

## ESTIMACIÓN MATEMÁTICA DE LA CONCENTRACIÓN DE POLISACÁRIDO DE MUCÍLAGO DE SEMILLA DE *Linum usitatissimum*<sup>a</sup>

### MATHEMATICAL ESTIMATION OF THE POLYSACCHARIDE CONCENTRATION IN THE MUCILAGE OF *Linum usitatissimum* SEEDS

Gutierrez-Duron, K.E.<sup>1</sup>; Villanueva-Carbajal, A<sup>2</sup>; Gómez-Espinosa, R.M.<sup>3</sup>; Arizmendi-Cotero, D.<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>Universidad Tecnológica del Valle de Toluca. Santa María Atarasquillo, Lerma de Villada, Mex, México. 52044

<sup>2</sup>Universidad Autónoma del Estado de México. El Cerrillo, Piedras Blancas Toluca, Mex, México. 50200

<sup>3</sup>Centro Conjunto de Investigación en Química Sustentable UAEM-UNAM. Toluca, Mex, México 50200

\* E-mail: [daniel.arizmendi@utvtol.edu.mx](mailto:daniel.arizmendi@utvtol.edu.mx)

Fecha de envío: 19, mayo, 2025

Fecha de publicación: 20, septiembre, 2025

#### Resumen:

Para separar a los polisacáridos de los mucílagos vegetales se requieren de una serie de pasos que involucran un consumo de energía y/o insumos. El objetivo de la presente investigación fue estimar un modelo matemático empírico para predecir la concentración del polisacárido de semilla de linaza, con base en el comportamiento reológico de su mucílago. El mucílago de linaza (MLIN) se separó de la semilla por el método de inmersión en agua y la masa de polisacáridos se obtuvo por liofilización, con rendimiento promedio de  $4.4 \pm 0.5\%$ . Modelos de Ostwald fueron calculados para soluciones de Alginato de sodio (ALG) y Carboximetilcelulosa (CMC) a diferentes concentraciones y temperatura ambiente. La CMC mostró el modelo logarítmico  $C = 0.598 \log(K) + 1.73 \log|n|$  con un ajuste  $R^2 = 0.998$  y la mejor capacidad para predecir la masa de polisacárido en el MLIN. La validación del modelo de predicción arrojó un error residual absoluto de 35% y una capacidad de predecir polisacáridos entre 0.07 y 0.28 g de acuerdo con los valores experimentales K y n del modelo de Ostwald del MLIN. Los resultados obtenidos sugieren que es posible estimar la concentración de polisacáridos en los mucílagos vegetales por medio de modelos empíricos. Sin embargo, es necesario incluir la temperatura de medición para mejorar el ajuste de los modelos. Por otro lado, la precisión del rango de velocidades del reómetro pudo ser determinante para un mejor ajuste.

**Palabras clave:** Polisacáridos vegetales, modelos de Ostwald, reología de mucílagos, fluido pseudoplástico.

<sup>a</sup> Proyecto de Estadía Profesional

## Abstract:

To separate polysaccharides from plant mucilages, a series of steps involving energy and/or input consumption is required. The objective of this research was to estimate an empirical mathematical model to predict the concentration of flaxseed polysaccharide based on the rheological behavior of its mucilage. Flaxseed mucilage (MLIN) was separated from the seed using the water immersion method, and the polysaccharide mass was obtained by lyophilization, with an average yield of  $4.4 \pm 0.5\%$ . Ostwald models were calculated for sodium alginate (ALG) and carboxymethylcellulose (CMC) solutions at different concentrations and room temperature. CMC showed the logarithmic model  $C = 0.598 \log(K) + 1.73 \log|n|$  with a fit of  $R^2 = 0.998$  and the best ability to predict the polysaccharide mass in MLIN. Validation of the prediction model yielded an absolute residual error of 35% and a capacity to predict polysaccharides between 0.07 and 0.28 g according to the experimental K and n values of the Ostwald model for MLIN. The results obtained suggest that it is possible to estimate the concentration of polysaccharides in plant mucilages through empirical models. However, it is necessary to include the measurement temperature to improve model fit. On the other hand, the precision of the rheometer's speed range may have been a determining factor for better adjustment.

**Keywords:** Plant polysaccharides, Ostwald models, mucilage rheology, pseudoplastic fluid.

## INTRODUCCIÓN

Diversos recursos naturales han sido empleados como una fuente importante para obtener polímeros naturales como los polisacáridos, lípidos y proteínas. Considerados materiales ideales en el desarrollo de biopelículas o coberturas comestibles de alimentos (Li, Duan, Yue, Alee, & Liu, 2024). Particularmente, los polisacáridos derivados de las semillas de plantas ofrecen una estructura funcional y de barrera semejante a los materiales convencionales derivados del petróleo (Urbizo-Reyes, San Martín-González, García-Bravo, & Liceaga, 2020). En este sentido, las semillas de chía (*Salvia hispánica*) y linaza (*Linum usitatissimum*) han sido ampliamente estudiadas como fuente de obtención de polisacáridos. En ambos casos, al sumergir las semillas en agua se libera un gel mucilaginoso transparente y de alta viscosidad denominado mucílago, que se ubica en las capas externas de la semilla (Li et al., 2024; Xu, Jiang, Li, Xia, & Xiang, 2025). La composición del mucílago en ambas especies es semejante. Un heteropolisacárido aniónico predominantemente compuesto de polímeros neutros y ácidos ricos en D-xilosa, L-arabinosa, L-galactosa, D-glucosa, ácido D-galacturónico y L-ramnosa (Qian, Cui, Nikiforuk, & Goff, 2012; Timilsena, Adhikari, Kasapis, & Adhikari, 2016).

Los procesos de extracción de los mucílagos se basan principalmente en la hidratación de la semilla con agitación continua, seguido de filtración, decantación o centrifugación para separar las semillas. La relación masa (g)/volumen de agua (ml), temperatura (°C) y el tiempo (horas) de extracción son variables que influyen en el rendimiento de extracción. Kumari et al. (2023) emplearon la relación 1:30, 60°C y 8 horas para extraer mucílago de linaza. Li et al. (2024), extrajeron mucílago de chía con una relación de 1:30 a 25°C por dos horas. Ziolkovska, (2012) empleó linaza entera, con temperatura de 80 °C, una relación de 1:25 y una duración de 30 min. Ding et al. (2014), para extracción de mucílago de linaza emplearon 70 °C con una relación de 1:20 y un tiempo de extracción de 4 horas. Posterior a la extracción del mucilago se requiere de un procedimiento de separación para obtener los polisacáridos secos. Usualmente, los mucílagos se someten a un proceso de evaporación parcial o total para eliminar agua, o bien los polisacáridos se precipitan con etanol. La liofilización es un método ampliamente utilizado en diversos estudios como último paso en la separación de los polisacáridos que componen al mucílago (Kaur, Kaur, & Punia, 2018; Kumari et al., 2023; Thanatcha & Pranee, 2011; Timilsena et al., 2016; Urbizo-Reyes et al., 2020; Urbizo-Reyes, San Martín-González, García-Bravo, López Malo Vigil, & Liceaga, 2019; Xu et al., 2025). En consecuencia, los pasos para separar los polisacáridos de la fase líquida (mucílago) requieren de un gasto de energía y/o insumos, lo que provoca un aumento considerable en el costo de elaboración de películas o coberturas a base de biopolímeros naturales. El objetivo de la presente investigación fue estimar un modelo matemático para predecir la concentración del polisacárido de semilla de linaza, con base en el comportamiento reológico del mucílago.

## **MATERIALES Y MÉTODOS**

Se emplearon Alginato de Sodio (ALG) y Carboximetilcelulosa (CMC) de grado alimenticio adquirido en Botica La Moderna, Toluca, México. Las semillas de linaza (*Linum usitatissimum*) se adquirieron en un mercado local.

### **Perfil Reológico de ALG y CMC**

Se prepararon disoluciones de ALG y CMC en concentraciones de 0.5, 0.8, 1.1; 1.4 y 1.7% en agua desionizada. Para cada solución el perfil viscoelástico se determinó

a través de un reómetro rotativo marca Brookfield modelo RVF equipado con las puntas RV-3 y RV-4 a velocidades de 2, 4, 10 y 20 rpm.

### **Extracción de mucílago y polisacáridos de Linaza**

Se pesaron 11 g de linaza y se hidrataron con 100 ml de agua destilada en una parrilla de calentamiento hasta alcanzar los 55 °C, las semillas se dejaron reposar durante 20 minutos con agitación constante. Posteriormente, se dejó enfriar la mezcla hasta 15 °C. Luego, se vertió la solución en un colador con malla y se filtró al vacío con ayuda de un matraz Erlenmeyer. Una vez obtenido el mucílago de linaza (MLIN) libre de semilla, se transfirió la solución a un vaso de precipitado de 100 ml para medir su viscosidad con un reómetro Brookfield, utilizando las puntas RV-3 y RV-4 a velocidades de 2, 4, 10 y 20 rpm.

Después de medir la viscosidad el MLIN se secó por sublimación mediante un equipo de liofilización marca Labconco, con un vacío de 0.005 mbar y temperatura de -50°C durante un tiempo aproximado de 60 horas para posteriormente pesar la masa de polisacáridos obtenida.

### **Perfil FTIR de polímeros**

Los grupos funcionales de ALG, CMC y polisacáridos de linaza se compararon mediante los espectros FTIR obtenidos mediante espectrofotometría infrarroja por transformada de Fourier a temperatura ambiente usando 64 escaneos, una ventana de 500–4000 cm<sup>-1</sup> y una resolución de 2 cm<sup>-1</sup>, utilizando un espectrofotómetro IR acoplado a ATR (Perkin-Elmer, Spectrum Two).

### **Modelos viscoelásticos**

De acuerdo con (Puente Córdova, Hernández Ramírez, Reyes Melo, Rentería Baltiérrez, & Miranda Valdez, 2022), la CMC sigue un comportamiento reológico de tipo potencial. Por lo que se propone que el modelo de Ostwal puede ser adecuado para establecer la relación entre el esfuerzo cortante y la magnitud de la fuerza de corte. Para todas las soluciones preparadas (ALG, CMC y MLIN) se estimaron los parámetros de la ecuación de Ostwal:

$$\tau = K\dot{\gamma}^n$$

Donde:

$\tau$ : corresponde al esfuerzo cortante en mPa•s

$\gamma$ : es la tasa de corte de velocidad perpendicular al plano en  $s^{-1}$

K: representa la viscosidad aparente del fluido en  $Pa \cdot sn$

N: Índice de comportamiento de flujo (n): Es un valor adimensional que describe cómo la viscosidad del fluido cambia con la velocidad de corte.

- Si  $n < 1$ , el fluido es pseudoplástico.
- Si  $n = 1$ , el fluido es newtoniano.
- Si  $n > 1$ , el fluido es dilatante.

### **Modelo empírico para estimar la concentración de polisacárido de linaza**

Para relacionar la concentración de polisacáridos y los parámetros viscoelásticos del modelo reológico (K y n) se determinó el siguiente modelo empírico:

$$C = \beta_0 + \beta_1 \log(K) + \beta_2 \log|n| \pm e_i$$

Donde:

C es la concentración en g/ml de los polisacáridos

$\beta_0$ ,  $\beta_1$  y  $\beta_2$  son los coeficientes de los términos del modelo empírico.

Los modelos empíricos fueron estimados tanto para ALG y CMC con las puntas RV3 y RV4. Los coeficientes se determinaron mediante un análisis de regresión múltiple usando la herramienta de análisis de datos de Microsoft Excel de Office 365.

## **RESULTADOS Y DISCUSIÓN**

### **Perfil reológico de los polisacáridos**

En la Figura 1 se presentan algunos de los perfiles reológicos obtenidos a temperatura constante ( $25^\circ C$ ) para las soluciones poliméricas (ALG y CMC). Sin considerar la concentración de ambos biopolímeros se presenta un comportamiento similar en ambos casos que corresponden a la curva típica de un fluido pseudoplástico, este comportamiento se debe al efecto de la fuerza en el desdoblamiento de los ovillos de las cadenas poliméricas de ambos polisacáridos (Puente Córdova et al., 2022) que a su vez está influenciada por la concentración del biopolímero al aumentar el número de entrecruzamientos. Este comportamiento es similar en todas las concentraciones de ALG y CMC. Para cada una de las concentraciones, se determinaron los parámetros K y n de la Ley de Ostwald. Los resultados se resumen en la Cuadro 1.

**Cuadro 1.** Coeficientes del modelo de Ostwald por concentración de biopolímero**Table 1.** Ostwald model coefficients according to biopolymer concentration

Concentración (%)	ALG punta RV3				ALG punta RV4			
	K		n		K		n	
0.5	44.85	± 1.43	-0.48	± 0.01	37.42	± 2.49	-0.73	± 0.02
0.8	140.33	± 9.88	-0.22	± 0.02	92.89	± 15.69	-0.48	± 0.03
1.1	362.66	± 73.91	-0.11	± 0.10	269.01	± 17.81	-0.28	± 0.04
1.4	662.04	± 42.83	-0.11	± 0.02	925.48	± 683.49	-0.10	± 0.13
1.7	1222.46	± 351.76	-0.14	± 0.09	953.94	± 250.97	-0.15	± 0.02

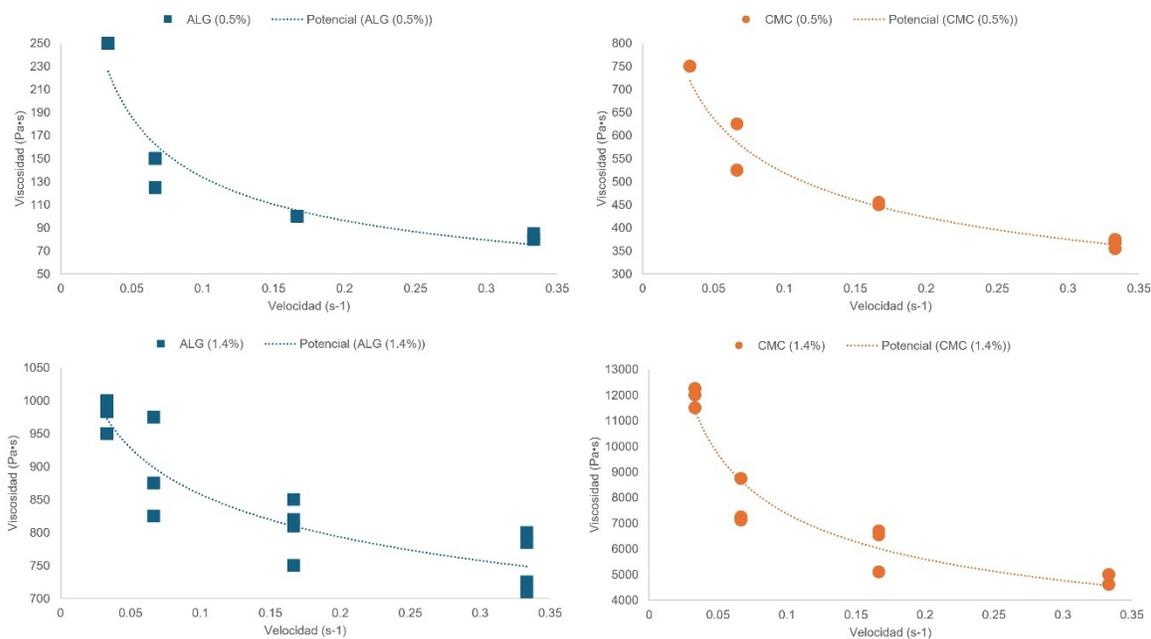
  

Concentración (%)	CMC punta RV3				CMC punta RV4			
	K		n		K		n	
0.5	262.83	± 7.47	-0.30	± 0.02	380.57	± 201.65	-0.28	± 0.16
0.8	912.43	± 91.57	-0.27	± 0.03	822.94	± 299.52	-0.29	± 0.12
1.1	1601.62	± 332.92	-0.35	± 0.01	2043.56	± 389.60	-0.28	± 0.08
1.4	2998.83	± 511.01	-0.40	± 0.04	3606.95	± 371.09	-0.36	± 0.03
1.7*								

\* valor no estimado por los límites de medición del reómetro.

El número de aguja usada en el reómetro no mostró una diferencia significativa en las mediciones de los parámetros viscoelásticos en ambos biopolímeros. La viscosidad en las soluciones de CMC es mayor a la mostrada por las soluciones de ALG. Además, en ambos biopolímeros la concentración aumenta los parámetros reológicos del modelo de Ostwald. El aumento de la viscosidad aparente (K) en función de la concentración de biopolímero ha sido reportado por (Puente Córdova et al., 2022). Sin embargo, la relación del coeficiente de flujo (n) en función de la concentración es contradictorio entre nuestros resultados y los reportados por Puente-Córdova (2022).

En el caso de las soluciones de linaza, el mucílago extraído mostró un comportamiento reológico similar a los biopolímeros ALG y CMC. El Cuadro 2, muestra los resultados de los parámetros de Ostwald para mucílago de linaza. Posterior a las mediciones de viscosidad del mucílago las muestras se liofilizaron para obtener los polisacáridos y determinar el peso real de la extracción.



**Figura 1.** Perfil reológico de las soluciones de ALG y CMC

**Figure 1.** Rheological profile of ALG and CMC solutions

**Cuadro 2.** Parámetros reológicos del mucilago de linaza

**Table 2.** Rheological parameters of linseed mucilage

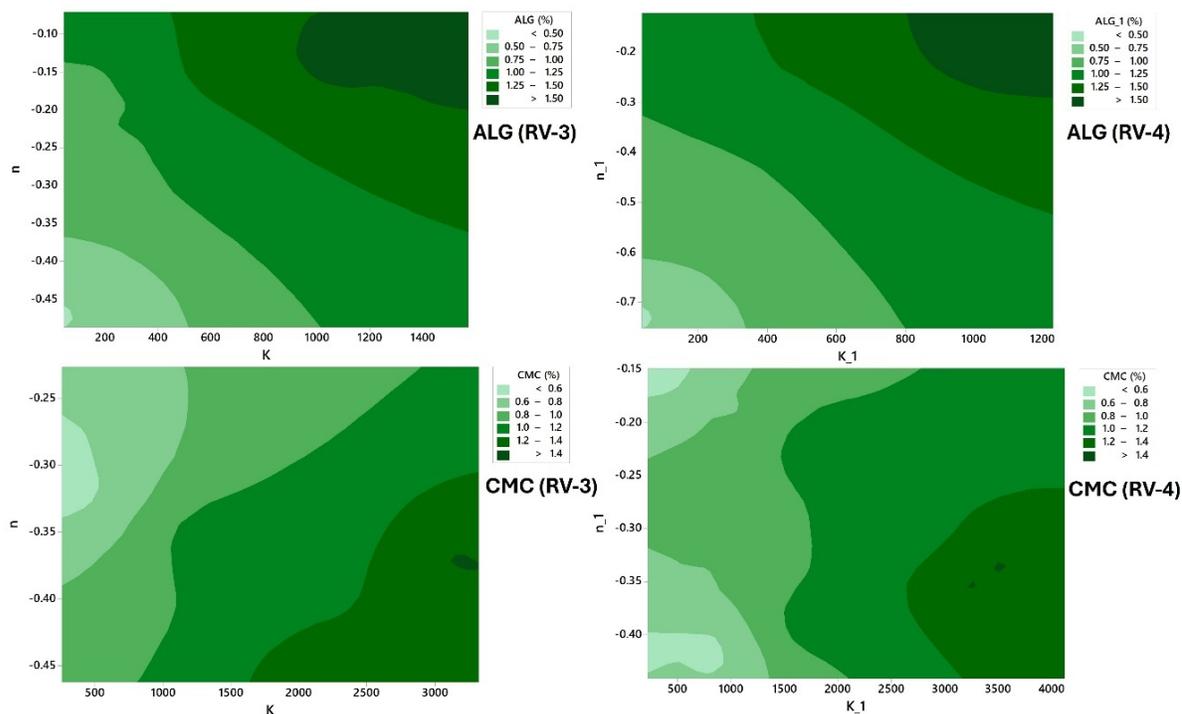
Muestra	Semilla* (g)	K RV-3	n RV-3	K RV-4	n RV-4	Polisacáridos (g)	Rendimiento
1	10	58.28	-0.45	49.28	-0.67	0.33	3.3%
2	10	55.85	-0.44	47.33	-0.68	0.42	4.2%
3	11	84.90	-0.46	35.25	-0.32	0.45	4.5%
4	12	43.93	-0.49	35.27	-0.75	0.51	5.1%
5	10	103.35	-0.30	81.87	-0.51	0.45	4.5%
6	10	246.45	-0.26	78.08	-0.44	0.46	4.6%
7	11	61.81	-0.52	56.77	-0.41	0.48	4.8%
8	11	307.85	-0.47	50.12	-0.52	0.40	4.0%

\* Relación masa agua (1:20)

### Modelos empíricos de predicción

Los valores experimentales se relacionaron mediante gráficos de contornos con la finalidad de observar una relación entre la concentración de los biopolímeros (ALG y CMC) y el valor de los parámetros reológicos (Figura 2). El ALG presenta una relación positiva en función a los valores del índice de comportamiento del

flujo ( $n$ ) y los valores de viscosidad aparente ( $K$ ). Una mayor concentración de alginato reflejó un aumento de ambos parámetros. Por el contrario, una mayor concentración de CMC resultó en valores más altos del índice de flujo y mayores valores de su viscosidad aparente.



**Figura 2.** Relación entre parámetros reológicos de concentración de biopolímero  
**Figure 2.** Relationship between rheological parameters and biopolymer concentration

El Cuadro 3, muestra los valores de los coeficientes del modelo empírico, según el biopolímero empleado y la punta utilizada en la medición. Para todos los modelos estimados se indicó una constante igual a cero, con la finalidad de ajustar el modelo desde la ausencia de polisacáridos. Todos los modelos estimados mostraron un ajuste adecuado con valores de coeficiente de determinación ( $R^2$ ) superiores a 97%. Los modelos estimados con ALG punta RV4 y con CMC punta RV-3 muestran los mejores ajustes. Altos valores de  $R^2$  indican un mayor grado de correlación entre las variables experimentales y los valores de respuesta obtenidos (Herrera-Vázquez et al., 2022), en este caso la concentración de biopolímero y los coeficientes reológicos.

### Cuadro 3. Coeficientes de los modelos empíricos

Table 3. Coefficients of the empirical models

	$\beta_1$	$\beta_2$	$e_i$	$R^2$	CV
ALG_RV3	0.136 (0.200) <sup>ns</sup>	-1.033 (0.005)	0.160	0.983	14.5%
ALG_RV4	0.235 (0.000)	-1.022 (0.000)	0.075	0.996	6.8%
CMC_RV3	0.598 (0.000)	1.736 (0.000)	0.053	0.998	5.6%
CMC_RV4	0.442 (0.000)	0.720 (0.008)	0.181	0.972	19%

(Valor P); ns: coeficiente no significativo (P=0.05);  $e_i$ = error de estimación, CV: coeficiente de variación

### Validación del modelo empírico

Con base a los valores reológicos del MLIN que se indican en el Cuadro 2 y los coeficientes del modelo empírico CMC\_RV3 se estimó la masa de polisacárido presente en el mucílago. Los valores estimados se compararon con los valores reales obtenidos después del proceso de liofilización. Además, se calculó el error residual absoluto, entre los valores estimados y experimentales (Cuadro 4).

Aunque todos los modelos muestran una buena capacidad predictiva según sus coeficientes de determinación, solo cinco observaciones experimentales presentaron un error absoluto inferior al 15%. Estas discrepancias podrían deberse a la falta de control de variables experimentales durante la extracción, especialmente la temperatura, que no fue considerada en los modelos empíricos.

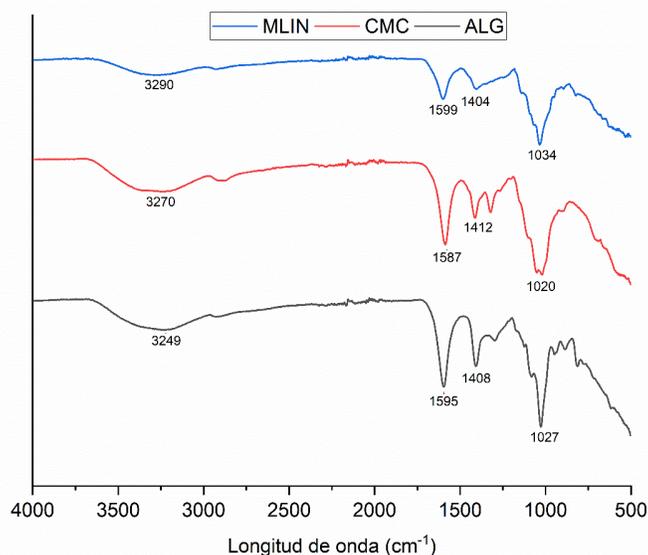
### Cuadro 4. Valores estimados de masa de polisacáridos en MLIN

Table 4. Estimated values of polysaccharide mass in MLIN

Muestra	MLIN_RV3			MLIN_RV4		
	Esperado (g)	Experimental (g)	ERA*	Esperado (g)	Experimental (g)	ERA*
1	0.447	0.330	35%	0.712	0.330	116%
2	0.421	0.420	0%	0.713	0.420	70%
3	0.566	0.451	25%	0.073	0.451	84%
4	0.442	0.508	13%	0.711	0.508	40%
5	0.294	0.450	35%	0.640	0.450	42%
6	0.427	0.480	11%	0.514	0.480	7%
7	0.572	0.460	24%	0.378	0.460	18%
8	0.381	0.400	5%	0.519	0.400	30%

\* ERA: Error Residual Absoluto

El tipo de polímero no debería ser un impedimento para estimar modelos de predicción. Esto se debe a la presencia de grupos hidroxilos y carboxilos en las unidades monoméricas que definen las estructuras supramoleculares (Puente Córdova et al., 2022) del ALG, CMC y MLIN, como se indica en la Figura 4.



**Figura 4.** Espectros FTIR de biopolímeros y polisacárido de MLIN

**Figure 4.** FTIR spectra of biopolymers and MLIN polysaccharide

## CONCLUSIÓN

Las soluciones poliméricas de alginato de sodio, carboximetilcelulosa y mucílago de linaza siguen un comportamiento pseudoplástico que se ajusta a un modelo de Ostwald. La viscosidad aparente de estos fluidos y el valor del índice de comportamiento de flujo son dependiente de la concentración del biopolímero. Con base en esta relación es posible estimar modelos matemáticos empíricos capaces de estimar la concentración de polisacáridos presentes en mucílagos vegetales. La estimación matemática permite calcular la masa de polisacáridos y de este modo evitar el gasto de energía y/o insumos necesarios para el precipitado de los polisacáridos. Los modelos matemáticos empíricos son relativamente fáciles de calcular y la estimación de los coeficientes se puede efectuar mediante el análisis de regresión múltiple disponible en Microsoft Excel.

Es necesario incluir la temperatura de medición como un factor para estimar modelos con mejor ajuste. Por otro lado, la sensibilidad y capacidad del reómetro juega un papel primordial es la estimación de los parámetros viscoelásticos de los fluidos. Además, el control de variables como; concentración y tipo de biopolímero, volumen de medición y método de extracción de los mucílagos son indispensables para obtener resultados con una predicción matemática más precisa.

### **Agradecimientos**

Los autores agradecen la autorización de la Facultad de Ciencias Agrícolas, UAEMex para usar el laboratorio de Análisis de Textura de Alimentos y para realizar el proyecto de estadía profesional. De igual manera se agradece a la M. en C Mariela Molina Jacinto por los análisis e interpretación de los espectros FTIR.

### **LITERATURA CITADA**

- Ding, H. H., Cui, S. W., Goff, H. D., Wang, Q., Chen, J., & Han, N. F. (2014). Soluble polysaccharides from flaxseed kernel as a new source of dietary fibres: Extraction and physicochemical characterization. *Food Research International*, 56, 166–173. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2013.12.005>
- Herrera-Vázquez, S. E., Dublán-García, O., Arizmendi-Cotero, D., Gómez-Oliván, L. M., Islas-Flores, H., Hernández-Navarro, M. D., & Ramírez-Durán, N. (2022). Optimization of the Physical, Optical and Mechanical Properties of Composite Edible Films of Gelatin, Whey Protein and Chitosan. *Molecules*, 27(3). <https://doi.org/10.3390/molecules27030869>
- Kaur, M., Kaur, R., & Punia, S. (2018). Characterization of mucilages extracted from different flaxseed (*Linum usitatissimum* L.) cultivars: A heteropolysaccharide with desirable functional and rheological properties. *International Journal of Biological Macromolecules*, 117, 919–927. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2018.06.010>
- Kumari, P., Vijayan, V., Sreekumar, S., Lakra, R., Sivagnanam, U. T., & Kiran, M. S. (2023). Biological and physicochemical characterization of flax seed mucilage collagen bio-composite for potential use as tissue regenerative scaffold. *Materials Today Communications*, 34. <https://doi.org/10.1016/j.mtcomm.2023.105426>
- Li, Y., Duan, Q., Yue, S., Alee, M., & Liu, H. (2024). Enhancing mechanical and water barrier properties of starch film using chia mucilage. *International Journal of Biological Macromolecules*, 274. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2024.133288>
- Puente Córdova, J. G., Hernández Ramírez, C. L., Reyes Melo, M. E., Rentería Baltiérrez, F. Y., & Miranda Valdez, I. Y. (2022). Estudio reológico de soluciones

- poliméricas de carboximetil celulosa. *Ingeniería Investigación y Tecnología*, 23(2), 1–10. <https://doi.org/10.22201/fi.25940732e.2022.23.2.012>
- Qian, K. Y., Cui, S. W., Nikiforuk, J., & Goff, H. D. (2012). Structural elucidation of rhamnogalacturonans from flaxseed hulls. *Carbohydrate Research*, 362, 47–55. <https://doi.org/10.1016/j.carres.2012.08.005>
- Thanatcha, R., & Pranee, A. (2011). Extraction and characterization of mucilage in *Ziziphus mauritiana* Lam. *International Food Research Journal*, 18, 201–2012. Retrieved from [https://scholar.google.com/scholar?cluster=2542081921595891761&hl=es&as\\_sdt=0,5](https://scholar.google.com/scholar?cluster=2542081921595891761&hl=es&as_sdt=0,5)
- Timilsena, Y. P., Adhikari, R., Kasapis, S., & Adhikari, B. (2016). Molecular and functional characteristics of purified gum from Australian chia seeds. *Carbohydrate Polymers*, 136, 128–136. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2015.09.035>
- Urbizo-Reyes, U., San Martin-González, M. F., Garcia-Bravo, J., & Liceaga, A. M. (2020). Development of chia seed (*Salvia hispanica*) mucilage films plasticized with polyol mixtures: Mechanical and barrier properties. *International Journal of Biological Macromolecules*, 163, 854–864. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2020.07.023>
- Urbizo-Reyes, U., San Martin-González, M. F., Garcia-Bravo, J., López Malo Vigil, A., & Liceaga, A. M. (2019). Physicochemical characteristics of chia seed (*Salvia hispanica*) protein hydrolysates produced using ultrasonication followed by microwave-assisted hydrolysis. *Food Hydrocolloids*, 97. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2019.105187>
- Xu, Z., Jiang, N., Li, M., Xia, X., & Xiang, X. (2025, July 1). Flaxseed (*Linum usitatissimum* L.) polysaccharides and oligosaccharides: Structure, extraction, biological properties and industrial applications. *Trends in Food Science and Technology*. Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2025.105035>
- Ziolkovska, A. (2012). Laws of flaxseed mucilage extraction. *Food Hydrocolloids*, 26(1), 197–204. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2011.04.022>

