

REOLOGÍA DE POLÍMEROS

(Polymers rheology)

William Zambrano-Herrera

MSc. en Ingeniería Agroindustrial. Profesor Asociado a Dedicación Exclusiva, Programa Ciencias del Agro y del Mar-UNELLEZ-VIPI. San Carlos, estado Cojedes, Venezuela. Área de Conocimiento: Química-Biología. williamz@unellez.edu.ve

Revisión Bibliografica

Recibido: 26-03-2020

Aceptado: 04-04-2020

RESUMEN

El objetivo de esta revisión técnica fue documentar la información disponible sobre la reología de polímeros, enfocando particularmente hacia los biopolímeros o biomoléculas de interés, como los son las proteínas y los polisacáridos, presentes en grandes cantidades en diversos alimentos. La reología es la ciencia que estudia el flujo y la deformación de éstos cuando son sometidos a esfuerzos cortantes. En alimentos, resulta útil conocer las propiedades reológicas de estos para un mejor manejo durante el procesamiento. Las operaciones unitarias a la que son sometidos, las materias primas de origen animal y vegetal contribuyen a formar dispersiones de monómeros, oligómeros y polímeros, cuyo comportamiento define en gran medida la calidad del producto final. En virtud que muchos de estos polímeros poseen un carácter no newtoniano, y por ende se clasifican como tixotrópicos, viscoelásticos, entre otros tendrán diferentes grados reología en el material particulado fluido, asociando esto con la viscosidad y los fenómenos de transporte. Las proteínas y los carbohidratos, en sus condiciones poliméricas (polipéptidos y polisacáridos) generan diversos parámetros reológicos medibles en cada caso.

Palabras clave: *Reología, polímeros, proteínas, polisacáridos.*

SUMMARY

The objective of this technical review was to document the available information on the rheology of polymers, focusing particularly on the biopolymers or biomolecules of interest, such as proteins and polysaccharides, present in large quantities in various foods. Rheology is the science that studies the flow and deformation of these when subjected to shear stresses. In food, it is useful to know the rheological properties of these for better handling during processing. The unit operations to which the raw materials of animal and plant origin are subjected contribute to the dispersion of monomers, oligomers and polymers, whose behavior largely defines the quality of the final product. Because many of these polymers have a non-Newtonian character, and therefore are classified as thixotropic, viscoelastic, among others they will have different rheology degrees in the fluid particulate material, associating this with viscosity and transport phenomena. Proteins and carbohydrates, in their polymeric conditions (polypeptides and polysaccharides) generate various measurable rheological parameters in each case.

Keywords: *Rheology, polymers, proteins, polysaccharides.*

INTRODUCCIÓN

LA REOLOGÍA

El origen etimológico de la reología se refiere a estudio del flujo (del griego reos: fluid and logos: tratado, ciencia) fue propuesta por Eugene Cook Bingham, profesor de química del Lafayette College (Easton, PA, USA) para definir aquella rama de la Física cuyo objetivo es el conocimiento fundamental y práctico de la deformación o flujo de la materia (Hernández, 2014). Dada la diversidad de aplicaciones en que la reología está implicada, se podrían distinguir cuatro ramas principalmente (Ferguson y Kembrowski, 1991; Bames et al., 1993), que responderían a las principales direcciones en la investigación actual en Reología: la macroreología o reología fenomenológica, la microreología o reología estructural, la reometría y la reología aplicada.

Hernández (2014), explica que la reología fenomenológica o macroreología describe los fenómenos macroscópicos que ocurren durante la deformación de los materiales de forma que se ignora la naturaleza molecular de la materia y se aprovecha el concepto de continuo. Por su parte, la microreología, se ocupa de la relación entre la estructura microscópica real del material y sus propiedades reológicas. En este sentido se ha realizado un esfuerzo especialmente intenso, con más o menos éxito, para predecir las propiedades de compuestos macromoleculares a partir de modelos matemáticos de estructura y dinámica de largas cadenas de polímeros. La reometría, se ocupa de la determinación cuantitativa de las propiedades reológicas del sistema investigado de forma experimental, resulta de gran importancia en control de procesos y control de calidad, así como a la hora de comprobar la utilidad de cualquier modelo constitutivo propuesto. Finalmente, la reología aplicada se ocupa de problemas de deformación y flujo de sustancias reológicas complejas con geometrías de interés práctico (por ejemplo, en ingeniería química), que han de ser estudiados utilizando métodos numéricos.

POLÍMEROS Y BIOPOLÍMEROS

Los polímeros resultan de la unión de varias unidades de un monómero, resultando un compuesto químico de origen natural o sintético basado en sus unidades estructurales constitutivas. En el campo de la química orgánica, a los polímeros se les denomina biopolímeros. Hay macromoléculas de interés

biológico como los carbohidratos y proteínas que, al ser intrínsecos de las materias primas animales y vegetales utilizadas para la formulación de alimentos, generan dispersiones alimenticias que poseen determinados comportamientos reológicos. Será este el enfoque que el autor le dará a esta revisión bibliográfica, enfocado a la reología de biomoléculas poliméricas.

REOLOGÍA DE SISTEMAS DISPERSOS

Badui (2006), explica que la estructura de los alimentos está definida por el acomodo a niveles micro y macroscópicos de sus diversos constituyentes. Su grado de organización y estabilidad depende del nivel de cohesión entre sus componentes, así como de las fuerzas físicas y químicas que intervienen. A pesar de la complejidad estructural y la heterogeneidad de los alimentos, casi todos pueden clasificarse en dos grandes categorías: 1) tejidos celulares intactos, y 2) dispersiones, también llamadas coloides, estos últimos son el resultado de los diversos procesos a que son sometidos los tejidos intactos, lo cual implica, cortado, licuado, trituración, molienda, amasado, mezclado, entre otras operaciones comunes en el procesamiento de alimentos. Un coloide muy común resultado de ello son los soles, dispersión formada por un sólido disperso en un líquido. En este caso, las partículas de la fase dispersa están constituidas por grandes macromoléculas tales como proteínas, polisacáridos y lípidos.

En el caso de los soles y otros coloides fluidos, al aplicar una fuerza se obtiene un flujo o deformación por unidad de tiempo. La resistencia del sol al flujo se define como viscosidad. Si para un fluido la relación entre esfuerzo y tasa de corte es directamente proporcional, se tiene un comportamiento ideal conocido como “newtoniano”, es decir, obedecen la Ley de Newton de la viscosidad, que se expresa como:

$$\tau = \eta \left(\frac{dv}{dy} \right) \quad \text{Ecuación [1]}$$

Donde:

τ : Esfuerzo cortante (N/m² = Pa)

η : Coeficiente de viscosidad (Pa·s)

$\left(\frac{dv}{dy} \right)$: Tasa de velocidad o corte.

La mayoría de los soles alimenticios presentan desviaciones marcadas del comportamiento ideal y, por lo tanto, su viscosidad cambia al aplicar diversos valores de esfuerzo y/o tasa de corte, y presentan un comportamiento no-lineal entre estos dos parámetros. Los fluidos no newtonianos han sido denominados “pseudoplásticos”, “dilatantes” y “plásticos”. Estos últimos se subdividen en Bingham o lineales y no-Bingham o exponenciales. Los soles pseudoplásticos y dilatantes muestran flujo al aplicar cualquier valor de esfuerzo cortante, mientras que los fluidos plásticos requieren un valor inicial finito de esfuerzo (esfuerzo de umbral o cesión) antes de que presenten flujo. En los soles pseudoplásticos y plásticos no Bingham se presenta una disminución de la viscosidad conforme aumenta la tasa de corte; en los dilatantes, la viscosidad aumenta al aumentar la tasa de corte; y los plásticos de Bingham presentan una viscosidad constante una vez que se logra el flujo. El comportamiento pseudoplástico es el más común en los soles alimenticios. Ejemplos de estos soles son dispersiones de gomas, pastas proteicas diluidas, dispersiones de pectinas, suero de leche y aderezos para ensalada. Los soles hidrofílicos concentrados, tales como salsa catsup, purés de frutas, pastas proteicas concentradas, masa de gluten y masa de maíz, presentan un flujo plástico no-Bingham. El comportamiento dilatante, aunque no muy común, se ha observado en dispersiones de almidón en agua. El flujo plástico Bingham no es común en soles alimenticios (Badui, 2006).

REOLOGÍA DE LAS PROTEÍNAS

Nelson y Cox (2014), indica que las proteínas son polímeros de los aminoácidos, que se unen o polimerizan entre sí a través de enlaces covalentes denominados peptídicos, formando largas cadenas polipeptídicas. Algunas proteínas consisten en una sola cadena polipeptídica, pero otras pueden estar conformadas por más de dos, en ese caso reciben el nombre de proteínas multiméricas. Fennema (2010) indica que las proteínas juegan un papel fundamental en los sistemas biológicos, y pueden usarse como proteínas alimentarias. Sin embargo, con fines prácticos, las proteínas de los alimentos se pueden definir como aquellas que son fácilmente digestibles, no tóxicas, nutricionalmente adecuadas, funcionalmente útiles y abundantes.

Tradicionalmente, la leche, la carne (incluyendo el pescado y las aves), los huevos, los cereales, las leguminosas y las semillas oleaginosas han constituido las fuentes principales de proteínas alimentarias.

Badui (ob. cit), indica que el comportamiento pseudoplástico de las proteínas se explica por la posibilidad de que las moléculas de proteína, que son grandes, puedan orientar su eje mayor respecto de la dirección del flujo de su solución. La desagregación de proteínas multiméricas contribuye a este comportamiento. Al cesar el esfuerzo de cizalla o detenerse el flujo, las proteínas requieren de un tiempo de relajación para perder la orientación que habían ganado, si es que recobran su estado original. Las soluciones de proteínas fibrilares como la gelatina o la actomiosina usualmente permanecen orientadas, y por lo tanto, no recobran rápidamente su viscosidad original, a diferencia de las soluciones de proteínas globulares como las proteínas de suero y de soja que recobran su viscosidad rápidamente cuando el flujo se detiene, dichas soluciones se llaman tixotrópicas (Fennema, ob cit).. El coeficiente de viscosidad de la mayoría de las soluciones de proteínas sigue una relación exponencial con la concentración de la proteína debido a las interacciones proteína-proteína e interacciones entre las esferas de hidratación de las moléculas de las proteínas. En altas concentraciones de proteínas o en geles donde las interacciones proteína-proteína son numerosas y fuertes, se observa un comportamiento viscoelástico. En este caso se requiere, para iniciar el flujo, de una fuerza específica también conocida como yield stress. La viscosidad de las soluciones de proteínas es una manifestación de interacciones complejas, que incluyen el tamaño, la forma y las interacciones con el solvente de la proteína, el volumen hidrodinámico y la flexibilidad molecular en el estado hidratado, que resulta mucho más voluminoso que cuando se trata de la proteína no hidratada.

Por otra parte, la gelación de proteínas se refiere a la transformación de una proteína en el estado “sol” a un estado “gel”, que se facilita por calor, enzimas, o cationes divalentes bajo condiciones apropiadas y que inducen la formación de una estructura de red, cuyos mecanismos de formación pueden diferir considerablemente. La gelificación es necesaria en los embutidos, proteína de pescado triturada y calentada, proteínas vegetales texturizadas por extrusión o hilado, masas para panificación y algunos alimentos

tradicionales como el tofu. La gelificación no sólo se utiliza para formar geles sólidos viscoelásticos, sino también para mejorar la absorción de agua, los efectos espesantes, la fijación de partículas (adhesión), y para estabilizar emulsiones y espumas.

Un caso representativo de esta condición lo constituye la gelatina, que es una proteína fibrosa que tiene numerosas aplicaciones principalmente en la industria farmacéutica y alimenticia debido a sus propiedades químicas y físicas; tiene la habilidad de formar geles térmicamente reversibles (Saxena et al., 2009), puede ser usada como agente emulsificante, estabilizante, o para mejorar algunas características como textura y capacidad de retención de agua. Las propiedades reológicas de viscosidad y poder gelificante dependen de la materia prima, de su pretratamiento (alcalino ó ácido), del método de extracción e hidrólisis del colágeno, del método de concentración de la solución, y del método de secado.

Al respecto, Serna-Cock, Velázquez y Ayala (2010) realizaron un estudio en el que evaluaron el efecto de la Ultra Filtración (UF) sobre las propiedades reológicas de gelatina comestible tipo B y compararon los resultados con las propiedades reológicas de gelatina comestible concentrada mediante evaporación. Los parámetros reológicos medidos fueron viscosidad y poder gelificante durante las primeras 13 horas de proceso. Los investigadores concluyeron que la ultrafiltración es una tecnología adecuada que permite reemplazar la evaporación al vacío en la primera etapa de concentración, y mejora las propiedades reológicas de viscosidad y poder gelificante; propiedades que inciden directamente sobre el precio, dado que a mayores valores de Bloom y de viscosidad en la gelatina comestible, mayor es el precio en el mercado internacional. El uso de UF como método de concentración de gelatina tipo B, mejora las propiedades de viscosidad y de Bloom especialmente cuando se lo utilizaron en una mezcla 50:50 de carnaza entera y de carnaza desorillo-sebo.

Otro estudio tiene que ver con la caracterización reológica de las masas de colágeno durante el proceso de extrusión de envolturas comestibles, realizado por Olaia (2019), en el que el autor desarrolló un procedimiento reológico capaz de caracterizar las propiedades viscoelásticas de las masas de colágeno. En el estudio se realizaron curvas de flujo y ensayos de tixotropía, así como ensayos dinámicos capaces de determinar los módulos de G' y G'' . Asimismo, se ejecutaron ensayos de fluencia y recuperación. En

la caracterización se analizaron tres formulaciones de masa: A, B y C. Los resultados indicaron que las masas de colágeno son materiales no newtonianos y pseudoplásticos, además de tixotrópicos. La masa tipo C fue el material más consistente ($K=2243$ Pa.s) y con un área de histéresis superior (362 Pa/s). También fue la muestra con mejores propiedades viscoelásticas ($G'=13420$ Pa) y la que mejor soportó las velocidades de cizalla propias de los procesos de extrusión.

REOLOGÍA DE LOS POLISACÁRIDOS

Murray et al. (2013) explica que los polisacáridos son polímeros de carbohidratos producto de la condensación de más de diez (10) unidades de monosacáridos; los ejemplos son los almidones y las dextrinas, que pueden ser polímeros lineales o ramificados. Fennema (2010) indica que los polisacáridos solubles en agua y los polisacáridos modificados utilizados en los alimentos y otras aplicaciones industriales son conocidos como gomas o hidrocoloides.

Existen dos tipos generales de flujo exhibidos por las soluciones de polisacáridos: pseudoplástico (con mucho el más común) y tixotrópico. La viscosidad de los fluidos pseudoplásticos depende de la fuerza de cizalla. En el flujo pseudoplástico el incremento de la rapidez del flujo resulta de un incremento en la fuerza de cizalla; esto es, cuanto más rápido fluye el fluido, menos viscoso es. La velocidad de flujo puede ser incrementada aumentando la fuerza aplicada por vertido, masticación, deglución, bombeo, mezclado, entre otros. El cambio en la viscosidad es independiente del tiempo, es decir, la velocidad de flujo cambia instantáneamente al modificar la fuerza de cizalla. Las moléculas de polímeros lineales forman soluciones cuya viscosidad disminuye con la fuerza de cizalla, normalmente pseudoplásticas (Badui, 2010).

En general, las gomas de mayor peso molecular son más pseudoplásticas. Las soluciones de gomas menos pseudoplásticas dan lugar a lo que se conoce como de “flujo largo”, tales soluciones son percibidas generalmente como «limosas». De las soluciones más pseudoplásticas se dice que tienen un “flujo corto”, y generalmente se las percibe como «no limosas». En la Ciencia de los Alimentos, un material limoso es el que posee las características de ser espeso, de adherirse a la boca y de ser difícil de deglutir. La limosidad está inversamente relacionada con la pseudoplasticidad; esto es, para ser percibido como

no limoso, debe producirse una marcada pérdida de viscosidad a las bajas fuerzas de cizalla derivadas de la masticación y la deglución. El flujo tixotrópico es un segundo tipo de flujo dependiente de la fuerza de cizalla. En este caso, la reducción de la viscosidad que resulta del incremento de la velocidad de flujo no ocurre instantáneamente. La viscosidad de las soluciones tixotrópicas disminuye bajo una fuerza de cizalla constante de manera dependiente del tiempo, y vuelve a alcanzar la viscosidad original cuando cesa la fuerza, también sólo después de un intervalo de tiempo definido y medido. Este comportamiento es debido a que se produce una transición gel- solución-gel. En otras palabras, una solución tixotrópica en reposo es un gel débil (capaz de ser vertido).

Para las soluciones de la mayoría de las gomas, el incremento de la temperatura resulta en una disminución de la viscosidad (la goma xantano es una excepción entre 0 °C y 100°C). Con frecuencia ésta es una propiedad importante, puesto que significa que una concentración mayor de sólidos va a poder ser disueltos a una temperatura más alta, y la solución puede entonces ser enfriada para producir el espesamiento. Estas gomas se comercializan en forma de polvo de diversos tamaños de partícula, se utilizan mayoritariamente para espesar y/o gelificar soluciones acuosas, para modificar y/o controlar las propiedades de flujo y la textura de los alimentos líquidos y las bebidas, así como para modificar las propiedades de deformación de productos semisólidos. En los productos alimenticios se usan generalmente a concentraciones 0,25-0,50%, lo que indica su gran capacidad de producir viscosidad y formar geles (Fennema, 2010).

Existen diversas investigaciones que buscan explicar las propiedades reológicas de distintos polisacáridos. Una de ellas es la de Bello-Lara et al., (2014), que realizaron una extracción y caracterización reológica de almidón y pectina en frutos de plátano ‘Pera’ (Musa ABB), el objetivo fue cuantificar la extracción y caracterizar reológicamente el almidón y la pectina de frutos de plátano ‘Pera’ (Musa ABB). Por cada 100 g de harina seca de frutos de plátano ‘Pera’ se tuvo un rendimiento de extracción de 56,53% de almidón y 9,73% de pectina. El perfil reológico de los polisacáridos tuvo un índice de consistencia ($Pa \cdot sn$) de 0,0325 (almidón) y 0,0140 (pectina) e índices de flujo (n , adimensional) de 0,7225 (almidón) y 0,7800 (pectina). Ambos polisacáridos presentaron un flujo no Newtoniano y un comporta-

miento pseudoplástico.

De igual forma, Rodríguez et al. (2006), en su estudio “Reología de suspensiones preparadas con harina precocida de yuca”, investigaron el efecto de las condiciones de proceso sobre las harinas de yuca precocidas verificando su comportamiento reológico en un medio acuoso. La inclusión en el procesamiento de una etapa de reposo a baja temperatura del parénquima de yuca precocido influyó ampliamente en las características de la harina de yuca obtenida. La viscosidad aparente de suspensiones acuosas de harina de yuca elaborada con parénquima precocido y reposado a baja temperatura fue más baja comparada con la viscosidad de las suspensiones de harina de yuca precocida sin período de reposo. Las suspensiones de las harinas preparadas con trozos de yuca precocidos sin y con reposo a baja temperatura tuvieron un comportamiento reológico propio de un fluido pseudoplástico.

Siguiendo con otra investigación relevante, Velásquez-Barreto y Velezmoro (2018), investigaron las propiedades reológicas y viscoelásticas de almidones de tubérculos andinos en el que determinaron sus características fisicoquímicas, propiedades reológicas y viscoelásticas. Para ello utilizaron tubérculos de mashua (*Tropaeolum tuberosum* Ruiz & Pavón), oca (*Oxalis tuberosa* M.) y olluco (*Ullucus tuberosum* C.) del distrito de Paucará (Huancavelica, Perú). Los almidones fueron extraídos por sedimentación, tamizado, lavado y posterior secado a 40 °C durante 48 h en estufa. Luego se determinaron el contenido químico proximal de los tubérculos, rendimiento de almidón, contenido de amilosa aparente (AA), las propiedades reológicas y viscoelásticas. El contenido de AA estuvo entre 21,13% a 26,13%, las pastas de mashua, oca y olluco presentaron un comportamiento tixotrópico y pseudoplástico ($n < 1$), también observaron un comportamiento más elástico que viscoso ($G' > G''$) en las pastas de los tres almidones y la viscosidad compleja (η^*) fue mayor en las pastas de almidones de mashua y olluco. Los resultados mostraron que pastas de almidones de mashua, oca y olluco mostraron un comportamiento tixotrópico y pseudoplástico y tuvieron un comportamiento más elástico que viscoso, asimismo los almidones de mashua mostraron una mayor viscosidad compleja y aparente.

Las pectinas, por su parte, al ser polisacáridos que aportan viscosidad y propiedades gelificantes a diversos alimentos, también resulta útil estudiar

sus propiedades reológicas. Se trata de polisacáridos muy complejos formados principalmente por un dominio de unidades de ácido D-galacturónico con enlaces α -(1-4) y otro de ramnogalacturonano con cadenas laterales de arabinosa y galactosa, entre otros (Badui, 2006). En este sentido, Moreno, Montilla y Villamiel (2016) realizaron un análisis reológico de pectinas industriales procedentes de subproductos de cítricos dirigidas a la elaboración de distintos tipos de alimentos. Para ello se prepararon geles de pectinas al 3% empleando placa magnética o agitador de varillas con y sin ultrasonidos (US). El sonicador (Biogen Científica S.L.), provisto de una sonda de 12,7 mm de diámetro trabajó a 20 kHz de forma pulsada (2 s on/ 5 s off) siendo la amplitud del 30% (106,6 W/cm²). En los geles preparados se estudió, a 25 °C, el efecto del tiempo ($\gamma=0$ -1000 s⁻¹ (300 s) / $\gamma=1000$ s⁻¹ (60 s) / $\gamma=1000$ -0 s⁻¹ (300 s)) y de la velocidad de cizalla (1000 s⁻¹) sobre la viscosidad. Para ello, se utilizó un reómetro rotacional de cono-placa (DC60/2°, Haake, Germany). Según el estudio reológico las pectinas presentan un comportamiento no newtoniano y pseudoplástico, ya que la viscosidad disminuye con la velocidad de cizalla. Además, al aumentar el tiempo disminuye la viscosidad, por lo que se trata de materiales tixotrópicos. Por otra parte, el estudio arrojó que los métodos de preparación y, en particular, la aplicación de US posibilita la obtención de geles con una más amplia gama de valores de viscosidad, diversificando aún más las posibilidades de uso de las pectinas como ingredientes alimentarios.

Por otra parte, otros de los polisacáridos con influencia en fenómenos de transporte y fluidez de alimentos son los alginatos, los cuales son una sal, la mayoría de las veces la sal sódica, de un ácido poliurónico, el ácido alginico, que se obtiene a partir de algas pardas. Los alginatos son muy utilizados para proporcionar altas viscosidades a bajas concentraciones. Una viscosidad aún mayor en condiciones de baja fuerza de cizalla puede ser conseguida introduciendo una pequeña cantidad de iones calcio. Si se usa alginato de propileno (PGA), se produce una pequeña cantidad de entrecruzamiento entre las cadenas por medio del calcio, que se une a los grupos carboxílicos restantes. Esto da lugar al espesamiento de las soluciones, más que a su gelificación (Fennema, 2010).

Al respecto, Gómez-Díaz y Navaza (2002), realizaron una caracterización reológica de dispersiones

agua-alginato sódico con aplicación en la industria alimentaria. Este estudio concluyó que el polímero estudiado se comporta de forma no newtoniana y de tipo pseudoplástico, o sea, que al aumentar el gradiente de velocidad aplicado sobre el fluido su viscosidad disminuye. De igual manera se observó que un aumento de temperatura producía una pérdida de este comportamiento pseudoplástico ya que hacía que afectase en menor medida el gradiente de velocidad sobre la viscosidad de la muestra. Se comprobó que los modelos de Ostwald y de Sisko permitían modelizar el comportamiento reológico de disoluciones acuosas de alginato. Finalmente, este estudio permitió caracterizar al alginato sódico como un agente espesante, el cual se puede emplear con el fin de aportar texturas determinadas a distintos alimentos con el fin de adaptarlos a las peticiones de los consumidores.

CONCLUSIÓN

La reología de polímeros, y en particular de los biopolímeros es de interés en la ciencia y tecnología de alimentos, ya que permiten caracterizar los patrones de flujo durante el procesamiento, lo cual facilita el manejo y las condiciones operación, además de las propiedades sensoriales del producto final. Los polímeros de carbohidratos, como los almidones, las pectinas, las gomas y los alginatos confieren viscosidad a sus dispersiones, que tienden a gelificar cada uno con sus respectivas particularidades. Igualmente, las proteínas tienen diferentes propiedades funcionales, resaltando la humectación, viscosidad y gelificación en sus diversas aplicaciones en alimentos.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Badui, S. (2006). *Química de los Alimentos*. Mexico. Editorial Pearson Education.
- Bello-Lara, J. E.; Balois-Morales, R.; Sumaya-Martínez, M. T.; Juárez-López, P.; Rodríguez-Hernández, A. I.; Sánchez-Herrera, L. M. y Jiménez-Ruiz, E. I. (2014). Extracción y caracterización reológica de almidón y pectina en frutos de plátano 'Pera' (Musa ABB) *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas* Pub. Esp. Núm. 8 16 de mayo - 29 de junio, [1501-1507]
- Fennema, O. R. (2010). *Química de los Alimentos*. España. Editorial Acirbia.
- Gómez-Díaz, D.; Navaza, J. M. (2002). Caracterización reológica de dispersiones agua-alginato sódico con aplicación en la industria alimentaria. *Cienc. Tecnol. Aliment.* Vol. 3, No. 5, [pp. 302-306].

- Hernández M. (2014). Caracterización reológica de hidrogeles de MCC-NaCMC + almidón. Tixotropía y sinergismo. (Tesis Doctoral). Publicado por Proquest, Miami EE.UU.
- Murray, R., Bender, D., Botham, K., Kenelly, P., Rodwell, V. y Weil, P. (2013) Harper Bioquímica Ilustrada. 29ª Edición. Mc Graw-Hill Interamericana Editores, México.
- Nelson, D. y Cox, M. (2014). Principios de Bioquímica de Lenhinger 6º Edición (versión portuguesa). ARMET editora LDTA, Porto Alegre.
- Olaia, B. M., (2019) Portal académic-e. Recuperado de <https://academica-e.unavarra.es/handle/2454/35070?show=full>
- Rodríguez, S., Eduardo; Fernández Q., A.; Alcalá, L. A.; Ospina P., B. (2006). Reología de suspensiones preparadas con harina precocida de yuca Revista Ingeniería y Desarrollo, núm. 19, enero-junio, pp. 17-30 Universidad del Norte Barranquilla, Colombia
- Saxena, A.; Tripathi, B.P; Kumar, M. y Shahi, V.K. (2009). Membrane-Based Techniques for the Separation and Purification of Proteins: An Overview. Adv Colloid Interfac.: 145 (1-2), [1-22].
- Serna-Cock, L.; Velásquez, M.; Ayala, A. (2010). Efecto de la Ultrafiltración sobre las Propiedades Reológicas de Gelatina Comestible de Origen Bovino. Información Tecnológica Vol. 21(6): 91-102.
- Velásquez-Barreto, Frank F.; Velezmoro, C. Propiedades reológicas y viscoelásticas de almidones de de tubérculos andinos. Scientia Agropecuaria 9(2):[189 – 197.