estrés mecánico en presencia de sacarosa. Basu y Shivhare (2010) y Ortega et al. (2015) reportan un comportamiento similar en mermelada de mango variedad Totapuri y en pulpa de mango variedad Tommy Atkins, respectivamente.

Tabla 3. Parámetros reológicos estimados a partir del modelo de la ley de potencia

Temperatura (°C)	Concentración (°Brix)					
	15,1	20,0	25,3	30,1	35,1	40,2
Coefficiente de consistencia, K (Pa.sⁿ)						
10	4,410±0,089	4,229±0,113	4,385±0,324	5,167±0,241	5,798±0,201	6,158±0,011
20	3,904±0,213	3,859 ±0,254	4,043 ±0,147	4,761±0,168	5,272 ±0,078	5,892 ±0,292
30	3,413±0,037	3,562±0,146	3,893±0,091	4,437±0,064	4,613±0,194	5,490±0,107
40	3,410±0,101	3,495±0,081	3,810±0,070	4,194±0,100	4,499±0,173	4,786±0,330
50	3,391±0,149	3,461±0,130	3,665±0,035	3,998±0,013	3,986±0,129	4,174±0,041
Índice de flujo (n)						
10	0,328±0,001	0,343±0,006	0,347±0,002	0,341±0,010	0,345±0,007	0,353±0,008
20	0,319±0,004	0,331±0,002	0,329±0,009	0,337±0,002	0,342±0,007	0,353±0,008
30	0,297±0,007	0,310±0,008	0,333±0,001	0,328±0,003	0,340±0,001	0,357±0,002
40	0,274±0,001	0,258±0,007	0,277±0,004	0,300±0,008	0,292±0,005	0,326±0,007
50	0,229±0,009	0,226±0,001	0,231±0,008	0,253±0,001	0,271±0,003	0,303±0,009

Fuente: Elaboración propia

En la figura 1 se observa una disminución en los valores del esfuerzo de corte con la temperatura, lo que se traduce en la disminución de la viscosidad aparente de la pulpa edulcorada de mango. Esto se debe a que el incremento de la temperatura produce mayor interacción intermolecular en la fase acuosa de la pulpa, lo cual provoca una repulsión entre las partículas suspendidas, menor resistencia al flujo y, por consiguiente, una disminución en la viscosidad aparente. Este comportamiento prevaleció para los diferentes tratamientos de pulpa edulcorada, y está relacionado estrictamente con la disminución del índice de consistencia K por el aumento gradual de temperatura. Souza, Queiroz, Figueredo, y Lemos (2014) muestran resultados similares en el estudio de pulpa de piqui (*Caryocar coriaceum* Wittm., Caryocaraceae), en el que los valores del índice de consistencia y viscosidad aparente disminuyen con el aumento gradual de temperatura entre 25 °C y 50 °C. Resultados similares se reportaron en la

caracterización reológica de pulpa de mango variedad Keitt con diferentes barridos de temperatura (Vidal et al., 2004).

Efecto de temperatura y concentración sobre los parámetros reológicos

La tabla 4 y la figura 2A muestran el efecto de la temperatura en los parámetros reológicos de pulpa edulcorada de mango estimados a partir del modelo de la ley de potencia. El efecto de la temperatura sobre el coeficiente de consistencia puede ser bien descrito por el modelo de Arrhenius mediante la obtención de los valores de R^2 mayores a 0,93. Se observa que los valores del factor de frecuencia K_0 , que varían entre 0,05 - 0,68 Pa.sⁿ, disminuyen con la concentración, lo que concuerda con los resultados obtenidos por Ortega et al. (2015) en pulpa de mango variedad Tommy Atkins. Asimismo, se observa un aumento en los valores de energía de

activación (E_a), que oscilan entre 3,98 y 11,19 kJ.mol⁻¹. Este comportamiento está estrechamente relacionado con la disminución del coeficiente K y el factor de frecuencia K_0 . Haminiuk et al. (2006) argumentan que, en sistemas alimenticios, cuando se aumentan

los valores de la E_a , se origina una estructura menos desarrollada susceptible a cambios por temperatura. Esto genera valores más bajos de la viscosidad aparente, lo que hace que las dispersiones fluyan más fácilmente.

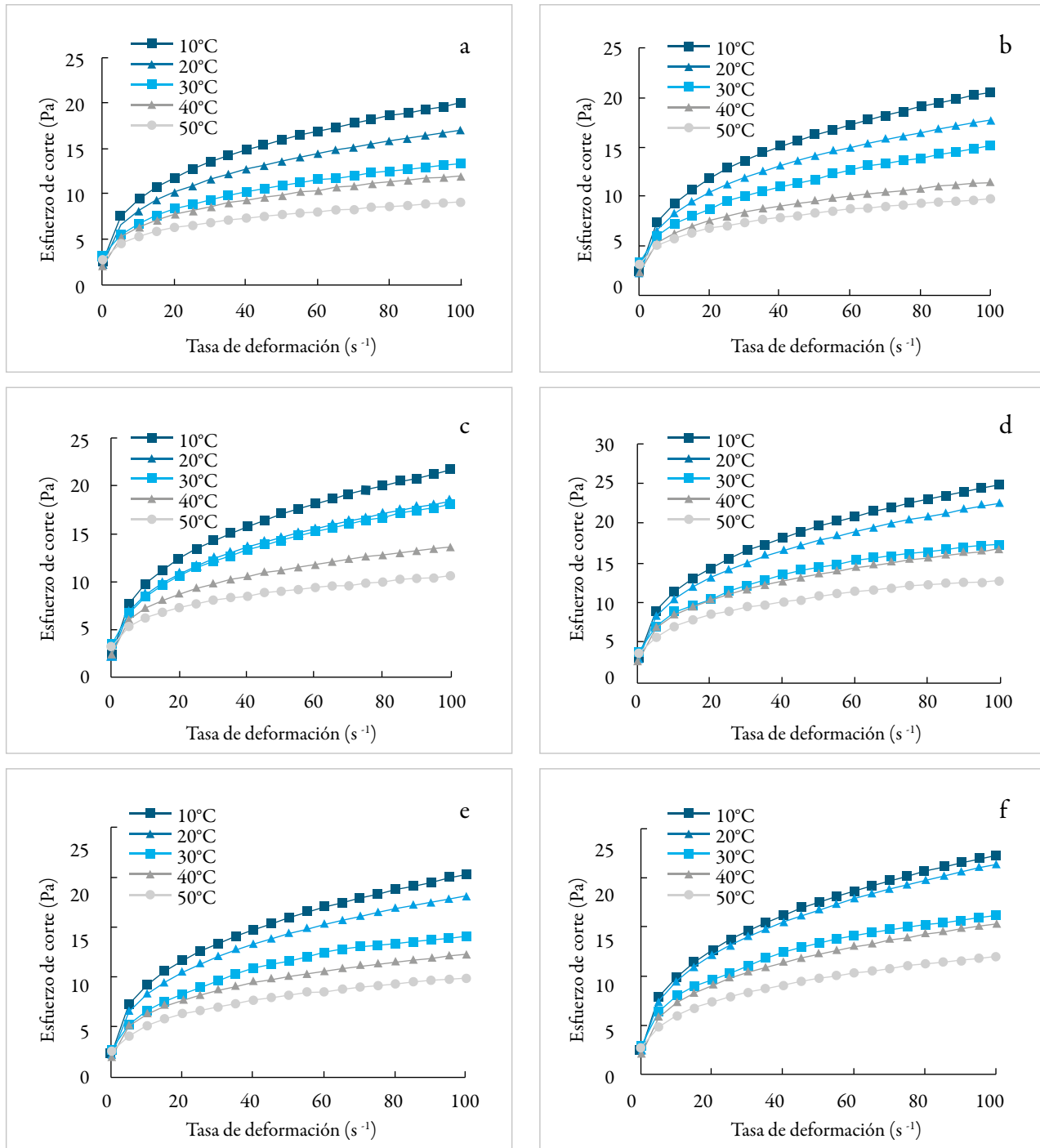


Figura 1. Comportamiento de curvas de flujo en pulpa edulcorada de mango. a. 15,1 °Brix; b. 20,0 °Brix; c. 25,3 °Brix; d. 30,1 °Brix; e. 35,1 °Brix; f. 40,2 °Brix.

Fuente: Elaboración propia

Tabla 4. Efecto de la temperatura sobre el coeficiente de consistencia y el índice de flujo en pulpa edulcorada de mango de hilacha

Concentración (°Brix)	Relación Arrhenius				Relación lineal*			
	K_o (Pa.s ⁿ)	E_a (kJ.mol ⁻¹)	R^2	CME	A_n	B_n	R^2	CME
15,1	0,681	3,981	0,949	0,0082	1,026	-0,002	0,936	0,0001
20,0	0,644	4,224	0,939	0,0059	1,224	-0,004	0,948	0,0002
25,3	0,616	4,543	0,973	0,0136	1,164	-0,003	0,864	0,0004
30,1	0,367	6,077	0,979	0,0104	0,957	-0,002	0,849	0,0003
35,1	0,117	9,010	0,975	0,0315	0,917	-0,002	0,839	0,0003
40,2	0,054	11,195	0,943	0,1585	0,723	-0,001	0,740	0,0002

* Los modelos fueron estadísticamente significativos, con un nivel de confianza del 5 %.

Fuente: Elaboración propia

El efecto de la temperatura sobre el índice de comportamiento de flujo (n) se evaluó mediante la relación de Arrhenius y un modelo lineal (ecuación 8). Se encontró que el índice de flujo no sigue una relación lineal con el inverso de la temperatura descrito a través del modelo de Arrhenius. Resultados similares han sido descritos en jugo de mango, pulpa de piqui (*C. coriaceum*) y suspensiones alimentarias fluidas y semisólidas (Dark, Verma, & Sharma, 2006; Rao, 2006; Souza et al., 2014). No

obstante, un modelo lineal describió satisfactoriamente el comportamiento entre el índice de flujo y la temperatura, con valores del coeficiente de determinación (R^2) entre 0,74 y 0,94 y bajos valores del CME (tabla 2, figura 2B). Un comportamiento similar se reportó en pulpa de níspero, en el estudio del comportamiento del índice de flujo en un rango de temperatura entre 10 °C y 70 °C (Andrade et al., 2009). A su vez, Augusto et al. (2012) describieron el efecto de la temperatura en el parámetro n en pulpa de ciruela mediante una función lineal.

Tabla 5. Efecto de la concentración sobre el coeficiente de consistencia en pulpa edulcorada de mango de hilacha

Temperatura (°C)	Ley de potencia*				Modelo exponencial*			
	K_1 (Pa s ⁿ)	n_1	R^2	CME	K_2 (Pa s ⁿ)	n_2	R^2	CME
10	0,367	0,815	0,917	0,244	2,258	0,031	0,976	0,071
20	0,870	0,509	0,921	0,071	2,676	0,019	0,975	0,023
30	0,984	0,443	0,913	0,050	2,607	0,017	0,966	0,019
40	1,216	0,362	0,935	0,022	2,698	0,014	0,974	0,009
50	1,304	0,319	0,941	0,001	2,653	0,012	0,969	0,007

* Los modelos fueron estadísticamente significativos, con un nivel de confianza del 5 %.

Fuente: Elaboración propia

El efecto de la concentración sobre el coeficiente K se describió tanto por la ley de potencia como por un modelo exponencial (ecuación 10). Los valores de K_1 y n_1 del modelo de la ley de potencia, así como los valores de K_2 y n_2 del modelo exponencial para los diferentes niveles de temperatura se describen en la tabla 5. Los índices K_1 y K_2 aumentaron de forma no lineal con la temperatura, mientras que los índices n_1 y n_2 disminuyeron. Ambos modelos explican satisfactoriamente el comportamiento físico de las variables obtenidas. No obstante, el modelo exponencial con coeficientes de determinación mayores a 0,96 y bajos valores del CME describe mejor estadísticamente el efecto de la concentración sobre el coeficiente de consistencia,

en comparación con el modelo de la ley de potencia ($R^2 > 0,91$).

Resultados similares se han obtenido en jugos concentrados de guanábana, uva y cereza, los cuales sugieren que el modelo exponencial presenta un mejor ajuste al comportamiento de la concentración sobre el coeficiente de consistencia (Juszczak & Fortuna, 2004; Kaya & Belibagli, 2002; Quek et al. 2013). Otros autores sugieren que el modelo exponencial es adecuado para jugos concentrados y pulpas edulcoradas de frutas, mientras que el modelo de la ley de potencia presenta un mejor ajuste para pulpas concentradas tipo puré (Krokida, Maroulis, & Saravacos, 2001).

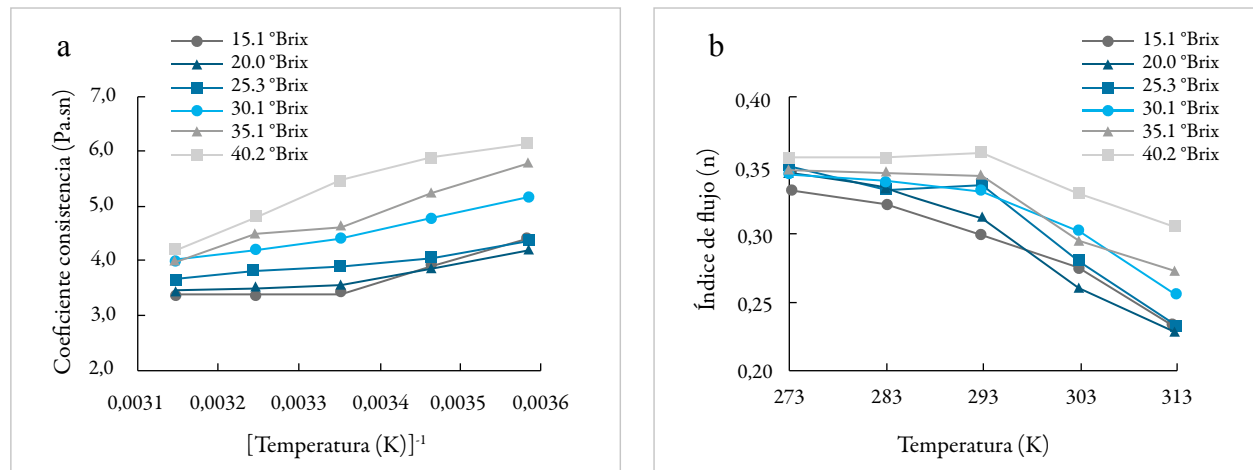


Figura 2. Efecto de la temperatura en a. Coeficiente de consistencia y b. Índice de flujo.
Fuente: Elaboración propia

El efecto combinado de la temperatura y la concentración sobre el índice de consistencia de la pulpa edulcorada de mango se estudió mediante la ley de potencia y el modelo exponencial; los parámetros estimados se describen en las expresiones siguientes (ecuaciones 13 y 14).

$$K = 0,041 C^{0,522} \exp\left(\frac{7,119}{RT}\right) \quad (\text{Ecuación 13})$$

$$K = 0,107 \exp\left(\frac{7,572}{RT} + 0,020C\right) \quad (\text{Ecuación 14})$$

La E_a para ambos modelos arrojó valores similares, mientras que los valores de K_3 , K_4 , n_3 y n_4 fueron diferentes. No obstante, el modelo exponencial sugiere un mejor ajuste a los datos experimentales obtenidos ($R^2 = 0,905$ y $CME = 0,109$), respecto al modelo de ley de potencia ($R^2 = 0,874$ y $CME = 0,144$), lo que indica que el efecto de la temperatura y la concentración en los parámetros reológicos se explica por un comportamiento exponencial, condicionado por la viscosidad de la pulpa de mango. Estos resultados son similares a los reportados en pulpa concentrada de mango y jugos concentrados de guanábana, uva y cereza (Juszczak & Fortuna, 2004; Kaya & Belibagli, 2002; Ortega et al., 2015; Quek et al., 2013).

Conclusiones

El comportamiento reológico de la pulpa edulcorada de mango de hilacha fue ajustado al modelo de la ley de potencia, de acuerdo con el cual presentó un comportamiento pseudoplástico en el intervalo de temperatura de 10 °C a 50 °C. La incorporación de sacarosa afectó significativamente la concentración de SST ($p < 0,05$), lo que aumentó gradualmente el coeficiente de consistencia. La temperatura ejerció un efecto significativo sobre el coeficiente de consistencia ($p < 0,05$), pues este disminuyó con el inverso de la temperatura descrito a través del modelo de Arrhenius, mientras que el índice de flujo disminuyó linealmente con el aumento de temperatura. El modelo exponencial presentó un mejor ajuste para predecir el comportamiento del coeficiente de consistencia frente a efectos de temperatura, con-

centración y efectos combinados ($R^2 > 0,90$). Para facilitar el proceso de flujo e intercambio de calor, el procesamiento de la pulpa edulcorada de mango debe realizarse a temperaturas superiores a 30 °C, debido a que así se obtienen menores índices de consistencia y, por ende, menor viscosidad.

Agradecimientos

Agradecemos al Grupo de Investigación Procesos Agroindustriales y Desarrollo Sostenible (PADES) adscrito a la Universidad de Sucre, por facilitar equipos y materiales para el desarrollo de la investigación.

Descargos de responsabilidad

Los autores declaran que no existen conflictos de interés en la ejecución, el análisis y la presentación de resultados de la investigación.

Referencias

- Andrade, R. D., Torres, R., Montes, E. J., Pérez, O. A., Restan, L. E., & Peña, R. E. (2009). Efecto de la temperatura en el comportamiento reológico de la pulpa de níspero (*Achras sapota* L.). *Revista de la Facultad de Agronomía*, 26(4), 599-612.
- Association of Official Agricultural Chemists [AOAC]. (2005). *Official methods of analysis* (18th ed.). Arlington, Virginia: AOAC.
- Augusto, P., Cristianini, M., & Ibarz, A. (2012). Effect of temperature on dynamic and steady-state shear rheological properties of siriguela (*Spondias purpurea* L.) pulp. *Journal of Food Engineering*, 108(2), 283-289.
- Basu, S., & Shivhare, U. S. (2010). Rheological, textural, micro-structural and sensory properties of mango jam. *Journal of Food Engineering*, 100(2), 357-365.
- Danalache, F., Carvalho, C., Alves, V., Moldão, M., & Mata, P. (2016). Optimisation of gellan gum edible coating for ready-to-eat mango (*Mangifera indica* L.) bars. *International Journal of Biological Macromolecules*, 84(1), 43-53.
- Dark, M., Verma, R. C., & Sharma, G. P. (2006). Flow characteristics of juice of "Totapuri" mangoes. *Journal of Food Engineering*, 76(4), 557-561.
- Gratão, A. C., Silveira, V., Jr., & Telis-Romero, J. (2007). Laminar flow of soursop juice through concentric annuli: friction factors and rheology. *Journal of Food Engineering*, 78(4), 1343-1354.
- Gundurao, A., Ramaswamy, H. S., & Ahmed, J. (2014). Effect of soluble solids concentration and temperature on thermo-physical and rheological properties of mango puree. *International Journal of Food Properties*, 14(5), 1018-1036.
- Haminiuk, C., Sierakowski, M., Vidal, J., & Masson, M. (2006). Influence of temperature on the rheological behavior of whole araçá pulp (*Psidium cattleianum* Sabine). *LWT - Food Science and Technology*, 39(4), 426-430.
- Instituto Colombiano de Normas Técnicas [Icontec]. (2004). *NTC 5139: frutas frescas. Mangos criollos*. Especificaciones. Bogotá: Icontec.
- Instituto Colombiano de Normas Técnicas [Icontec]. (2007). *NTC 5468: zumos, néctares, purés (pulpas) y concentrados de frutas*. Bogotá: Icontec.
- Juszczak, L., & Fortuna, T. (2004). Effect of temperature and soluble solid content on the viscosity of cherry juice concentrate. *International Agrophysics*, 18(1), 17-21.
- Kaya, A., & Belibagli, K. (2002). Rheology of solid gaziantep pekmez. *Journal of Food Engineering*, 54(3), 221-226.
- Krokida, M. K., Maroulis, Z. B., & Saravacos, G. D. (2001). Rheological properties of fluid fruit and vegetables puree products: Compilation of literature data. *International Journal of Food Properties*, 4(2), 179-200.
- Maceiras, R., Álvarez, E., & Cancela, M. A. (2007). Rheological properties of fruit purees: Effect of cooking. *Journal of Food Engineering*, 80(3), 763-769.
- Nambi, V. E., Thangavel, K., Rajeswari, K. A., Manickavasagan, A., & Geetha, V. (2016). Texture and rheological changes

- of Indian mango cultivars during ripening. *Postharvest Biology and Technology*, 117(1), 152-160.
- Oliveira, B., Costa, H., Ventura, J., Kondratyuk, T., Barroso, M., Correia, R., ... Romão, W. (2016). Chemical profile of mango (*Mangifera indica* L.) using electrospray ionisation mass spectrometry (ESI - MS). *Food Chemistry*, 204, 37-45.
- Ortega, F., Salcedo, E., Arrieta, R., & Torres, R. (2015). Efecto de la temperatura y concentración sobre las propiedades reológicas de la pulpa de mango variedad Tommy Atkins. *Revista Ion*, 28(2), 79-92.
- Pereira, C. G., Resende, J. V., & Giarola, T. M. (2014). Relationship between the thermal conductivity and rheological behavior of acerola pulp: Effect of concentration and temperatura. *LWT - Food Science and Technology*, 58(2), 446-453.
- Quek, M. C., Chin, N. L., & Yusof, Y. A. (2013). Modelling of rheological behaviour of soursop juice concentrates using shear rate-temperature-concentration superposition. *Journal of Food Engineering*, 118(4), 380-386.
- Rao, M. A. (2006). *Rheology of fluid and semisolid foods: Principles and applications* (2nd ed.). Geneva, EE. UU.: Springer.
- Souza, E. P., Queiroz, A. J., Figueiredo, R. M., & Lemos, D. M. (2014). Comportamento reológico e efeito da temperatura da polpa de pequi em diferentes concentrações. *Brazilian Journal of Food Technology*, 17(3), 226-235.
- Thanaraj, T., Terry, L. A., & Bessant, C. (2009). Chemometric profiling of pre-climateric Sri Lankan mango fruit (*Mangifera indica* L.). *Food Chemistry*, 112(4), 786-794.
- Tirado, D., Acevedo, D., & Montero, P. (2014). Propiedades reológicas de la pulpa edulcorada de tamarindo. *Revista UDCA Actualidad & Divulgación Científica*, 17(2), 495-501.
- Vidal, J., Pelegri, D., & Gasparetto, C. (2004). Efeito da temperatura no comportamento reológico da polpa de manga (*Mangifera indica* L. cv. Keitt). *Food Science and Technology (Campinas)*, 24(1), 039-042.