

El papel de la reología en la caracterización de fluidos: Análisis reológico de dispersiones de almidón de distintas fuentes



Wendy Magaly Arias Balderas¹, Miguel Ángel Aguilar Méndez¹,
María Eugenia Ramírez Ortíz², Delia Quintana-Zavala¹

¹Centro de Investigación en Ciencia Aplicada y Tecnología Avanzada del Instituto Politécnico Nacional. Legaria 694. Colonia Irrigación, Ciudad de México, C.P. 11500.

²Facultad de Estudios Superiores Cuautitlán Campus 1. Universidad Nacional Autónoma de México. Av. 1° de mayo S/N, Santa María las Torres, Cuautitlán Izcalli, Estado de México, C.P. 54740.

E-mail: dquintana@ipn.mx

(Recibido el 12 de septiembre de 2020, aceptado el 22 de diciembre de 2020)

Resumen

El análisis reológico de fluidos es de gran importancia en la industria debido a que sus propiedades reológicas impactan en el manejo, tratamiento y aplicación. Entre los fluidos más estudiados y empleados se encuentran los polímeros y biopolímeros como los almidones. Este estudio presenta los principales fundamentos de reología; así como la aplicación de estos principios en la caracterización de dispersiones de almidón de maíz, papa y chinchayote, mediante un análisis de cizallamiento estático y dinámico oscilatorio. Los resultados mostraron que las dispersiones de almidón de maíz al 5 y 9 % presentaron un comportamiento similar al de un fluido newtoniano. Estas dispersiones registraron los valores menores de índice de consistencia (K). Mientras que las correspondientes a los almidones de papa y chinchayote tuvieron un comportamiento de fluidos no newtonianos y pseudoplásticos. Ambos almidones mostraron los valores más altos de K en las dos concentraciones. De acuerdo con los resultados, se concluye que el almidón de chinchayote presenta propiedades reológicas similares a las del almidón de papa.

Palabras clave: Reología, análisis reológico, almidón.

Abstract

Rheological analysis of fluids is of great importance in related industries because rheological properties of fluids impact handling, treatment, and application. Among the fluids most frequently studied and used are polymers and biopolymers, such as starches. This study presents the main foundations of rheology in addition to the application of these principles in the characterization of corn, potato, and chinchayote starch dispersions by means of static and dynamic oscillatory shear analyses. The results showed that the 5% and 9% corn starch dispersions present a behavior similar to that of a Newtonian fluid. These dispersions registered the lowest values of the consistency indices (K), while those corresponding to potato and chinchayote starches had non-Newtonian and pseudoplastic fluid behaviors. Both of these starches showed the highest K values at the two selected concentrations. According to the results, it can be concluded that chinchayote starch has rheological properties similar to those of potato starch.

Keywords: Rheology, rheological analysis, starch.

I. INTRODUCCIÓN

La reología es la rama de la física encargada del estudio de la deformación y fluidez de los materiales [1, 2]. Así mismo, estudia el comportamiento de ciertos fluidos como respuesta al ser sometidos a una tensión mecánica [2].

La reología analiza las propiedades mecánicas de un campo amplio de materiales, que van desde los gases hasta

los sólidos. Además, es utilizada para describir y entender la consistencia, viscosidad y elasticidad de los fluidos [3].

Un fluido es considerado como cualquier sustancia que presenta deformación al aplicársele un esfuerzo tangencial, sin importar la magnitud de este. Dicho esfuerzo puede ser una compresión, tensión o una fuerza de cizalla [4]. Su estudio es de suma importancia en industrias como las de plásticos, alimentos, adhesivos, pinturas, detergentes, tintas de impresión, entre varias otras [5].

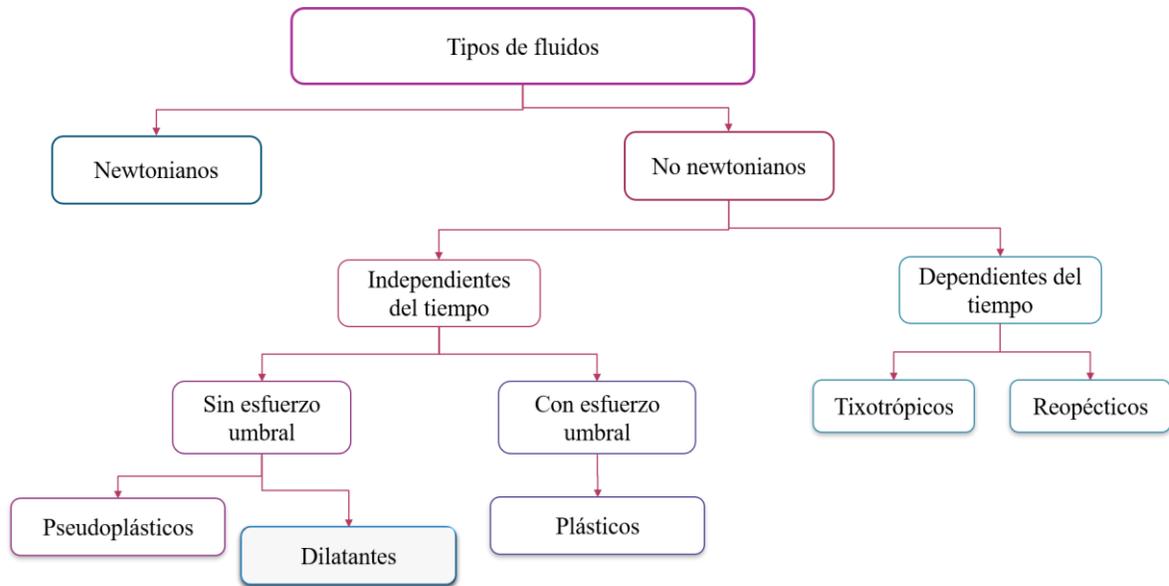


FIGURA 1. Clasificación de los fluidos en respuesta a su comportamiento al ser sometidos a una fuerza de corte.

Los fluidos pueden clasificarse dependiendo su comportamiento al ser sometidos a una fuerza de cizalla (Figura 1). Algunos pueden ser newtonianos o no newtonianos, dependientes o no del tiempo, etc. [4, 6].

Los fluidos newtonianos se caracterizan por no variar su viscosidad al cambiar la tasa de cizalladura, ni el tiempo. Únicamente varían dependiendo la temperatura. Su modelo obedece a la siguiente ecuación:

$$\tau = \mu \frac{d\gamma}{dt} = \mu \dot{\gamma} \quad (1)$$

Donde:

τ = esfuerzo cortante (Pa), $d\gamma/dt = \dot{\gamma}$ = tasa de cizallamiento (s^{-1}) y μ = viscosidad absoluta (Pa s).

Los fluidos no newtonianos son aquellos que se presentan con mayor frecuencia. En ellos no hay linealidad y su viscosidad puede depender de la tasa de cizallamiento o del tiempo, y en algunas ocasiones puede presentar una combinación de comportamiento viscoelástico [6]. La mayoría de los polímeros presenta este tipo de comportamiento.

Generalmente, los análisis de las propiedades reológicas proporcionan información que es de suma importancia para la industria, principalmente valores de viscosidad. La viscosidad es la resistencia que opone un líquido a fluir [7]. La caracterización reológica cuantifica las propiedades resultantes de viscosidad, elasticidad, viscoelasticidad, comportamiento al flujo y recuperación [8]. Las técnicas más comúnmente empleadas para el estudio de las propiedades reológicas son los análisis de cizallamiento constante y ensayos de cizallamiento dinámico (oscilatorio) [9].

El equipo utilizado para determinar las propiedades reológicas es el reómetro. El cual es un instrumento de alta precisión que contiene el fluido a medir en una configuración geométrica; así mismo, controla el ambiente que rodea al

fluido y mide intervalos de esfuerzo, deformación y velocidad de deformación [10].

El modelo matemático más utilizado para caracterizaciones reológicas de polímeros y biopolímeros es el modelo de la ley de la potencia, en donde se relaciona la fuerza de cizallamiento con la variación del gradiente de cizalla [11]. Este modelo se rige por la siguiente ecuación:

$$\tau = \kappa \cdot \dot{\gamma}^n \quad (2)$$

Donde:

τ = esfuerzo cortante o de cizallamiento, $\dot{\gamma}$ = gradiente de cizallamiento, K = índice de consistencia y n = índice de comportamiento al flujo.

Sin embargo, a veces un análisis de cizallamiento constante o de corte estable no es suficiente sobre todo tratándose de materiales como los biopolímeros en disolución. Los biopolímeros normalmente presentan un comportamiento mecánicamente dominado por un carácter viscoelástico. Dicho comportamiento sigue el modelo propuesto por Maxwell, el cual establece que las propiedades de un fluido eran una combinación entre una parte elástica y una viscosa, dando paso al término de viscoelasticidad [12].

Las pruebas recomendadas para medir las propiedades viscoelásticas lineales de una sustancia son las pruebas oscilatorias y de recuperación. En este tipo de pruebas la tensión aplicada en la región viscoelástica es baja, para no producir un cambio irreversible en la estructura de la muestra. El flujo producido a bajas frecuencias provoca una pequeña deformación sinusoidal, con toda precisión y control [13, 14].

El esfuerzo (τ) producido por una deformación de amplitud pequeña es proporcional a la amplitud de deformación aplicada γ_0 . El esfuerzo, al igual que la deformación, varía sinusoidalmente con el tiempo. Sin

embargo, el esfuerzo o torque medido no está necesariamente en fase con la deformación:

$$\gamma = \gamma_0 \text{sen } \omega t, \quad (3)$$

$$\tau = \tau_0 \text{sen } (\omega t + \delta). \quad (4)$$

Donde:

ω representa la frecuencia de oscilación, τ la amplitud del esfuerzo y δ el ángulo de desfase entre el esfuerzo y la deformación.

Si se descompone la onda del esfuerzo en dos ondas de la misma frecuencia, una en fase con la deformación y la otra desfasada 90° , se obtiene:

$$\tau = \tau' + \tau'' = \tau' \text{sen } \omega t + \tau'' \text{cos } \omega t. \quad (5)$$

La fase entre esfuerzo y deformación está dada por:

$$\tan \delta = \frac{\tau''_0}{\tau'_0}. \quad (6)$$

De la descomposición del esfuerzo se pueden obtener dos módulos:

$$G' = \frac{\tau'_0}{\gamma_0}, \quad (7)$$

$$G'' = \frac{\tau''_0}{\gamma_0}. \quad (8)$$

Sustituyendo las ecuaciones (7) y (8) en (5) se obtiene:

$$\tau(t) = \gamma_0 [G'(\omega)\text{sen } (\omega t) + G''(\omega)\text{cos } (\omega t)]. \quad (9)$$

Esta ecuación representa el esfuerzo en flujo oscilatorio de pequeña amplitud. El término G' , llamado módulo de almacenamiento, está en fase con la deformación (γ). Mientras que G'' está en fase con la rapidez de deformación ($\dot{\gamma}$) y es denominado módulo de pérdida. El módulo de almacenamiento representa el almacenamiento de energía elástica y el módulo de pérdida la disipación viscosa de energía [3].

Entre los fluidos de mayor interés y en los cuales la caracterización reológica es de suma importancia se encuentran los polímeros y biopolímeros. Entre estos últimos los más utilizados a nivel industrial son los polisacáridos, tales como almidones, gomas, carboximetilcelulosa (CMC), alginatos, etc. [1].

Los almidones son comúnmente estudiados debido principalmente a que son una fuente de materia prima accesible para la industria, la cual los utiliza como agente viscosante, espesante, estabilizante, gelificante y agente de retención de agua. Dichas propiedades son resultado de algunas características propias del tipo de almidón, relación amilosa/amilopectina, estructura, tamaño de gránulo, etc., [8]. Para que un almidón sea útil industrialmente, debe cumplir con algunas características reológicas, tales como la resistencia al someterlos a altos esfuerzos de cizallamiento,

resistencia a la temperatura y baja tendencia a la retrogradación [15].

Los almidones son de los principales componentes de granos y tubérculos, y representan la estructura con mayor capacidad de retención de agua. Los gránulos de almidón al ser sometidos a un proceso de calentamiento sufren un hinchamiento por absorción de agua; si se continúa la exposición a este proceso, los gránulos se romperán y finalmente se obtendrá un gel espeso durante el enfriamiento [15].

La estructura característica del almidón es la que otorga el carácter viscoelástico a los geles creados, el cual es de suma utilidad en diferentes áreas de la industria [16]. El presente estudio tuvo por objetivo mostrar la relevancia del análisis reológico, por medio de la caracterización por cizallamiento estático y dinámico de dispersiones de almidón de distintas fuentes.

II. MATERIALES Y MÉTODOS

A. Materiales

Almidón de maíz (S-4126) y almidón de papa soluble (s-2630) se adquirieron comercialmente de Sigma-Aldrich (St. Louis, EUA). Almidón de chinchayote se obtuvo en el laboratorio de Biomateriales (CICATA-IPN, México), a partir de la raíz tuberizada de *Sechium edule*.

B. Preparación de las dispersiones de los distintos almidones

Se prepararon dispersiones de almidón a concentraciones de 5 y 9 % ($\text{m} \cdot \text{v}^{-1}$). Estas se realizaron calentando 25 mL de agua destilada a 50°C y dispersando lentamente la cantidad de almidón correspondiente. Las mezclas fueron sometidas a agitación constante durante 15 min, empleando una parrilla de agitación/calentamiento. Finalmente, las dispersiones fueron enfriadas a temperatura ambiente (25°C) antes de realizar el análisis reológico.

B. Prueba de cizallamiento constante

Este análisis se realizó siguiendo la metodología descrita por Li y Zhu [17] con algunas modificaciones. Se colocó un pequeño volumen de las dispersiones de almidón (5 y 9 %) sobre la placa de un reómetro modular (MCR-302, Anton Paar, México). Se utilizó como dispositivo una placa paralela PP25 (25 mm de diámetro) y se fijó un gap de 1.0 mm. Las muestras se mantuvieron a 25°C , con esfuerzo cortante constante (5 Pa) y velocidades de corte de $0 - 300 \text{ s}^{-1}$ y $300 - 0 \text{ s}^{-1}$. Finalmente, se obtuvo la relación entre esfuerzo de corte y velocidad de corte, mediante el modelo de la ley de la potencia (Ecuación 10). Las pruebas se realizaron por duplicado para cada muestra y concentración.

$$\sigma = \kappa \gamma^n. \quad (10)$$

Wendy M. Arias, Miguel A. Aguilar, María E. Ramírez & Delia Quintana
Donde:

σ = esfuerzo cortante (Pa), γ = velocidad de corte (s^{-1}), κ = índice de consistencia y n = índice de comportamiento al flujo.

C. Análisis dinámico oscilatorio

El análisis oscilatorio se llevó a cabo utilizando un reómetro modular (MCR-302, Anton Paar, México). Se utilizó como dispositivo una placa paralela PP25 (25 mm de diámetro) y se fijó un gap de 1.0 mm. Las muestras se mantuvieron a 25 °C. Primeramente se realizó un barrido de amplitud para determinar los límites de la región viscoelástica lineal. Se utilizó un intervalo de 0.01–100% y una frecuencia constante de 10 rad s^{-1} .

Posteriormente, se llevó a cabo un barrido de frecuencia en un intervalo de frecuencia angular de 0.1–100 rad s^{-1} y una amplitud de deformación constante ($\gamma = 1\%$); obteniendo los valores de G' (módulo elástico/almacenamiento) en Pa y G'' (módulo de viscosidad/pérdida) en Pa. Todas las mediciones se realizaron por duplicado.

D. Análisis estadístico

Los experimentos fueron realizados por duplicado y los resultados obtenidos de cada prueba fueron analizados usando el software IS Infostat Version 2017, expresados como la media \pm desviación estándar. Así mismo se realizó un análisis de varianza ANOVA y diferencia de medias mediante prueba de Tukey con un nivel de significancia de $P < 0.05$.

III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

A. Prueba de cizallamiento constante

El análisis de cizallamiento constante (Figura 2) mostró que la dispersión de almidón de maíz al 5 % presentó un comportamiento muy cercano al de un fluido newtoniano, su relación entre tensión y velocidad de cizallamiento es casi lineal y comienza prácticamente en cero. Mientras que las dispersiones elaboradas con almidones de papa y chinchayote presentaron un comportamiento no newtoniano.

Por otra parte, se observó una diferencia entre las curvas de ascenso y descenso, este fenómeno es muy común en almidones y sugiere que, en el intervalo de velocidades de corte estudiadas, la estructura del almidón fue alterada de forma irreversible [17]. Tanto las dispersiones de almidón de papa como la de chinchayote mostraron un comportamiento pseudoplástico a esta concentración.

Los valores de K y n ajustados a un modelo de la potencia se presentan en la Tabla I, donde se puede observar que los valores mayores de índice de consistencia, en las curvas de ascenso, se obtuvieron en las dispersiones de los almidones de papa y chinchayote, no existiendo diferencia significativa entre ambos ($P < 0.05$). Sin embargo, en las curvas de descenso el almidón de papa presentó un valor mayor de K .

Por otro lado, los valores de K disminuyeron considerablemente en las curvas de descenso. Esto podría deberse a la presencia de fósforo en la estructura de ambos almidones, el cual les otorga un alto poder viscosante y de gran interacción con las moléculas de agua [18].

Con respecto a los valores de n , estos fueron muy similares en las dispersiones de los 3 almidones, presentando valores menores a 1 y mostrando su carácter no newtoniano-pseudoplástico. Por otra parte, solo las curvas de ascenso de los almidones de maíz y chinchayote fueron estadísticamente diferentes ($P < 0.05$). En el caso de la curva de descenso, únicamente el almidón de maíz presentó una diferencia significativa.

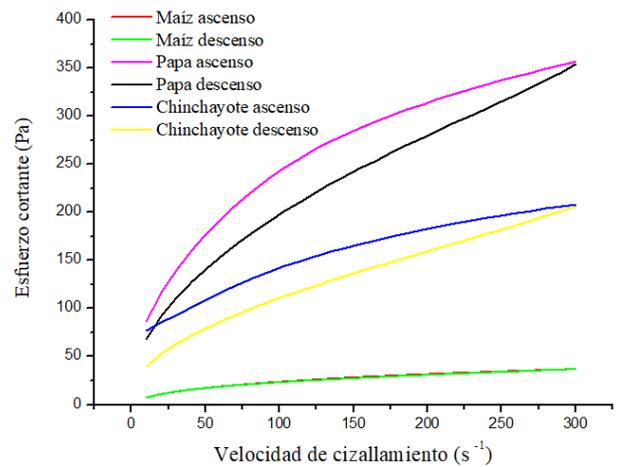


FIGURA 2. Curvas de flujo (curvas de ascenso y descenso) para dispersiones de almidones de maíz, papa y chinchayote al 5 %.

TABLA I. Propiedades reológicas de dispersiones de almidones al 5 % ajustadas al modelo de la potencia.

Almidón	Ascenso		
	K (Pa)	n	r^2
Maíz	2.06 ± 1.17^b	0.44 ± 0.01^a	0.9959
Papa	34.40 ± 1.20^a	0.42 ± 0.02^{ab}	0.989
Chinchayote	30.75 ± 1.09^a	0.35 ± 0.02^b	0.9871
	Descenso		
	K (Pa)	n	r^2
Maíz	2.68 ± 0.31^c	0.44 ± 0.02^b	0.9961
Papa	20.84 ± 1.34^a	0.49 ± 0.0^a	0.999
Chinchayote	12.71 ± 1.53^b	0.49 ± 0.01^a	0.9959

K = índice de consistencia, n = índice de comportamiento al flujo. Resultados expresados como el valor de media \pm desviación estándar. Letras diferentes en una misma columna demuestran diferencia significativa para $P < 0.05$.

En cuanto al análisis de dispersiones de almidones al 9 % (Figura 3), la dispersión elaborada con almidón de maíz nuevamente presentó un comportamiento muy similar al de un fluido newtoniano. Así mismo, las dispersiones de almidones de papa y chinchayote conservaron su carácter no newtoniano-pseudoplástico. Sin embargo, se logró observar

que el comportamiento al flujo de estos últimos es más parecido a esta concentración que en las dispersiones al 5 %. De la misma manera se mantuvo la tendencia entre las curvas de ascenso y descenso.

Por otra parte, en la Tabla II se puede observar que los valores mayores de índice de consistencia se obtuvieron en las dispersiones de almidones de papa y chinchayote, no presentando diferencia significativa entre ellos durante la curva de ascenso ($P < 0.05$). Sin embargo, en la curva de descenso no se encontró diferencia significativa entre ninguno de los tres tipos de almidón ($P > 0.05$).

Referente al índice de comportamiento al flujo (n), se conservó la tendencia de presentar valores inferiores a 1, demostrando su comportamiento pseudoplástico y no existiendo diferencia significativa entre almidones de papa y chinchayote.

Al comparar los valores de K para ambas concentraciones estudiadas, se obtuvo un incremento en la consistencia de todas las dispersiones al aumentar la concentración de 5 a 9 % y no existió cambio en el comportamiento de las dispersiones en cuanto al tipo de fluido no newtoniano-pseudoplástico.

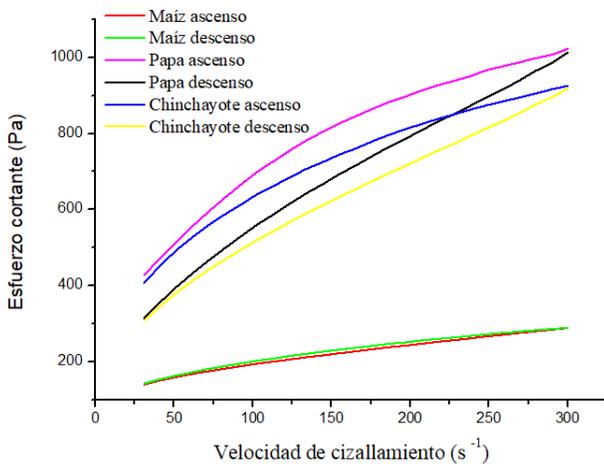


FIGURA 3. Curvas de flujo (curvas de ascenso y descenso) para dispersiones de almidones de maíz, papa y chinchayote al 9 %.

TABLA II. Propiedades reológicas de dispersiones de almidones al 9 % ajustadas al modelo de la potencia.

Almidón	Ascenso		
	K (Pa)	n	r^2
Maíz	49.12 ± 7.16^b	0.30 ± 0.02^b	0.9902
Papa	115.46 ± 7.60^a	0.39 ± 0.0^a	0.9977
Chinchayote	121.02 ± 0.37^a	0.37 ± 0.0^a	0.9994
Almidón	Descenso		
	K (Pa)	n	r^2
Maíz	50.27 ± 5.13^a	0.30 ± 0.01^b	0.9969
Papa	58.0 ± 11.96^a	0.50 ± 0.02^a	0.9951
Chinchayote	71.55 ± 11.71^a	0.45 ± 0.01^a	0.9955

K = índice de consistencia, n = índice de comportamiento al flujo. Resultados expresados como el valor de media \pm desviación estándar. Letras diferentes en una misma columna demuestran diferencia significativa para $P < 0.05$.

B. Análisis dinámico oscilatorio

En el análisis reológico oscilatorio se obtuvo un incremento en los módulos de almacenamiento G' y de pérdida G'' al aumentar la frecuencia oscilatoria. Para el caso de las dispersiones de los tres almidones, el módulo de almacenamiento fue mayor al módulo de pérdida en el intervalo de bajas frecuencias ($0.1-100 \text{ rad s}^{-1}$), esto indica que las dispersiones presentan características de un sólido, además de las propias de un fluido viscoso, por lo tanto, presentan características viscoelásticas aún a concentraciones del 5 %. Con ello, se comprobó que las dispersiones presentaron formación de geles de almidón.

A esta concentración los valores mayores de G' y G'' fueron obtenidos con almidón de chinchayote, seguidos por el de papa (Tabla III). Sin embargo, estadísticamente no existió diferencia significativa entre ninguno de los 3 almidones. De acuerdo con McCann [19], existe una gran relación entre el tamaño de gránulo, estructura, contenido de amilosa, acomodo de los gránulos de almidón y la resistencia que presentan los geles en pruebas reológicas.

Con respecto a los valores de $\tan \delta$, en todos los casos fueron muy similares y menores a 1, los cuales corroboraron que los valores de G' fueron mayores a los de G'' . A pesar de que los valores fueron muy similares, estadísticamente existió diferencia significativa entre los 3 tipos de almidón.

Referente a las dispersiones elaboradas con una concentración al 9 %, se obtuvo la misma tendencia que la presentada en las dispersiones al 5 %, donde los valores de G' fueron nuevamente mayores a los de G'' . Sin embargo, a esta concentración, los valores mayores de G' fueron obtenidos con almidones de papa y chinchayote, existiendo una diferencia significativa con respecto a la dispersión preparada con almidón de maíz. Nuevamente, los valores de $\tan \delta$ fueron menores a 1, sugiriendo la formación de geles de almidón, con características viscoelásticas y donde los valores de G' son mayores a los de G'' .

Sin importar la variación de concentración de las dispersiones (5 y 9 %), estas presentan propiedades de un fluido viscoelástico propias de un gel. De lo contrario, al aumentar la concentración de las dispersiones habrá un incremento en los valores de G' creando geles más firmes y consistentes.

TABLA III. Propiedades dinámicas oscilatorias para dispersiones de almidones de maíz, papa y chinchayote a concentraciones del 5 y 9 %.

Almidón	5%	
	$G'_{63 \text{ rad/s}}$ (Pa)	$\tan \delta_{63 \text{ rad/s}}$
Maíz	95.95 ± 3.32^a	0.16 ± 0.01^c

Papa	111.70 ± 17.39 ^a	0.32 ± 0.00 ^a
Chinchayote	246.5 ± 86.97 ^a	0.30 ± 0.01 ^b
9%		
	$G'_{63 \text{ rad/s}} \text{ (Pa)}$	$\tan \delta_{63 \text{ rad/s}}$
Maíz	214 ± 6.36 ^b	0.09 ± 0.0 ^c
Papa	881 ± 15.56 ^a	0.33 ± 0.01 ^a
Chinchayote	743 ± 113.14 ^a	0.23 ± 0.01 ^b

K = índice de consistencia, n = índice de comportamiento al flujo. Resultados expresados como el valor de media ± desviación estándar. Letras diferentes en una misma columna demuestran diferencia significativa para $P < 0.05$.

IV. CONCLUSIONES

Los almidones de papa y chinchayote desarrollaron geles con mayor consistencia, a las concentraciones estudiadas, lo que representa mejores propiedades en comparación con las del almidón de maíz. Los almidones de papa y chinchayote desarrollaron un comportamiento no newtoniano-pseudoplástico, mientras que el almidón de maíz presentó un comportamiento similar al de un fluido newtoniano. En un estudio futuro se pretende evaluar el efecto de la temperatura en el comportamiento reológico de estos almidones.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen al Instituto Politécnico Nacional y SIP-IPN por el apoyo otorgado para la realización de esta investigación. El primer autor agradece a CONACYT por el apoyo otorgado mediante una beca para el desarrollo de este proyecto.

REFERENCIAS

- [1] Billmeyer, E. W., *Ciencia de los polímeros*, 2 ed., (Reverté, Barcelona, 2020).
- [2] Guzmán, E., et al., *Shear rheology of fluid interfaces. Closing the gap between macro and micro-rheology*, Current opinion in Colloid & interface science **37**, 33-48 (2018).
- [3] Rojas, O, Briceño, M. I. y Avendaño, J., *Fundamentos de reología*, Cuaderno FIRP Versión 2, (Universidad de los Andes, Venezuela, 2012).
- [4] Lasheras Ruíz, A. J., *Determinación de las propiedades reológicas de soluciones acuosas de carboximetilcelulosa*

(CMC), por mediciones experimentales en viscosímetro rotacional AR-G2, (Universidad Politécnica de Cartagena, Colombia, 2009).

- [5] González Roldán, S., *Diseño mecánico de un equipo para medida de la viscosidad en fluidos no newtonianos*, (Universidad Politécnica de Cartagena, Colombia, 2009).
- [6] Ciro Velásquez, H. J., *Reología de fluidos y su aplicación en alimentos*, (Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, 2006).
- [7] Ramírez Navas, J. S., *Introducción a la reología de los alimentos*, ReCiTeIa **6**, No. 1 (2006).
- [8] Day, L. & Golding, M., *Food structure, rheology and texture*, Encyclopedia of Food Chemistry: Reference module in food science, 1-5 (2016).
- [9] Jósziak, B & Boncel, S., *Rheology of ionanofluids- A review*, Journal of Molecular Liquids **302**, 112568 (2020).
- [10] T. A. Instruments. *Folleto de reología*, (Waters Corporation, U.S.A, 2020).
- [11] Andrade, R.D., et al., *Efecto de la Temperatura en el comportamiento reológico de la pulpa de níspero (Achras sapota L.)*, Revista de la Facultad de Agronomía **26**, 599-612 (2009).
- [12] Beltrán Rico, M. & Marcilla Gomis, A., *Tecnología de polímeros. Procesado y propiedades*, (Publicaciones de la Universidad de Alicante, España, 2012).
- [13] Tarancón, P., Hernández, M. J., Salvador, A., & Sanz, T., *Relevance of creep and oscillatory tests for understanding how cellulose emulsions function as fat replacers in biscuits*, LWT. Food Science & Technology **62**, 640-646, (2015).
- [14] Sun, X., et al., *Modeling the viscoelastic behavior of wheat flour dough prepared from a wide range of formulations*, Food Hydrocolloids **98**, 105129 (2020).
- [15] Velásquez-Barreto, F. & Velezmoro, C., *Propiedades reológicas y viscoelásticas de almidones de tubérculos andinos*, Scientia Agropecuaria **9**, 189-197 (2018).
- [16] Zeng, X., et al., *Insights into the relationship between structure and rheological properties of starch gels in hot-extrusion 3D printing*, Food Chemistry, 128362, (2020).
- [17] Li, D. & Zhu, F., *Physicochemical properties of kiwifruit starch*, Food Chemistry **220**, 129-136 (2017).
- [18] Jiménez-Hernández, J., Salazar-Montoya, J. A. & Ramos-Ramírez, E. G., *Physical, chemical, and microscopic characterization of a new starch from chayote (Sechium edule) tuber and its comparison with potato and maize starches*, Carbohydrate Polymers, **68**, 679-686 (2007).
- [19] McCann, T. H., et al., *High amylose wheat starch increases the resistance to deformation of wheat flour dough*, Journal of Cereal Science **79**, 440-448 (2018).