

© 2023 Universidad Nacional Autónoma de México, Facultad de Estudios Superiores Zaragoza.
Este es un artículo Open Access bajo la licencia CC BY-NC-ND (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>).
TIP Revista Especializada en Ciencias Químico-Biológicas, 26: 1-10, 2023.
<https://doi.org/10.22201/fesz.23958723e.2023.593>

Comportamiento reológico de las gomas extraídas de las semillas de flamboyán (*Delonix regia*), pixoy (*Guazuma ulmifolia*) y leucaena (*Leucaena leucocephala*): ingredientes de uso como aditivos, potenciales, en los alimentos

María Eugenia Ramírez-Ortiz¹, Luis Jorge Corzo-Ríos², Wilbert José Rodríguez-Canto³,
David Betancur-Ancona³ y Luis Chel-Guerrero^{3*}

¹Depto. de Ingeniería y Tecnología, Facultad de Estudios Superiores Cuautitlán, Universidad Nacional Autónoma de México, Av. 1° de mayo s/n, Cuautitlán Izcalli, 57420, Edo. de México, México. ²Depto. de Bioprocesos, Unidad Profesional Interdisciplinaria de Biotecnología, Instituto Politécnico Nacional, Av. Acueducto s/n, Barrio La Laguna, Col. Ticomán, 07340, Ciudad de México, México. ³Facultad de Ingeniería Química, Universidad Autónoma de Yucatán, Campus de Ingenierías y Ciencias Exactas, Periférico Norte Km 33.5, Tablaje Catastral # 13615, Col. Chuburná de Hidalgo Inn, 97203, Mérida, Yucatán, México. E-mail: *cguerrero@uady.mx

RESUMEN

Las gomas o hidrocoloides son ingredientes importantes en la industria alimentaria por su empleo como espesantes, estabilizantes, gelificantes y para mejorar la textura en los alimentos. En este estudio, se evaluó el comportamiento reológico de las gomas extraídas de las semillas de flamboyán (*Delonix regia*), de pixoy (*Guazuma ulmifolia*) y de leucaena (*Leucaena leucocephala*) a distintas concentraciones. Se determinaron las curvas de flujo y de viscoelasticidad de las dispersiones de las gomas en agua al 0.5, 1.0 y 1.5%, y se ajustaron a distintos modelos matemáticos. En las tres gomas, a bajas concentraciones, el modelo matemático que mejor describió el comportamiento reológico fue el de la ley de la potencia y en altas concentraciones el comportamiento fue mejor descrito por el modelo de Cross. La viscosidad disminuyó al incrementarse la velocidad de cizallamiento y los valores del índice de flujo (n) indicaron un comportamiento reofluidizante ($n < 1$) para todas las concentraciones evaluadas. Los valores del índice de consistencia (K) fueron más altos para las dispersiones de la goma de pixoy (0.71-1.79) comparadas con las otras gomas (0.10-0.61) en todas las concentraciones estudiadas. En la goma de pixoy el módulo elástico fue mayor que en el módulo viscoso con una ligera dependencia a la frecuencia, esto está asociado con un comportamiento tipo gel, en las de flamboyán y leucaena el tipo de comportamiento fue el de una solución macromolecular.

Palabras clave: hidrocoloides, *Delonix regia*, *Guazuma ulmifolia*, *Leucaena leucocephala*, reología, viscoelasticidad.

Rheological behavior of gums extracted from flamboyant (*Delonix regia*), pixoy (*Guazuma ulmifolia*) and leucaena (*Leucaena leucocephala*) seeds: Potential ingredients for use as additives in food

ABSTRACT

Gums or hydrocolloids are important ingredients in the food industry due to their use as thickeners, stabilizers, gelling agents and texture enhancers in the foods in which they are used. In this study, gums rheological behaviors from seeds of flamboyant (*Delonix regia*), pixoy (*Guazuma ulmifolia*), and leucaena (*Leucaena leucocephala*) at several concentrations were evaluated. The flow and viscoelasticity curves of dispersions in water at 0.5, 1.0 and 1.5% were determined and adjusted to different mathematical models. In the three gums, at low concentrations the best behavior adjustment was obtained with the power law model, while at high concentrations the rheological behavior was adjusted to the Cross model. Viscosity decreased with increasing shear rate and flow index values (n) indicated a shear thinning behavior ($n < 1$) for all concentrations evaluated. The values of the consistency index (K) were higher for the dispersions of the pixoy gum (0.71-1.79) than for the other gums (0.10-0.61) in all concentrations studied. The elastic modulus was greater than modulus viscous and both moduli were little dependent on the frequency in the range studied to pixoy gum, associated with gel type behavior, while flamboyant and leucaena had a macromolecular solution behavior type.

Keywords: hydrocolloid, *Delonix regia*, *Guazuma ulmifolia*, *Leucaena leucocephala*, rheology, viscoelasticity.

INTRODUCCIÓN

En diversos estudios se descubrió que las semillas y los exudados de las plantas producen una amplia variedad de polisacáridos complejos, convirtiéndose en fuentes naturales de hidrocoloides entre los que están algunos conocidos comercialmente como “gomas de origen vegetal” que al ser utilizados en la industria alimentaria promueven la estabilidad, textura y apariencia deseadas en los productos, como por ejemplo en las emulsiones y bebidas carbonatadas, en este caso por el aumento de la viscosidad en la fase continua, también se han usado para reemplazar la grasa o para disminuir la absorción de ésta por los cereales durante su fritura (Mirhosseini & Amid, 2012; Ghodke & Laxmi, 2007). Por otra parte, sirven como sustitutos de los polímeros sintéticos al presentar varias ventajas como son: un costo bajo, una toxicidad baja, disponibilidad y biodegradabilidad (Valenga, Petri, Lucyszyn, Jóc & Sierakowski, 2012).

Estas propiedades físicas y funcionales de las gommas de origen vegetal dependen de su composición química y estructura molecular. Dentro de los hidrocoloides, se encuentran los que provienen del endospermo de las semillas, como la goma de frijol locust (*Ceratonia siliqua* L.) también conocido como goma algarrobo o caroba, goma guar (*Cyamopsis tetragonoloba* L.), y goma tara (*Caesalpinia spinosa* L.), ampliamente utilizados como agentes espesantes, ligantes y estabilizantes (Azero & Andrade, 2006; Cerqueira *et al.*, 2009).

Por lo anterior, es del interés científico aprovechar las fuentes vegetales no convencionales como las semillas de flamboyán, leucaena y pixoy para la extracción de gommas, por ser materia prima renovable y biodegradable, con características funcionales útiles para la industria alimentaria. Además, si se toman en cuenta los problemas por el costo, la escasa disponibilidad y las características funcionales de los estabilizadores comerciales comunes no muy eficientes, las investigaciones están cada vez más orientadas a la búsqueda de nuevos polisacáridos de origen local (Soleimanpour, Koocheki & Kadkhodae, 2013).

El flamboyán (*Delonix regia*) es una planta leguminosa que crece en amplias zonas tropicales y subtropicales y es cultivada como un árbol ornamental. Su semilla contiene un galactomanano, estudiado previamente y reportado con un rendimiento de extracción del 28.0% con base en el peso de la semilla y del 73.0% con base en el polisacárido contenido en el endospermo. La goma extraída de su semilla se ha determinado que está compuesta por 1,4 β -D manosa, 1,4, 6 β -D manosa y α -D galactosa, una relación manosa:galactosa de 4:1, con un peso molecular de 2.5×10^5 (Tamaki, Tetura & Tako, 2010).

Otra goma es la de la semilla sub-explotada del árbol de pixoy (*Guazuma ulmifolia*), también llamado guácima, cuahulote y acashti (entre otros), el fruto de color negro al madurar es elíptico

capsular verrugoso y con semillas de idéntica forma, de cubierta dura y la presencia de una sustancia mucilaginoso (Estrada Álvarez, 2002; Chamorro, Parra, Pérez & Rey, 2006). Pereira *et al.* (2019) determinaron que el mucílago está compuesto de monosacáridos cuya cantidad en porcentaje varía, como se aprecia a continuación: la galactosa (33.2%), la ramnosa (20.6%), el ácido galacturónico (19.1%), el ácido glucurónico (18.7%) y la glucosa (8.0%). Con una amplia distribución en sitios de 0 a 1,200 m sobre el nivel del mar y temperaturas de entre 20 y 30 °C (Chamorro *et al.*, 2006; Little, Wadworth & Marrero, 2001). Las hojas y los frutos se aprovechan como: forraje, las primeras, para el ganado y los segundos por los humanos con problemas estomacales. (Estrada Álvarez, 2002; Little *et al.*, 2001).

El árbol de huaxín, huash, o huaje (*Leucaena leucocephala*) es una planta de la familia Leguminosae, originaria de Centroamérica, pero en México se concentran la mayoría de las especies (51 reportadas) (Estrada Álvarez, 2002). Sus semillas son aplanadas, lustrosas, duras y de color pardo, con una cubierta cerosa impermeable al agua y al oxígeno (Sánchez & Ramírez, 2006) y contienen entre un 20.0 a 25.0% de goma “galactomanana” con una relación de manosa y galactosa de 1.3:1 (Nwokocha & Williams, 2012).

Para evaluar las propiedades hidrodinámicas de las gommas como ingredientes o aditivos es mediante pruebas reológicas, que contribuyen al conocimiento de la estructura molecular y/o la distribución molecular de los componentes de los alimentos y sus cambios estructurales durante los procesos de elaboración. Además, de su utilidad como una herramienta de control de calidad, vida de anaquel y para el diseño de equipos de procesamiento (Koocheki & Razavi, 2009). Dispersiones con altos valores de viscosidad usualmente se obtienen con biopolímeros de grandes pesos moleculares, altamente flexibles e hidrofílicos, es el caso de la mayoría de los hidrocoloides (ej. goma xantana y quitosano), la diferencia es con las de baja viscosidad que se obtienen con polisacáridos vegetales, ejemplos, la goma arábica y proteínas como la albúmina, de estructura globular compacta (Sikora, Badrie, Deisingh & Kowalski, 2008).

Las mediciones reológicas oscilatorias son con frecuencia empleadas para investigar la gelificación o el comportamiento viscoelástico de un sistema, pues es bien conocido que se puede diferenciar un sólido de un líquido, con base en la dependencia del módulo de almacenamiento (G') y del módulo de pérdida (G'') con la frecuencia (Farahnaky, Askari, Majzoobi & Mesbahi, 2010). Es preciso, que en el estudio del comportamiento viscoelástico de un sistema disperso, se definan las condiciones experimentales para establecer una relación entre las variables de esfuerzo, deformación y de tiempo, de manera que se mantenga la linealidad de la respuesta viscoelástica (Ramos & Ibarz, 2006; Rao, 1999; Farahnaky *et al.*, 2010).

En la actualidad existe una demanda, creciente, de ingredientes con propiedades tecnofuncionales, por parte de la industria alimentaria y del consumidor moderno, cuya capacidad espesante o gelificante satisfaga la necesidad de mejorar y uniformar los atributos de calidad de los productos, estabilizarlos durante su proceso y almacenamiento, para reemplazar a los aditivos más costosos y menos disponibles en algunos países. Ante este escenario, es conveniente desde el punto de vista tecnológico y económico, darle un valor agregado a los cultivos alternos de carácter regional o autóctono por sus posibles atributos tecnofuncionales. Por lo anterior, el propósito del presente trabajo fue evaluar el comportamiento reológico de los hidrocoloides a partir de fuentes alternas y sus posibilidades como ingredientes alimentarios.

MATERIALES Y MÉTODOS

Los frutos secos del árbol de pixoy fueron donados por el Instituto Tecnológico de Conkal del estado de Yucatán, México, las vainas secas con semillas del árbol de *Leucaena*, la Facultad de Medicina Veterinaria y Zootecnia de la Universidad Autónoma de Yucatán, las vainas secas con semillas del árbol de flamboyán se recolectaron en diversos puntos de la ciudad de Mérida, Yucatán, México. Todas las semillas se extrajeron manualmente de los frutos o vainas.

Obtención de las gomas

La obtención de la goma de flamboyán (GF) del endospermo fue a través del método reportado por Corzo-Ríos, Solorza-Feria, Betancur-Ancona & Chel-Guerrero (2014). Para extraer el endospermo se hidrató la semilla con una relación de semilla:agua de 1:30 (*p/v*) durante 12 h a 70 °C en agitación constante. Posteriormente se separaron el germen, el pericarpio y el endospermo por la presión de un sistema de rodillos lisos. El endospermo se dispersó en agua destilada en una proporción de 1:4 *v/v* y se licuó durante 5 min, seguidamente se calentó a 50 °C por 30 min y se tamizó en una malla 50 (351 µm) y 100 (149 µm) para separar las partículas fibrosas de la GF. Finalmente, se le adicionó etanol (al 96%) en una proporción de 1:2 (*v/v*) con agitación constante para precipitar la goma que se secó por 12 h a 60 °C en una estufa de convección.

Para la extracción de la goma de la semilla de *Leucaena leucocephala* (GL), se preparó una suspensión con harina integral:agua destilada en una relación de 1:15 (*p/v*), el pH fijó en 10 con NaOH 1M y se agitó por 30 min, después se filtró secuencialmente a través de unas malla 80 (173 µm) y 100 (149 µm). El pH de la fracción líquida colectada se llevó a 4.5 con HCl 1M y se centrifugó 1,100 g por 15 min. La fracción sólida se volvió a suspender en agua a una relación de 1:15 (*p/v*), se fijó el pH a 7 y se agitó durante 30 min con calentamiento a 60 °C; transcurrido ese tiempo se filtró, el pH fue llevado a 4.5 y se centrifugó. El líquido sobrenadante obtenido al centrifugar se mezcló con el líquido de la anterior extracción y se calentó a

60 °C, después se agregó etanol (al 96%) en una relación de 1:1 (*v/v*) para precipitar la goma, que se recuperó por filtración a través de una malla 80 (173 µm) y se secó durante 12 h a 60 °C.

Para la goma de pixoy (GP) se suspendió la semilla en agua destilada a una relación de 1:15 (*p/v*) y se agitó por 30 min a una temperatura de 60 °C, posteriormente se filtró usando una tela de malla. El líquido se recolectó en un recipiente y la semilla se volvió a suspender en agua, esta vez en una relación de 1:5 y se agitó bajo las mismas condiciones. Se filtró de nuevo y el líquido sobrenadante obtenido en ambas extracciones se mezcló. Se adicionó etanol (al 96%) a una relación de 1:1 (*v/v*) para precipitar la goma. La goma se filtró a través de las mallas 100 y 200 (149 y 74 µm, respectivamente) y se sometió a un proceso de secado durante 12 h a 60 °C. Finalmente, todas las gomas secas se molieron en un molino Willey modelo 4 (Thomas Scientific) hasta obtener un tamaño de partícula que atravesó una malla 80 (173 µm).

Análisis químico proximal

La caracterización químico proximal se realizó a las gomas de *Delonix regia*, *Leucaena leucocephala* y *Guazuma ulmifolia*, según los métodos de la Association of Official Analytical Chemists (AOAC, 1997). Se usó el método 925.09 de la AOAC para la determinación de la humedad por pérdida de peso después de secar las muestras a 105 °C por 4 h. La Grasa cruda (método 920.39), fue cuantificada por extracción de la muestra durante 1 h con n-hexano en un equipo Soxhtec^{MR}. La Proteína cruda (método 925.09) se determinó por el método de Kjeldahl, usando un factor de 6.25 para la conversión del nitrógeno a proteína. Por otro lado, la Fibra cruda (método 962.09), se calculó después de la digestión ácida y alcalina con un sistema Fibertec^{MR}. Finalmente, las cenizas (método 923.03), se obtuvieron como el peso remanente después de calcinar la muestra en una mufla a 550 °C por 4 h. Los carbohidratos totales referidos como un extracto libre de nitrógeno (ELN), se obtuvieron por una diferencia al 100% del resto de los constituyentes.

Evaluación de las propiedades de flujo de las dispersiones de las gomas

Se formaron dispersiones acuosas al 0.5, 1.0 y 1.5% con cada goma, a las que se les realizaron las curvas de flujo a 25 °C y un intervalo de velocidad de deformación entre 0.01 y 1000.00 s⁻¹, empleando un reómetro rotacional con control de esfuerzo AR-2000, en su modalidad de deformación, con una geometría cono-placa de 40 mm de diámetro y ángulo de 2° para la GF y la GL. En el caso de las dispersiones de GP se empleó una placa de 40 mm con una distancia de 1.5 mm. Los datos se ajustaron al modelo de la ley de la potencia (Ec. 1) y al modelo de Cross (Ec. 2) (Steffe, 1996), y se eligió el mejor modelo de acuerdo con el mayor coeficiente de correlación obtenido.

$$\tau = k \dot{\gamma}^n \quad \text{Ec. 1}$$

Donde

τ = Esfuerzo de cizalla

$\dot{\gamma}$ = velocidad de cizalla

K = índice de consistencia

n = índice de comportamiento del flujo

$$(\eta - \eta_{\infty}) / (h_0 - \eta_{\infty}) = 1 / [1 + (K \dot{\gamma}^m)] \quad \text{Ec. 2}$$

Donde

$\dot{\gamma}$ = velocidad de cizalla

K = índice de consistencia

m = índice de flujo

η = viscosidad

η_0 = viscosidad a velocidad cero

η_{∞} = viscosidad a velocidad infinita

Determinación de las propiedades viscoelásticas de los geles de las gomas

Se empleó el mismo equipo y geometrías que se utilizaron para las curvas de flujo y el análisis del comportamiento reológico se desarrolló en dos etapas: en la primera se realizó un barrido de deformación en el intervalo de 0.01% a 10.00% usando dos frecuencias (1.0 y 10.0 Hz), esto para encontrar la zona de comportamiento viscoelástico lineal. La segunda etapa consistió en un barrido de frecuencia entre 0.1 y 10.0 Hz (con una velocidad angular de 0.5 – 100.0 1/s) con una deformación constante de 1.0% a excepción de la GP con una concentración de 0.5%, que fue evaluada a una deformación de 0.2%.

De las gráficas se obtuvieron los valores de los módulos de G' (módulo de almacenamiento), G'' (módulo de pérdida) y $\tan \delta$ que proporcionan información del carácter viscoelástico de las dispersiones. Todas las pruebas se realizaron por triplicado como mínimo.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Del análisis químico proximal para la GF y la GP se observó un alto contenido de ELN (97.2% y 93.1%, respectivamente) lo que indica que la pureza del producto es aceptable, porque los valores están directamente relacionados con la cantidad de la goma presente. En el caso específico de la GF posiblemente se debió a la separación del endospermo de la semilla previamente a la extracción; en cuanto a la extracción de las otras dos gomas se realizó a partir de la semilla integral. El contenido de proteína presente en estas gomas fue de 1.1 a 2.3% para la GF y la GP respectivamente, lo que resulta similar a lo reportado para otras gomas como la de acacia Senegal (2.3-2.4%), goma arábica (1.5-2.6%) y goma guar (2.5-4.5%) (Mirhosseini, Amid & Cheong, 2013)

En lo que respecta a la GL presentó una mayor concentración de proteína (14.0%) en comparación con las otras, lo que dio una menor pureza de la goma representada por el ELN (82.9%), estos valores son similares a lo descrito para otras gomas de leguminosas; Ibañez & Ferrero (2003) mencionan para la de *Prosopis flexuosa*, concentraciones de proteína de 10.9 a 19.1% con diferentes técnicas de extracción.

La GP presentó un mayor porcentaje de fibra (1.6%) respecto a las demás (0.7% para GF y 0.5% para GL), lo que refleja que esta semilla puede contener una mayor composición de celulosa, lignina u otros elementos de la pared vegetal, atrapados en la goma durante la solubilización y la precipitación.

Comportamiento del flujo en las dispersiones de las gomas

En las Figuras 1, 2 y 3 se muestran las curvas de viscosidad que resultaron de las dispersiones de las gomas de GF, GP y GL, en ellas se observa un comportamiento reofluidizante en las tres concentraciones estudiadas, debido a que, al aumentar la velocidad de deformación, la viscosidad disminuyó. Por otra parte, la viscosidad se incrementó, como era de esperarse, con respecto a la concentración de las gomas, porque a una mayor cantidad de macromoléculas en el mismo volumen, las colisiones entre ellas se acrecientan lo que se manifiesta como un aumento en la viscosidad (Torres, Hallmark & Wilson, 2014).

Al comparar las viscosidades obtenidas en las tres gomas, las dispersiones viscosas de la GP presentan los valores más altos, alcanzando a una baja velocidad de cizalla, de hasta 1,000 Pasⁿ. En las dispersiones de la GP al 1.0% y 1.5% se observan tres zonas definidas, de ahí que el ajuste de los datos en las tres concentraciones no fue totalmente conforme al modelo de la ley de la potencia. Respecto a los datos de las otras gomas se adecuaron mejor al modelo de la ley de la potencia para los valores de 0.5 y 1.0% y para el de 1.5% todas las dispersiones mostraron una mejor adaptación al modelo de Cross al presentar errores estándar cercanos a un 20.0%, los cuales fueron menores comparados con los valores cercanos a la ley de la potencia (TA Instrument, 2004).

En las dispersiones de 1.5% (p/v) de las tres gomas estudiadas, y que fueron ajustadas al modelo de Cross, se observa que los intervalos de velocidad de deformación, donde existe una tendencia hacia η_0 , es diferente. Para las GL el intervalo es más amplio abarcando entre 0.01 a 0.50 s⁻¹ (Figura 3), en las GP es menor (0.01 a 0.05 s⁻¹) (Figura 2) y en las GF no lo presentó en ninguna concentración en el intervalo estudiado. El cambio en los intervalos en que se puede observar el *plateau* de velocidad de cizalla (relacionado con η_0) y que está en función de la concentración lo reportan de manera similar Torres *et al.* (2014) para las dispersiones de goma guar, con un incremento de la velocidad de cizalla en donde se presenta este *plateau* de 1.0 s⁻¹ a 100.0 s⁻¹ al incrementarse la concentración de 1.0 a 20.0 g/L.

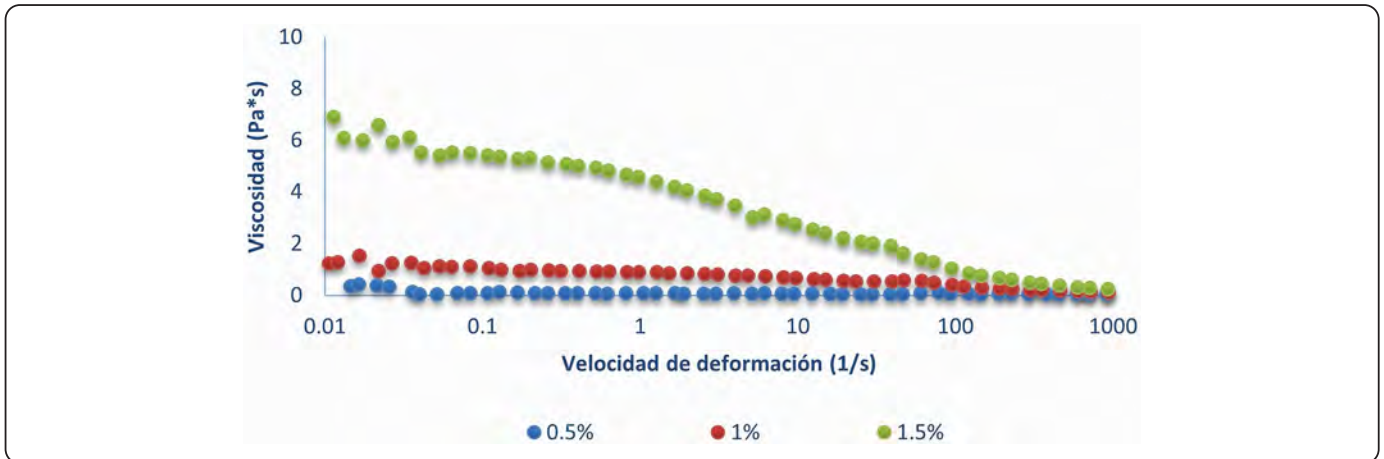


Figura 1. Curva de viscosidad de las dispersiones de goma de flamboyán (*Delonix regia*) en 3 concentraciones del estudio 0.5, 1.0 y 1.5 % (p/v).

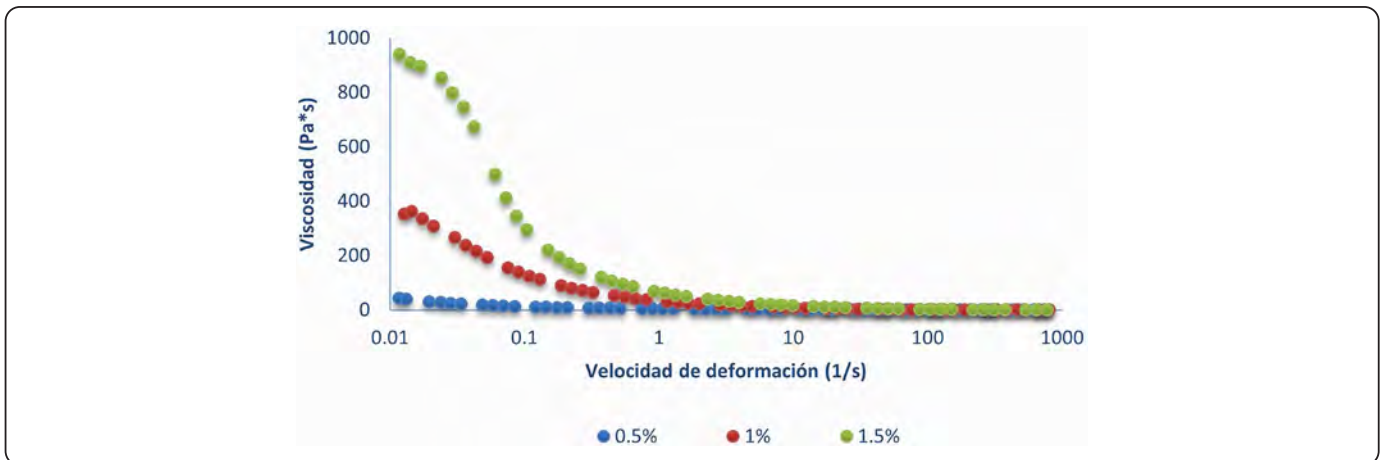


Figura 2. Curva de viscosidad de las dispersiones de la goma de pixoy (*Guazuma ulmifolia*) en 3 concentraciones del estudio 0.5, 1.0 y 1.5 % (p/v).

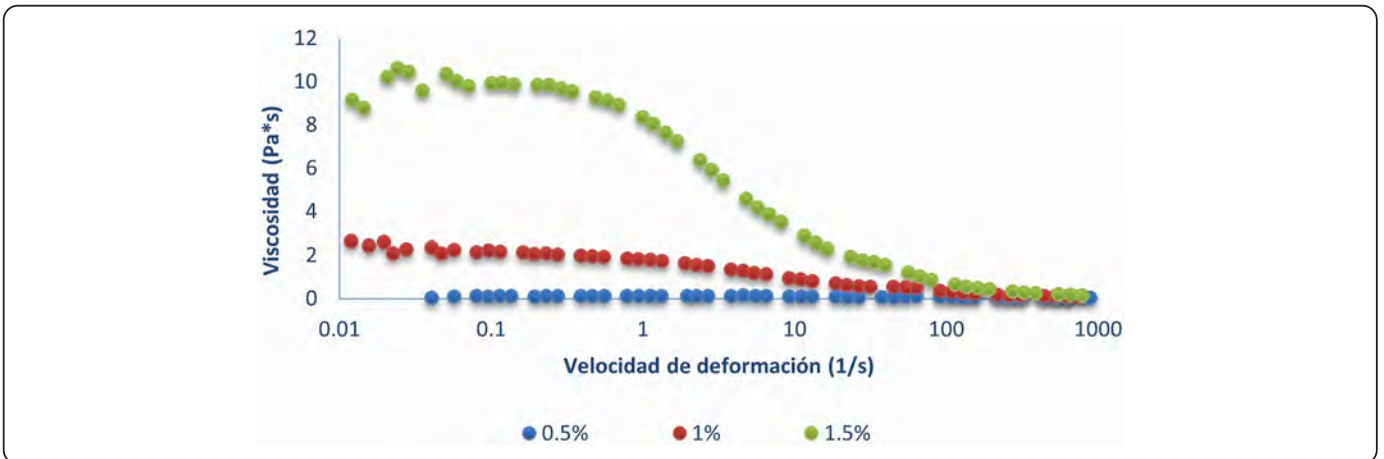


Figura 3. Curva de viscosidad de las dispersiones de la goma de leucaena (*Leucaena leucocephala*) en 3 concentraciones del estudio 0.5, 1.0 y 1.5 % (p/v).

Posterior a la región con tendencia a η_0 se observa una segunda zona con un comportamiento reofluidizante; en la que, la dispersión de la GF la presenta desde el inicio y la GP con una pendiente más pronunciada, probablemente a la rápida ruptura de la estructura del tipo gel débil.

En la Tabla I se observa que en la medida que se eleva la consistencia de las dispersiones, el ajuste al modelo de la ley de la potencia es menor, por consiguiente, el que mejor describe el comportamiento reológico es el modelo de Cross. Sin embargo, debido a que los parámetros no son comparables de manera directa entre ambos modelos, los datos de velocidad y esfuerzo de cizalla se ajustaron al modelo de la ley de la potencia, ya que el valor de correlación fue suficiente ($r^2 > 0.95$) y con ellos es que se realizó la comparación de los valores. También en la (Tabla I), de manera general, los valores de n (índice de comportamiento al flujo) son menores de 1, lo que refuerza su adelgazamiento frente a la velocidad de cizalla, y por consiguiente para todas las gomas el valor de este parámetro disminuye al incrementarse la concentración.

En cuanto al valor de K (índice de consistencia) el comportamiento para la GF y la GP es que hay una tendencia a incrementar este valor cuando aumenta la cantidad de goma presente en la dispersión, el incremento de K se puede explicar desde un mayor grado de enredo de las cadenas del biopolímero cuando la concentración aumenta. Esto indica un correspondiente incremento en el tiempo necesario para relajar la tensión impuesta a los sistemas por la fuerza aplicada (Nwokocha & Williams, 2014), lo que no sucede con la GL, por un alto contenido de proteína (14.0%) presente en el material de este trabajo. Youssef, Wang, Cui & Barbut (2009) encontraron que la viscosidad de la goma de Fenogreco (*Trigonella foenum graecum*) aumentó con el incremento de la concentración de goma o con la reducción de la proteína residual adjunta.

El peso molecular de la goma de fenogreco se acrecentó con la eliminación de las proteínas unidas. Esta goma tiene características similares a la GL por ser extraída del endospermo de una semilla de leguminosa y estar compuesta principalmente de manosa y galactosa (1:1) (Youssef *et al.*, 2009).

Por consiguiente, en los fluidos que se ajustan mejor al modelo de Cross, se observó el mismo comportamiento fluidificante, todos los valores de n son menores a 1. Los valores de índice de consistencia reflejan igual que con el modelo de la potencia que la GP tiene la mayor consistencia y los valores de GF y de la GL son similares entre sí, pero menores a los presentados por la GP. La ventaja al aplicar este modelo es que se encuentra una diferencia entre ellas, respecto de los valores de η_0 y η_∞ , ya que la GL tienen el valor más alto de η_∞ y el más pequeño de η_0 . Esto indica que un incremento de η_0 con la concentración del biopolímero significa el establecimiento de un mayor número de interacciones entre las moléculas del biopolímero y la dependencia de la masa molar, además de las interacciones entre las cadenas que se amplifican (Bourbon *et al.*, 2010) por el alto contenido de la proteína residual. Un valor mayor de K también se atribuye a una mayor densidad de los entrecruzamientos entre las moléculas según Torres *et al.* (2014) en su investigación con goma guar. Asimismo, postulan que la libertad de movimiento de las cadenas individuales se restringe progresivamente y en consecuencia se acrecienta el tiempo necesario para formar nuevos entrecruzamientos para reemplazar a los destruidos por la deformación externa. Por lo tanto, los valores de las velocidades de cizallamiento a la que el comportamiento se vuelve adelgazante disminuyen al aumentar la concentración (Torres *et al.*, 2014).

En todas las condiciones de estudio la GP fue la que alcanzó un mayor valor de viscosidad y la de menores valores fue la GL, esto es, como se ha señalado, porque la goma presentó

Tabla I. Parámetros de los modelos de la ley de la potencia y Cross para las curvas de flujo de las dispersiones con goma de flamboyán (*Delonix regia*), pixoy (*Guazuma ulmifolia*) y leucaena (*Lecucaena leucocephala*), a las concentraciones del estudio.

Goma	Conc. (%) (p/v)	Modelo de mejor ajuste	Parámetros de la ley de la potencia		Parámetros de Modelo de Cross			
			n	K	M	η_0	K	η_∞
Flamboyán	0.5	Potencia	0.94±0.04	0.14±0.02	NA	NA	NA	NA
	1.0	Potencia	0.85±0.04	0.15±0.02	NA	NA	NA	NA
	1.5	Cross	0.75±0.02	0.50±0.04	0.64±0.02	61.78±4.89	0.15±0.06	7.44 x 10 ⁻⁸ ±0.00
Pixoy	0.5	Potencia	0.51±0.02	0.71±0.03	NA	NA	NA	NA
	1.0	Cross	0.40±0.01	1.43±0.08	0.69±0.02	638.20±10.01	79.15±5.19	0.01±0.00
	1.5	Cross	0.38±0.02	1.79±0.06	0.71±0.02	1603±40.29	72.57±6.34	3.44 x 10 ⁻⁵ ±0.00
Leucaena	0.5	Potencia	0.96±0.03	0.10±0.06	NA	NA	NA	NA
	1.0	Potencia	0.74±0.03	0.61±0.04	NA	NA	NA	NA
	1.5	Cross	0.67±0.02	0.53±0.03	0.84±0.08	10.10±0.10	0.24±0.03	0.04±0.01

un alto contenido de proteína en su composición (14.0%); Ghorbani Gorji, Amin Mohammadifar & Zargaraan (2014) y Corzo-Ríos *et al.* (2014) indican que la interacción polisacárido-proteína puede influir en las propiedades reológicas del sistema; Valenga *et al.* (2012) encontraron que la interacción entre la concanavalina y los galactomananos modifica la superficie de la GP y esto explicaría la disminución de la viscosidad de este biopolímero, además al tener una mayor cantidad de proteína, la GL tiene una menor concentración del galactomanano comparada con las otras gomas.

Comportamiento de las gomas en pruebas dinámicas

En las Figuras 4, 5 y 6 se muestran los espectros mecánicos de las dispersiones de la GF, la GP y la GL que se estudiaron en

sus tres concentraciones, y se vio que los espectros mecánicos de la GF son muy parecidos a los de la GL, en los valores de los módulos y en su dependencia con la frecuencia.

La caracterización dinámica de las dispersiones muestra comportamientos diferentes, en la GP es una clara separación entre los valores de G' y G'' a lo largo del intervalo de frecuencia estudiado y los valores de estos módulos van aumentando a medida que lo hace la concentración de la goma en la dispersión, además con poca dependencia a la frecuencia, por lo que puede decirse que muestran un comportamiento reológico de gel (Farahnaky *et al.*, 2010). En el espectro mecánico predomina G' durante todo el intervalo de frecuencias (Figura 5). Esto quiere decir que hay una estructura lo suficientemente fuerte

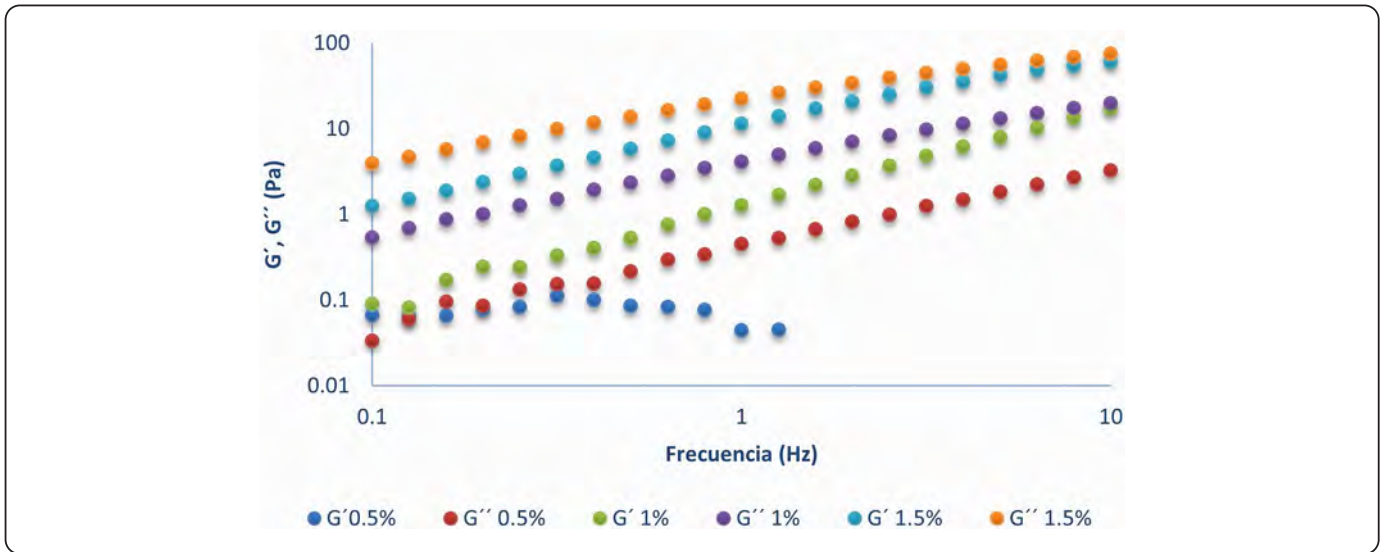


Figura 4. Espectros mecánicos de la goma de flamboyán (*Delonix regia*) en 3 concentraciones del estudio 0.5, 1.0 y 1.5 % (p/v).

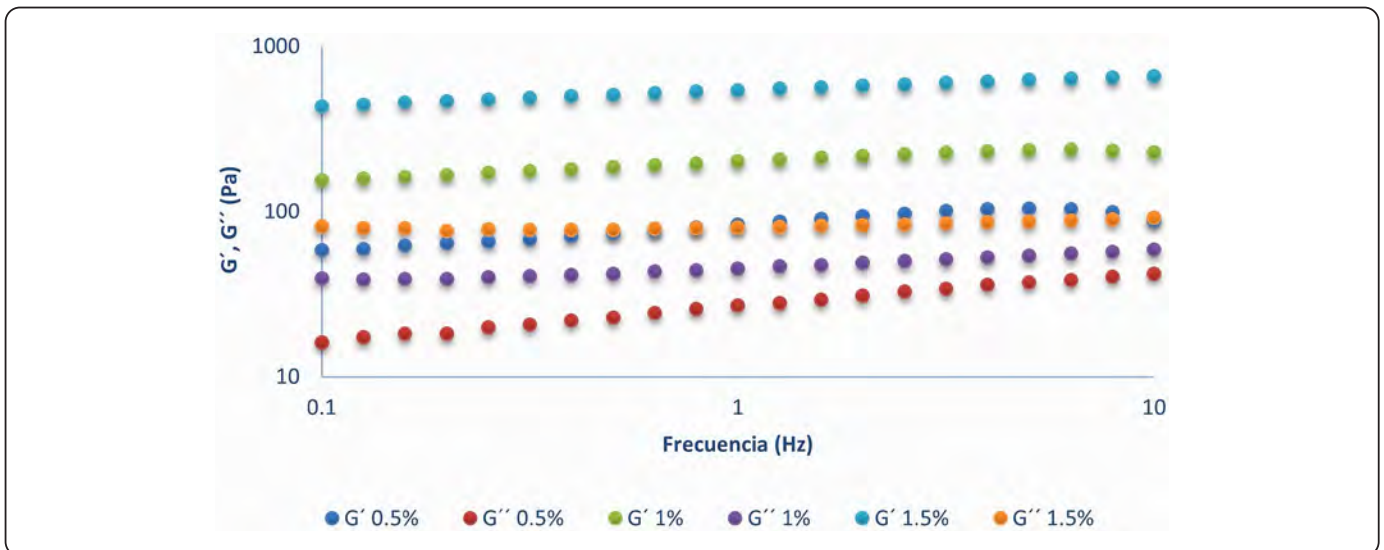


Figura 5. Espectros mecánicos de la goma de pixoy (*Guazuma ulmifolia*) en 3 concentraciones del estudio 0.5, 1.0 y 1.5 % (p/v).

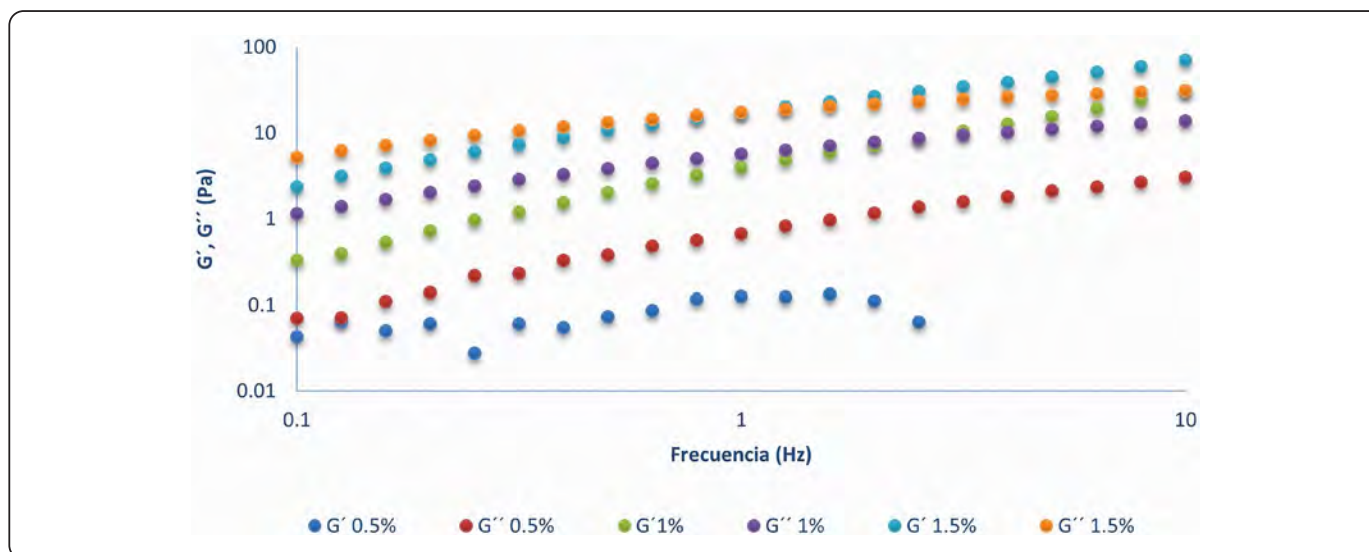


Figura 6. Espectros mecánicos de la goma de leucaena (*Leucaena leucocephala*) en 3 concentraciones estudiadas 0.5, 1.0 y 1.5 % (p/v).

para mantenerse a lo largo de todas las frecuencias. Esta relación del valor de los módulos con la concentración se repite en todas las gomas, sin embargo, las GL y GF sí muestran dependencia con la frecuencia.

Como sucedió en las pruebas de flujo, las dispersiones de la GP son las que tienen valores mayores en ambos módulos, por su parte, los valores de los módulos elástico y viscoso son similares en el espectro mecánico de la GL y de la GF. Sin embargo, la GL mostró un claro comportamiento de solución macromolecular de acuerdo con lo citado por Richardson, Morris, Ross-Murphy, Taylor & Dea (1989) por el entrecruzamiento de los módulos en el intervalo estudiado. Por otra parte, en la GF se observó que el entrecruzamiento se da en un intervalo de frecuencia un poco más amplio. El entrecruzamiento observado en el caso de la GL está relacionado con la presencia de impurezas (proteínas) que en el caso de esta goma es alto y la interacción goma-proteína permite el desarrollo de una red tridimensional por una asociación débil de tipo no covalente con la cadena del polímero (Richardson *et al.*, 1989) que se rompe al incrementarse la frecuencia aplicada, como lo evidencian otras mezclas goma-proteína (Corzo-Ríos *et al.*, 2014).

Para analizar con mayor profundidad los espectros mecánicos se utilizaron las ecuaciones 3 y 4 como lo sugiere Rao (1999) y en la Tabla II se presentan los resultados. Se puede ver que el aumento de la concentración disminuye n' y n'' en todas las gomas y para todos los casos su valor es menor a la unidad, lo que indica un decrecimiento de los enlaces entre moléculas a medida que se intensifica la frecuencia, esto podría explicarse porque las cadenas de los biopolímeros en la fase continua incrementan su movilidad y estiramiento (Estrada-

Girón *et al.*, 2014). Los valores de ambos parámetros (n' y n'') disminuyen a medida que se incrementa la concentración de la goma, lo que puede explicarse a las variaciones en algunos puntos de la parte inicial de la curva, fenómeno que es más evidente a menores concentraciones de las gomas, sugiriendo que la geometría a emplearse para la evaluación de estas condiciones necesita ser más grande para tener un mejor control de la muestra.

$$G' = K' \omega^{n'} \tag{Ec. 3}$$

$$G'' = K'' \omega^{n''} \tag{Ec. 4}$$

También se observa que el valor de K' aumenta con el incremento de la concentración de la goma en las dispersiones de la GP, sin embargo, para la GF y la GL esto no es así, por las mismas circunstancias señaladas para el caso anterior con leucaena.

La $\tan \delta$ es un parámetro que indica la magnitud relativa entre la presencia de las propiedades viscosas y elásticas ($\tan \delta = G''/G'$) del material (Shoemaker, Nantz, Bonnana & Noble, 1992). Valores menores a uno en este parámetro indican un comportamiento predominantemente elástico (Steffe, 1996). En el caso de las dispersiones de estudio los valores de la GP (Datos no mostrados) fueron los más bajos (alrededor de 0.1) y constantes en todo el intervalo de la frecuencia, siendo esto congruente con lo observado en las pruebas anteriores con un comportamiento tipo gel. Las gomas de flamboyán y leucaena presentaron valores mayores a la unidad y a frecuencias altas se acercan a la unidad, lo que es típico del comportamiento de las soluciones macromoleculares, igualmente se observa que el comportamiento es similar a las concentraciones de

Tabla II. Parámetros de la ecuación de la potencia para los espectros mecánicos de las dispersiones con gomas de flamboyán (*Delonix regia*), de pixoy (*Guazuma ulmifolia*) y de leucaena (*Lecucaena leucocephala*), en las concentraciones del estudio.

Goma	Conc. (%) (p/v)	n'	K' (Pa)	n''	K'' (Pa)
Pixoy	0.5	0.23±0.03	1.64±0.02	0.20±0.05	1.25±0.05
	1.0	0.11±0.02	2.47±0.02	0.09±0.02	1.55±0.05
	1.5	0.09±0.01	2.66±0.02	0.03±0.00	1.93±0.07
Flamboyán	0.5	1.72±0.10	1.45±0.02	0.90±0.04	-1.03±0.03
	1.0	1.24±0.09	-0.79±0.02	0.78±0.03	-0.04±0.02
	1.5	0.90±0.05	0.27±0.02	0.65±0.03	0.79±0.01
Leucaena	0.5	-1.41±0.03	-1.41±0.02	0.82±0.03	-0.93±0.04
	1.0	0.97±0.04	-0.97±0.02	0.53±0.02	0.28±0.04
	1.5	0.39±0.02	0.90±0.02	0.39±0.02	0.90±0.04

1.0 y 1.5% para estas dos gomas, mientras que la de 0.5% tiene un comportamiento diferente, esto debido a que a la concentración de 0.5% es un fluido prácticamente viscoso por lo que el reómetro da lecturas erróneas del módulo elástico. Por otro lado, en la GP desde la concentración del 0.5% se observa un comportamiento de tipo gel. Para el caso de la GL y la GF hay una dependencia a la frecuencia empleada, esto sucede cuando un material se somete a una deformación de baja frecuencia en la región lineal, la disminución de la consistencia se explica en función de la interacción molécula-molécula; Estrada-Girón *et al.* (2014) argumentan que cuando la frecuencia se incrementa, las moléculas tienen menos tiempo para el reacomodo; por ello la resistencia disminuye, pero el comportamiento elástico aumenta.

CONCLUSIONES

Las dispersiones de las gomas de flamboyán, leucaena y pixoy presentaron un comportamiento del tipo reofluidizante, la de pixoy con viscosidades relativamente más altas comparadas con las otras dos. A la concentración de 1.5% las tres gomas se ajustaron al modelo de Cross, mientras que a menores concentraciones las dispersiones de la goma de flamboyán y la de leucaena se adecuaron al modelo de la ley de la potencia.

Las dispersiones de la goma de pixoy tuvieron un comportamiento tipo gel en todas las concentraciones del estudio, por lo contrario, las de flamboyán y leucaena tienen un comportamiento del tipo polimérico, ya que existe un entrecruzamiento entre los valores de G' y G'', en el intervalo de la frecuencia.

Por las características reológicas de estas gomas, se considera como posible su incorporación en las bebidas que presentan problemas de estabilidad, y la goma de pixoy por su comportamiento tipo gel podría usarse en una parcial sustitución del azúcar en las mermeladas y por su textura en pudines entre otras aplicaciones.

REFERENCIAS

AOAC. (1997). *Methods of Analysis of Association of Official Analytical Chemists*. 16th edn. Washington D.C. Association of Official Analytical Chemists.

Azero, E. G. & Andrade, C. T. (2006). Characterization of *Prosopis juliflora* seed gum and the effect of its addition to κ-carrageenan systems. *Journal Brazilian Chemistry Society*, **17**, 844-850.

Bourbon, A. I., Pinheiro, A. C., Ribeiro, C., Miranda, C., Maia, J. M., Teixeira, J. A. & Vicente, A. A. (2010). Characterization of galactomannans extracted from seeds of *Gleditsia triacanthos* and *Sophora japonica* through shear and extensional rheology: Comparison with guar gum and locust bean gum. *Food Hydrocolloids* **24(2-3)**, 184-192. <http://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2009.09.004>

Cerqueira, M. A., Pinheiro, M. C., Souza, B.W. S., Lima, A. M. P., Ribeiro, C., Miranda, C., Teixeira, J. A., Moreira, R. A., Coimbra, M. A., Gonçalves, M. P. & Vicente, A. A. (2009). Extraction, purification and characterization of galactomannans from non-traditional sources. *Carbohydrate Polymers*, **75(3)**, 408-414. <http://doi.org/10.1016/j.carbpol.2008.07.036>

Chamorro, V. D., Parra, M. H., Pérez, N. & Rey, A. M. (2006). *Establecimiento de Sistemas Silvopastoriles como alternativa de producción ganadera sostenible en el Valle cálido del Bajo Magdalena*; CORPOICA-COLCIENCIAS- SENA: Colombia.

Corzo-Rios, L. J., Solorza-Feria, J., Betancur-Ancona, D. A. & Chel-Guerrero, L.A. (2014). Rheological properties and gel strength of *Phaseolus lunatus* protein/carboxymethylated flamboyant gum systems. *International Journal of Food Science & Technology*, **49(6)**, 1513-1521. <http://doi.org/10.1111/ijfs.12448>

Estrada Álvarez, J. (2002). *Pastos y forrajes para el Trópico Colombiano*; Universidad de Caldas, Centro; Caldas, Colombia.

Estrada-Girón, Y., Aguilar, J., Morales-del Rio, A., Valencia-

- Botin, A. J., Guerrero-Beltrán, J. A., Martínez-Preciado, A. H., Macías, E. R., Soltero, J. F. A., Solorza-Feria, J. & Fernández V. V. A. (2014) Effect of moisture content and temperature, on the rheological, microstructural and thermal properties of masa (dough) from a hybrid corn (*Zea mays* sp.) Variety. *Revista Mexicana de Ingeniería Química*, **13**(2), 429-446.
- Farahnaky, A., Askari, H., Majzooobi, M. & Mesbahi, G. (2010). The impact of concentration, temperature and pH on dynamic rheology of psyllium gels. *Journal of Food Engineering*, **100**, 294–301. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2010.04.012>
- Ghodke, S. K. & Laxmi, A. (2007). Influence of additives on rheological characteristics of whole-wheat dough and quality of Chapatti (Indian unleavened Flat bread) Part I—hydrocolloids. *Food Hydrocolloids*, **21**, 110-117.
- Ghorbani Gorji, S., Ghorbani Gorji, E., Amin Mohammadifar, M. & Zargaraan, A. (2014) Complexation of sodium caseinate with gum tragacanth: Effect of various species and rheology of coacervates, *International Journal of Biological Macromolecules*, **67**, 503–511. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2014.02.037>
- Ibañez, M. C. & Ferrero, C. (2003). Extraction and characterization of the hydrocolloid from *Prosopis flexuosa* DC seeds. *Food Research International*, **36**(5), 455–460. [http://doi.org/10.1016/S0963-9969\(02\)00192-8](http://doi.org/10.1016/S0963-9969(02)00192-8)
- Koocheki, A. & Razavi, S. M. A. (2009). Effect of concentration and temperature on flow Properties of *Alyssum homolocarpum* seed gum solutions Assessment of time dependency and thixotropy. *Food Biophysics*, **4**, 353–364. <https://doi.org/10.1007/s11483-009-9134-7>
- Little, E., Wadworth, F. & Marrero, J. (2001). Árboles comunes de Puerto Rico y las Islas Vírgenes, 2a. edición; Universidad de Puerto Rico: San Juan.
- Mirhosseini, H. & Amid, B. T. (2012). A review study on chemical composition and molecular structure of newly plant gum exudates and seed gums. *Food Research International*, **46**(1), 387–398. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2011.11.017>
- Mirhosseini, H., Amid, B. T. & Cheong, K.W. (2013). Effect of different drying methods on chemical and molecular structure of heteropolysaccharide-protein gum from durian seed. *Food Hydrocolloids*, **31**(2), 210–219. <http://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2012.11.005>
- Nwokocho, L. M. & Williams, P. A. (2014) Isolation and characterization of a novel polysaccharide from seeds of *Peltophorum pterocarpum*, *Food Hydrocolloids*, **41**, 319-324. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2014.04.016>
- Nwokocho, L. M. & Williams, P. A. (2012) Rheological characterization of the galactomannan from *Leucaena leucocephala* seed. *Carbohydrate Polymers*, **90**(2), 833-838. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2012.06.008>
- Pereira, G. A., Silva, E. K., Peixoto Araujo, N. M., Arruda, H. S., Meireles, M. A. A. & Pastore, G. M. (2019). Obtaining a novel mucilage from mutamba seeds exploring different high-intensity ultrasound process conditions. *Ultrasonics Sonochemistry*, **55**, 332–340. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2019.01.010>
- Ramos, A. M. & Ibarz, A. (2006). Comportamiento viscoelástico de pulpa de membrillo en función de la concentración de sólidos solubles. *Ciencia y Tecnología Alimentaria, Campinas*, **26**(1), 214–219. <https://doi.org/10.1590/S0101-20612006000100034>
- Rao, M. A. (1999). *Rheology of Fluid and Semisolid Foods Principles and Applications*. Aspen Publishers, Inc., USA.
- Richardson, R. K., Morris, E. R., Ross-Murphy, S. B., Taylor, L. J. & Dea, I. C. M. (1989). Characterization of the perceived texture of thickened systems by dynamic viscosity measurements. *Food Hydrocolloids*, **3**(3), 175–191. [http://doi.org/10.1016/S0268-005X\(89\)80002-5](http://doi.org/10.1016/S0268-005X(89)80002-5)
- Sánchez, Y. & Ramírez, M. (2006). Tratamientos pregerminativos en semillas de *Leucaena leucocephala* (Lam.) de Wit. y *Prosopis juliflora* (Sw.) D. C., *Rev. Fac. Agron.*, **23**, 257-272.
- Shoemaker, C. F., Nantz, J., Bonnana, S. & Noble, A. C. (1992). Rheological characterization of dairy products. *Food Technology* **46**, 98-104.
- Sikora, M., Badrie, N., Deisingh, A. K. & Kowalski, S. (2008). Sauces and Dressings: A Review of Properties and Applications. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, **48**(1), 50-77. <https://doi.org/10.1080/10408390601079934>
- Soleimanpour, M., Koocheki, A. & Kadkhodae, R. (2013). Effect of *Lepidium perfoliatum* seed gum addition on whey protein concentrate stabilized emulsions stored at cold and ambient temperature. *Food Hydrocolloids*, **30**(1), 292-301. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2012.06.004>
- Steffe, J. (1996). *Rheological methods in food process engineering*. East Lansing, USA: Freeman Press.
- TA instrument (2004). *Rheology advantage data analysis, Getting started guide*, TA instrument-Waters LLC, New Castle.
- Tamaki, Y., Tetura, T. & Tako, M. (2010). The chemical structure of galactomannan isolated from seeds of *Delonix regia*. *Bioscience, Biotechnology, and Biochemistry*, **74**(5), 1110–1112. <https://doi.org/10.1271/bbb.90935>
- Torres, M. D., Hallmark, D. B. & Wilson, I. (2014). Effect of concentration on shear and extensional rheology of guar gum solutions. *Food Hydrocolloids*, **40**, 85-95. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2014.02.011>
- Valenga, F., Petri, D. F. S., Lucyszyn, N., Jóc, T. A. & Sierakowski, M. R. (2012) Galactomannan thin films as supports for the immobilization of Concanavalin A and/or dengue viruses. *International Journal of Biological Macromolecules*, **50**(1), 88–94. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2011.10.005>
- Youssef, M. K., Wang, Q., Cui, S. W. & Barbut, S. (2009). Purification and partial physicochemical characteristics of protein free fenugreek gums. *Food Hydrocolloids*, **23**(8), 2049-2053. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2009.03.017>