



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA
DE MÉXICO**

**FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES
CUAUTITLÁN**

COMPORTAMIENTO AL FLUJO, PH Y DENSIDAD
DE MEZCLAS DE FRUCTANOS DE AGAVE CON
GLUCOMANANO DE KONJAC, EN MEDIO ACUOSO

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TITULO DE:

INGENIERA EN ALIMENTOS

P R E S E N T A:

ITZEL ADRIANA SILVA FLORES

A S E S O R A S:

DRA. MARÍA GUADALUPE SOSA HERRERA
DRA. VIRGINIA AGUSTINA DELGADO REYES

CUAUTITLÁN IZCALLI, ESTADO DE MÉXICO 2015



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

Dedicatorias y agradecimientos

A mis padres, Rocío y Juan Carlos, porque siempre me han apoyado incondicionalmente y sin ustedes nada de esto hubiera sido posible. Gracias por ayudarme a cumplir mis metas, por demostrarme su cariño en todo momento y sobre todo por confiar en mí. Los quiero muchísimo.

A mi hermano Carlos, porque juntos hemos pasado increíbles momentos y porque eres muy importante en mi vida además, siempre me alentó a terminar este trabajo. Te quiero mucho.

A mi familia, quisiera nombrar cada uno pero son muchos, gracias a todos por su apoyo, confianza y cariño en especial a mi abuelo Moy. Los quiero mucho.

A mis asesoras la Dra. Guadalupe Sosa y la Dra. Virginia Delgado porque siempre me brindaron su ayuda y compartieron su conocimiento, muchas gracias por la paciencia y la dedicación con la que me guiaron durante la elaboración de este proyecto.

A mis amigos Sergio, Norma, Emmanuel, Diana, Rocío, Liz, Jessi y Lili, porque con ustedes he aprendido y disfrutado en diferentes momentos de mi vida. Gracias por los años de amistad y cariño que hemos compartido. Los quiero.

A la Universidad Nacional Autónoma de México, y a la Facultad de Estudios Superiores Cuautitlán por brindarme formación profesional, también quiero agradecer a todos los que fueron mis profesores porque de ellos aprendí mucho día con día, en especial a la profesora Laura Cortázar.

Un agradecimiento a la DGAPA-UNAM por el apoyo económico, ya que este estudio fue financiado por el proyecto PAPIIT IN118214 "Propiedades reológicas y fisicoquímicas de biomoléculas funcionales de interés en la formación de sistemas coloidales alimenticios".

Índice

	Página
Índice de cuadros	4
Índice de figuras	5
Resumen	7
Introducción	8
I. Antecedentes	10
1.1. Fructanos de agave	10
1.3. Interacción biopolímero- biopolímero	19
1.4. Propiedades reológicas de biopolímeros	25
II. Metodología	32
2.1. Objetivos	32
2.1.1. Objetivo general	32
2.1.2. Objetivos particulares	32
2.2. Materiales	32
2.3. Métodos	32
2.3.1. Preparación de las muestras	32
2.3.2. Determinación de humedad	34
2.3.3. Determinación de pH	34
2.3.4. Determinación de densidad	35
2.3.5. Determinación del comportamiento al flujo	35
III. Resultados y discusión	37
3.1. Determinación de pH	37
3.2. Determinación de densidad	38
3.3. Comportamiento al flujo	41

Conclusiones

58

Referencias

60

Índice de cuadros

	Página
Cuadro 1. Modelos matemáticos de ajuste para diferentes comportamientos reológicos en materiales fluidos	31
Cuadro 2. Concentraciones de fructanos de agave y glucomanano de konjac empleadas en las las diferentes combinaciones	33
Cuadro 3. pH de las disoluciones de fructanos de agave y glucomanano de konjac a diferentes concentraciones	37
Cuadro 4. Densidad relativa de las disoluciones de fructanos de agave y glucomanano de konjac a diferentes concentraciones	39
Cuadro 5. Parámetros del comportamiento lineal para las disoluciones de glucomanano de konjac en medio acuoso y en mezcla con fructanos de agave a diferentes concentraciones	40
Cuadro 6. Viscosidad a partir del modelo Newtoniano para las disoluciones de fructanos de agave en medio acuoso	42
Cuadro 7. Parámetros reológicos del modelo de Cross para las disoluciones de glucomanano de konjac en medio acuoso	46
Cuadro 8. Parámetros reológicos del modelo de Cross para las disoluciones glucomanano de konjac en mezcla con fructanos de agave a diferentes concentraciones en medio acuoso	54

Índice de figuras

	Página
Figura 1. Estructura química de fructanos	11
Figura 2. Estructura química de los fructanos de agave	13
Figura 3. Proceso de extracción de glucomanano de konjac	15
Figura 4. Estructura química del glucomanano de konjac	16
Figura 5. Interacción de dos biopolímeros en medio acuoso	21
Figura 6. Diagrama de fases para la mezcla de biopolímeros incompatibles	23
Figura 7. Deformación lineal en materiales fluidos	26
Figura 8. Deformación bajo cizalla en materiales fluidos	27
Figura 9. Gradiente de velocidad entre dos placas paralelas	28
Figura 10. Comportamiento reológico y su relación con la estructura	30
Figura 11. Densidad en función de la concentración de fructanos de agave a 25 °C para disoluciones de fructanos de agave y glucomanano de konjac solos y en mezcla	40
Figura 12. Viscosidad en función de la velocidad de cizalla a 25 °C para disoluciones de fructanos de agave solo en medio acuoso	41
Figura 13. Viscosidad en función de la concentración de disoluciones de fructanos de agave a 25 °C en medio acuoso	43
Figura 14. Viscosidad en función de la velocidad de cizalla a 25 °C para disoluciones de glucomanano de konjac al 0.10, 0.25 y 0.50% en medio acuoso	44

Figura 15. Viscosidad a una velocidad de cizalla aproximadamente de 1 y 1000 s ⁻¹ en función de la concentración de disoluciones de glucomanano de konjac a 25 °C en medio acuoso	47
Figura 16. Comportamiento propuesto para las disoluciones de glucomanano de konjac solo en medio acuoso en presencia de altas velocidades de cizalla	48
Figura 17. Entrecruzamiento de moléculas de glucomanano de konjac en medio acuoso a diferentes concentraciones	49
Figura 18. Viscosidad en función de la velocidad de cizalla a 25 °C para las mezclas de fructanos de agave a diferentes concentraciones con glucomanano de konjac al 0.10% en medio acuoso	50
Figura 19. Viscosidad en función de la velocidad de cizalla a 25 °C para las mezclas de fructanos de agave a diferentes concentraciones con glucomanano de konjac al 0.25% en medio acuoso	51
Figura 20. Viscosidad en función de la velocidad de cizalla a 25 °C para las mezclas de fructanos de agave a diferentes concentraciones con glucomanano de konjac al 0.50% en medio acuoso	53
Figura 21. Viscosidad a una velocidad de cizalla aproximadamente de 1 y 1000 s ⁻¹ en función de la concentración de fructanos de agave para las disoluciones de glucomanano de konjac con fructanos de agave a diferentes concentraciones	55
Figura 22. Mecanismo propuesto del estado en medio acuoso de las cadenas de glucomanano de konjac y fructanos de agave	57

Resumen

Los fructanos de agave y el glucomanano de konjac son polisacáridos que presentan propiedades prebióticas que los hacen sumamente atractivos para utilizarse como un aditivo de la industria de alimentos. En esta investigación se evaluó el pH, la densidad y el comportamiento al flujo de los fructanos de agave y el glucomanano de konjac, solos y en mezcla, estableciendo un punto de partida para su aplicación en sistemas dispersos. Los resultados mostraron que el pH se mantuvo en un intervalo de 6.00 a 6.27, de manera que la concentración de cualquiera de los polisacáridos no afectó el valor de pH. Por su parte, la densidad aumentó con respecto al incremento de la concentración, la densidad de las disoluciones de fructanos de agave en medio acuoso y las mezclas se describieron mediante una relación lineal. En cuanto a las propiedades de flujo, las disoluciones de fructanos de agave mostraron un comportamiento newtoniano y la viscosidad aumentó a medida que la concentración de fructanos de agave se incrementó. Las disoluciones de glucomanano de konjac solo y en mezcla presentaron un comportamiento fluidificante a la cizalla descrito por el modelo de Cross, en donde los parámetros que lo definen: viscosidad a bajas velocidades de cizalla (η_0), el tiempo característico (λ) y la constante de velocidad asociada con el carácter fluidificante (m) aumentaron con respecto al incremento de la concentración de cualquiera de los polisacáridos a excepción de la mezcla de glucomanano de konjac al 0.50% con fructanos de agave al 25 y 30%, en donde los valores de dichos parámetros no corresponden con la tendencia observada, ya que en algunos casos aumentaron y en otros disminuyen. Estos comportamientos se atribuyen a un probable exceso de solutos combinado con una incompatibilidad termodinámica en el sistema.

Introducción

En los últimos años el estudio de los polisacáridos ha despertado un creciente interés en distintos campos, específicamente en el área de alimentos se ha potencializado su uso debido a las propiedades funcionales que presentan.

Recientes investigaciones *in vivo* e *in vitro* confirman que algunos polisacáridos poseen efectos prebióticos, que los hacen sumamente atractivos para utilizarse como un aditivo de alimentos funcionales, los cuales confieren un efecto benéfico a la salud, adicional a su valor nutrimental (Urías-Silvas y col., 2008).

Los fructanos de agave y el glucomanano de konjac, son dos polisacáridos que presentan notables efectos benéficos asociadas con la salud. Diversos estudios han demostrado que las moléculas de los fructanos de agave promueven un ambiente intestinal sano debido a que las enzimas presentes en el tracto gastrointestinal de la mayoría de los mamíferos no pueden romper los enlaces de la molécula, por lo tanto éstas pasan sin ser digeridas estimulando el crecimiento y la actividad de la flora intestinal potencialmente saludable (Moreno-Vilet y col., 2014; López y Urías-Silvas, 2007). De igual forma, los fructanos de agave presentan una influencia positiva en el control de peso y en la reducción de los niveles de glucosa en sangre, por lo que pueden ser de interés en el control de la obesidad debido a su comportamiento como supresor del apetito (Urías-Silvas y col., 2008).

Por su parte, el glucomanano de konjac se considera una fibra soluble que estimula el crecimiento de *bifidobacterias* y *lactobacilos* en humanos, lo cual contribuye a un sano ambiente intestinal (Chen y col., 2006). En recientes investigaciones se ha demostrado que el glucomanano de konjac provoca el aumento de los niveles de ácidos grasos de cadena corta, los cuales actúan como inhibidores del colesterol (Wu y col., 2014).

Actualmente la mayor parte de las investigaciones referentes al comportamiento de ambos polisacáridos se concentran en el área médica, en donde se ha demostrado que la combinación de fructanos tipo inulina con glucomanano de konjac tienen un

efecto benéfico porque regulan las enzimas antioxidantes en el colon (Wu y Chen, 2011). Sin embargo, las investigaciones relacionadas con el estudio de las propiedades que se pueden relacionar con su funcionalidad desde el punto estructural es limitado por ello la finalidad de este estudio es caracterizar en un amplio intervalo de concentraciones el comportamiento al flujo, el pH y la densidad de las disoluciones acuosas de fructanos de agave y glucomanano de konjac de forma individual y en mezcla, estableciendo un punto de partida para su aplicación en sistemas dispersos alimenticios.

I. Antecedentes

1.1. Fructanos de agave

Los fructanos de agave son polisacáridos que se obtienen mediante la extracción acuosa de las piñas maduras de *Agave tequilana* Weber variedad Azul (Ponce y col., 2008). Este género de plantas pertenecen a la familia *Agavaceae* y hasta ahora han sido descritas más de 200 especies (Narváez-Zapata y Sánchez-Teyer, 2009).

México es considerado el centro de origen del género *Agave*, ya que un gran número de especies se encuentran en su territorio (López y Urías-Silvas, 2007; Mancilla-Margalli y López, 2006). A partir del agave es posible obtener diferentes carbohidratos, de manera que la edad de la planta es sumamente importante, los agaves de 2 a 5 años almacenan principalmente fructooligosacáridos, mientras que las plantas de 6 a 7 años contienen principalmente fructanos de cadena larga (Mellado-Mojica y López, 2012).

El proceso de extracción de los fructanos se lleva a cabo en agaves maduros, a los cuales se les retira las hojas, y las piñas resultantes se cortan en trozos para extraer el jugo que después se filtra y desmineraliza. Posteriormente, el jugo obtenido pasa a un sistema de evaporación con vacío en el cual se elimina la mayor cantidad de agua y finalmente se somete a un proceso de secado para obtener los fructanos de agave en polvo (Ponce y col., 2008; Olvera y col., 2007). A nivel industrial se presentan como un polvo blanco, sin olor y con sabor neutral ligeramente dulce (Castellanos-Pérez y col., 2012; Madrigal y Sangronis, 2007).

Los fructanos de agave son polisacáridos constituidos por moléculas de fructosa unidas por enlaces tipo β -fructofuranosil, siendo el término fructano el que se utiliza para denominar este tipo de compuestos (Ponce y col., 2008; López y Urías-Silvas 2007; Madrigal y Sangronis, 2007). Se clasifican en cinco grupos de acuerdo a las unidades estructurales mayoritarias que conforman la molécula, la inulina (Figura 1a), presenta una estructura lineal con enlaces β -2,1 entre las moléculas de fructuosa, en el caso de levano (Figura 1b), su estructura es lineal con enlaces β -2,6. El levano mixto

(Figura 1c), se compone de enlaces β -2,1 y β -2,6. En las neoserias de inulina (Figura 1d), la cadena inicia con fructosas unidas sobre el C₁ y C₆ de la glucosa con enlaces β -2,1; formando un polímero de fructanos con una cadena de inulina en ambos extremos de la molécula de glucosa. Finalmente, en las neoserias de levano (Figura 1e), la cadena inicia con fructosas unidas sobre el C₁ y C₆ de la glucosa con enlaces β -2,6 (Waleckx y col., 2008; López y Urías-Silvas 2007; Roberfroid, 2005; López y col., 2003).

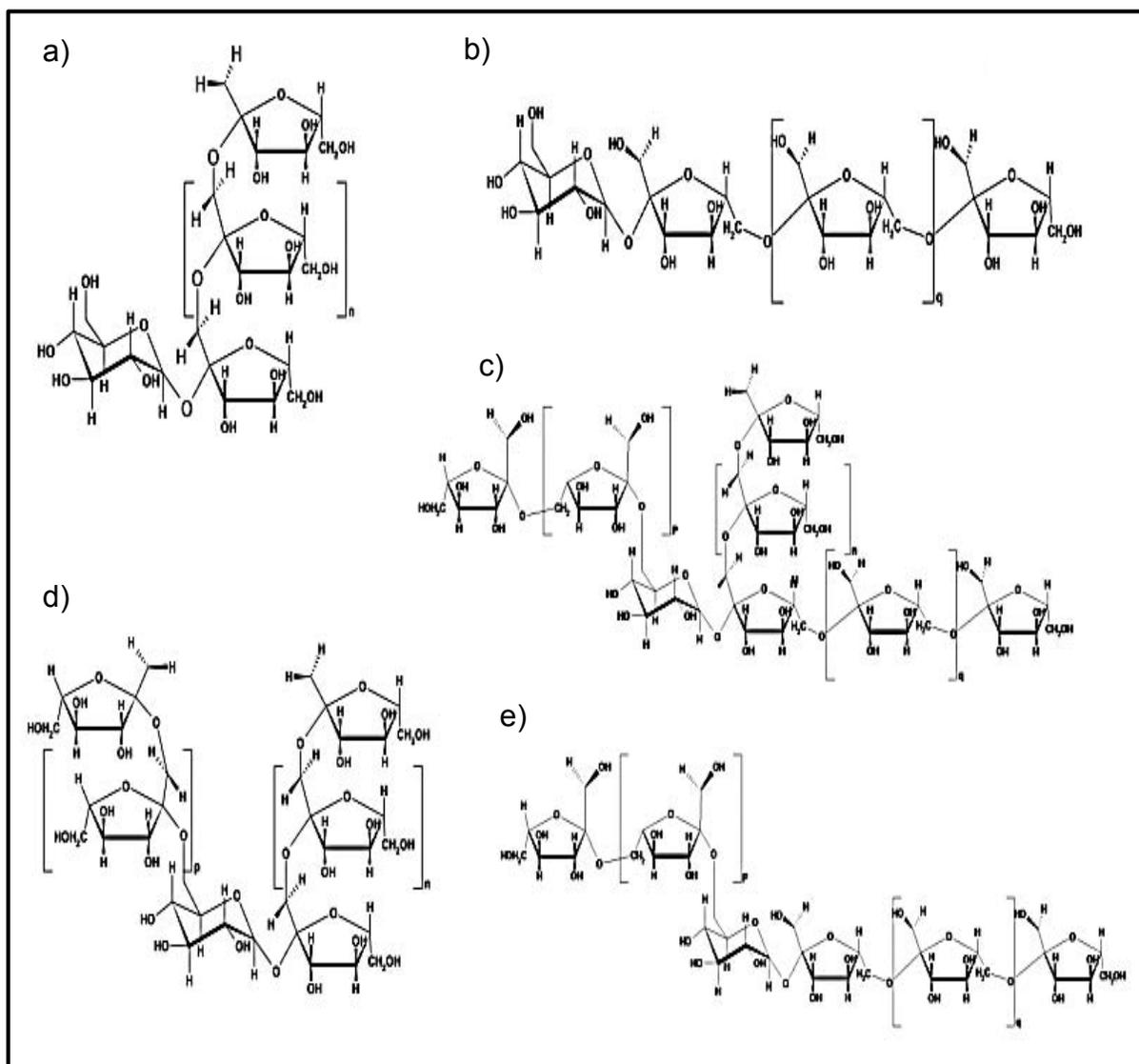


Figura 1. Estructura química de fructanos a) Inulina, b) Levano, c) Levano mixto, d) Neoserie de inulina, e) Neoserie de levano (Waleckx y col., 2008).

Las diferencias estructurales entre los fructanos depende de su origen ya sea vegetal o microbiano, los fructanos tipo levano se obtienen a partir de bacterias y pastos (*Poaceae*), el levano mixto se encuentra en el trigo (*Triticum aestivum*), de la cebolla (*Allium cepa*) y de los espárragos (*Asparagus officinalis*) se obtienen las neoserias de inulina, mientras que en la avena (*Avena sativa*) se producen las neoserias de levano (Mancilla-Margalli y López, 2006).

Por otro lado, el tipo inulina se obtiene a partir de la raíz de achicoria (*Cichorium intybus*), cabe señalar que en los últimos años ha sido ampliamente estudiada debido a los beneficios asociados con la salud ya que tiene funciones de fibra dietética, antioxidante, propiedades inmunomoduladoras y se promueve como alimento de bajo contenido calórico (<2 kcal/g), además de su potencial aplicación en la industria alimentaria como gelificante, estabilizante en emulsiones y espumas y sustituto de grasa en productos lácteos y cárnicos (Darin y Wim, 2014; Ulloa y col., 2010; Madrigal y Sangronis, 2007; Stephen y col., 2006).

Recientes investigaciones han demostrado que la estructura molecular de los fructanos de agave (Figura 2) incluye tres tipos básicos de fructanos: inulina, levano y neoserias de inulina. Dado que la molécula es una mezcla compleja de fructanos altamente ramificados, presenta enlaces β -2,1 y β -2,6, siendo el primero el más abundante. Debido a la presencia de neoserie de inulina, la molécula de los fructanos de agave muestra una proporción glucosa/fructosa de 1:15 unidades (Mellado-Mojica y López, 2012; López y Urías-Silvas 2007; López y col., 2003). Los fructanos de agave poseen bajo peso molecular que oscila entre 527 y 4,739 Da. Su grado de polimerización depende de la edad de las plantas, a los 2 años exhiben un grado de polimerización de 3 a 6, a los 4 años se alcanza el máximo grado de polimerización que es de 3 a 30 y a los 6 años el grado de polimerización es de 4 a 24 unidades de monosacáridos. De esta manera, las plantas más jóvenes presentan mayor potencial como prebiótico debido al bajo peso molecular (Arrizon y col., 2010; Mancilla-Margalli y López, 2006; López y col., 2003).

La solubilidad en medio acuoso de los fructanos de agave está determinada por las características estructurales; los fructanos lineales resultan los menos solubles,

mientras que los más ramificados son los de mayor grado de solubilidad (López y Urías-Silvas, 2007; Mancilla-Margalli y López 2006). El grado de polimerización y por ende el peso molecular, son factores importantes de la solubilidad en agua de los fructanos de agave, a medida que aumenta el grado de polimerización y con ello el peso molecular, la solubilidad va disminuyendo gradualmente (Castellanos-Pérez y col., 2012).

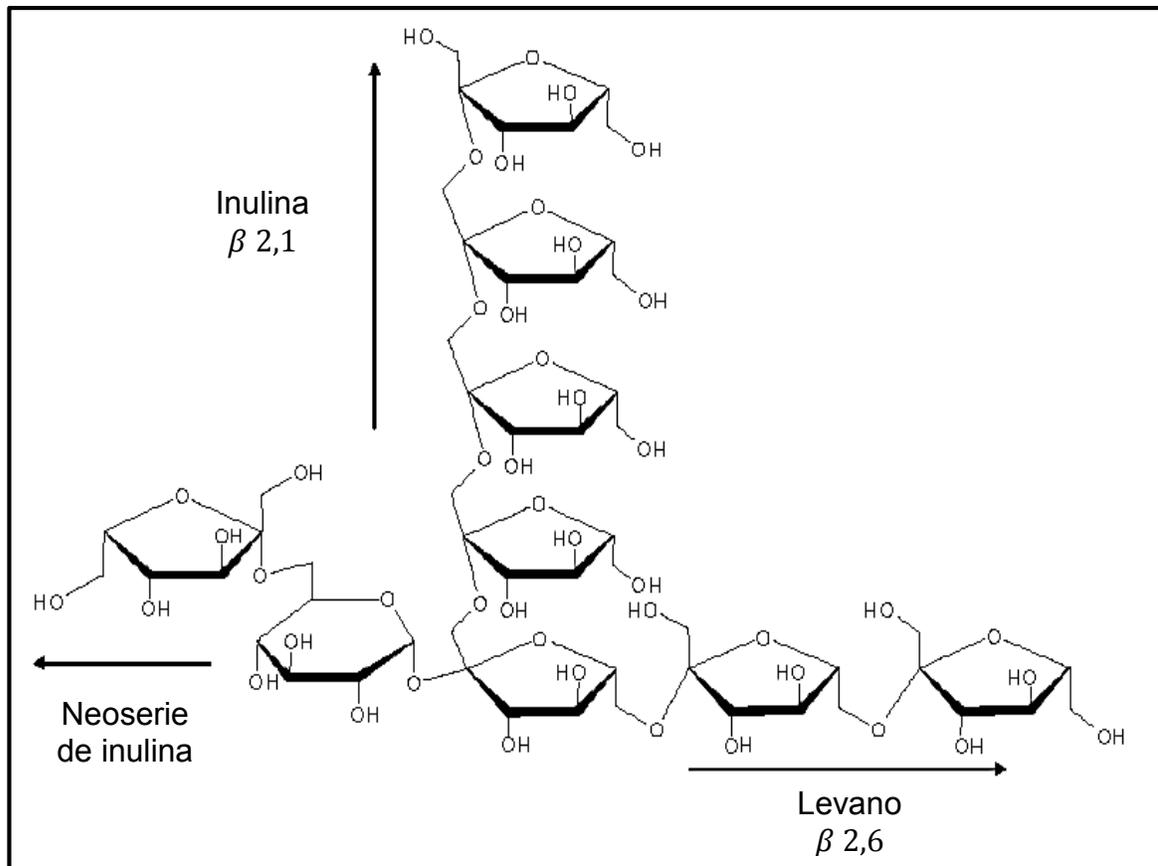


Figura 2. Estructura química de los fructanos de agave (adaptado de López y col., 2003).

Así mismo, Espinosa-Andrews y Urías-Silvas (2012), reportaron que los fructanos de agave mostraron una mayor capacidad de absorción de agua en comparación con los fructanos de achicoria, ya que las cadenas ramificadas y la presencia de restos de fructosa contienen una mayor cantidad de grupos hidroxilos disponibles para retener el agua.

El estudio de las propiedades reológicas de los fructanos de agave es escaso, Ponce y col. (2008), reportaron que las disoluciones acuosas de fructanos de agave en concentraciones menores al 30% en peso exhiben una baja viscosidad similar a la del agua en un intervalo de temperatura de 30 y 60 °C, pero cuando la concentración es mayor del 70% en peso, la disolución mostró mayor viscosidad que hizo difícil la manipulación de la muestra. Las disoluciones concentradas de 5 a 70% presentaron un comportamiento newtoniano, mientras que las disoluciones al 80 y 90% fueron fluidificantes a la cizalla.

Actualmente la incorporación de fructanos de agave en diferentes tipos de alimentos es limitado, sin embargo, Crispín-Isidro y col., (2014) realizaron un estudio en donde evaluaron el efecto de la adición de fructanos de agave y de achicoria en un yogurt batido bajo en grasa sobre la reología, la microestructura, y la aceptabilidad sensorial. Los resultados microestructurales y reológicos indicaron que los fructanos de agave participaron como un ingrediente activo en la red de caseína mediante el depósito en las micelas de caseína, mientras que la inulina formó partículas gelificadas al exterior de los agregados de proteína. Por lo tanto, la adición de ambos polisacáridos contribuyó a formar arreglos estructurales en el yogurt bajo en grasa que respondieron mecánicamente de una manera similar que el yogurt normal.

1.2. Glucomanano de konjac

El glucomanano de konjac es un polisacárido de elevado peso molecular (10^5 - 10^6 Da) que se extrae del tubérculo de la planta perenne *Amorphophallus konjac* K.Koch perteneciente a la familia *Araceae*, conocida comúnmente como konjac (Li y Xie, 2003; Nishinari, 2000; Takigami, 2000). Aunque su origen geográfico no se conoce con certeza, se trata de una planta proveniente del este de Asia (Takigami, 2000).

En la Figura 3 se encuentra esquematizado el proceso de extracción del glucomanano de konjac, el cual se compone de ocho etapas, siendo el lavado uno de las más importantes ya que durante esta etapa se eliminan impurezas para mejorar la calidad de la harina (Takigami y Phillips, 1995).

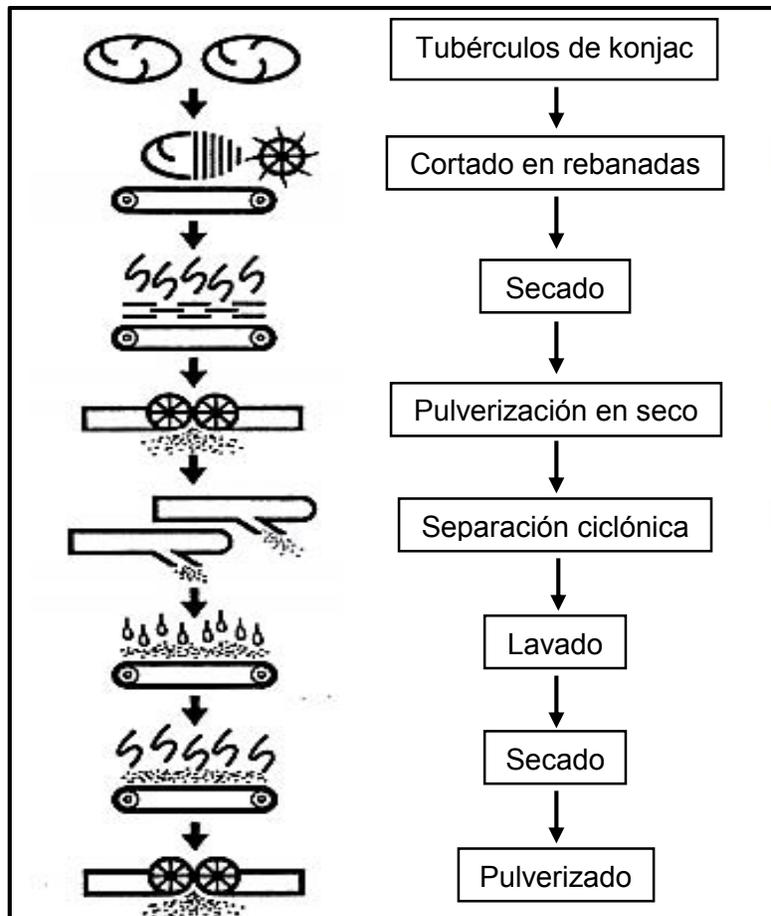


Figura 3. Proceso de extracción de glucomanano de konjac (adaptado de Álvarez-Manceñido, 2007).

La complejidad de este proceso depende de la disposición de las células que contienen el glucomanano de konjac, ya que dichas células se encuentran rodeadas por otras que contienen almidón y están cubiertas por una formación escamosa (Takigami y Phillips, 1995). El rendimiento global del proceso de obtención del glucomanano de konjac es, aproximadamente, del 8 al 12% del peso de tubérculo fresco. La harina refinada contiene un 52-72% de glucomanano, mientras que en las harinas purificadas el contenido de glucomanano puede superar el 90% (Fang y Wu, 2004; Takigami, 2000). La calidad de la harina de glucomanano de konjac comercial se evalúa a través de parámetros como tamaño de partícula, capacidad espesante y presencia de impurezas (Takigami y Phillips, 1995).

El glucomanano de konjac (Figura 4) es un polisacárido que está compuesto por unidades de D-glucosa y D-manosa unidas aleatoriamente mediante enlaces glucosídicos β -1,4. La relación de glucosa y manosa es de 1:1,6 (Lin y col., 2010; Xu y col. 2009; Li y Xie, 2003). En la estructura de la molécula de glucomanano de konjac existen ramificaciones en la posición C₃ de la cadena principal de glucosa y manosa, unidas mediante enlaces β 1,3. Así mismo, la molécula cuenta con tres ramificaciones por cada 32 unidades de monosacáridos y un grupo acetilo por cada 17-19 residuos de hexosas, en la posición C₆ (Xu y col., 2009; Biliaderis e Izydorczyk, 2007; Katsuraya y col., 2003; Li y Xie, 2003).

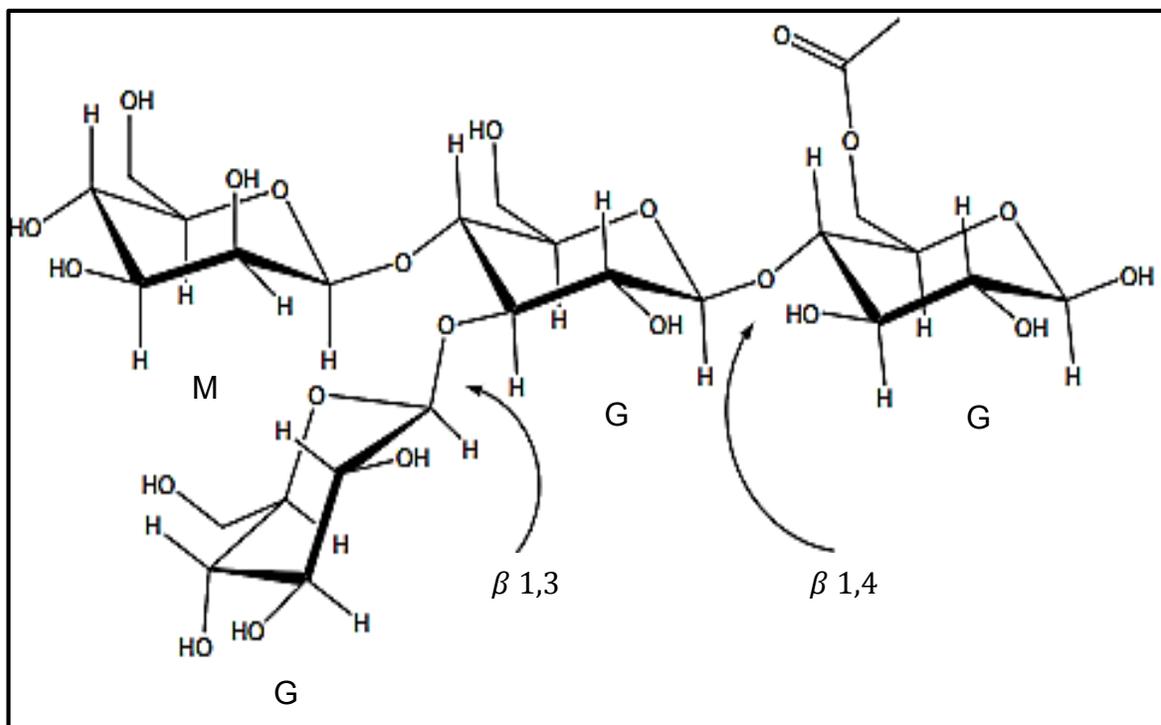


Figura 4. Estructura química del glucomanano de konjac (Maeda y col., 1980).

La solubilidad del glucomanano de konjac en medio acuoso está determinada por las características estructurales, a pesar de que la linealidad de la molécula dificulta la solvatación, las ramificaciones permiten la asociación intermolecular mejorando la solubilidad (Yoshimura y Nishinari, 1999). Otro factor importante son los grupos acetilo que presenta la molécula de glucomanano de konjac, en estudios realizados por Du y col. (2012) y Williams y col. (2000) se indica que la solubilidad del glucomanano de

konjac disminuyó con el aumento en el grado de desacetilación, demostrando que la solubilidad en agua depende de los grupos acetilo presentes en la estructura molecular.

El glucomanano de konjac presenta una notable capacidad de hinchamiento, de manera que es capaz de incrementar su volumen más de 200 veces formando disoluciones muy viscosas como consecuencia de la absorción de agua (Yoshimura y Nishinari, 1999). Dicha capacidad de absorción depende del grado de acetilación de las moléculas, de manera que pequeños incrementos en el grado de acetilación del glucomanano de konjac generan fuertes reducciones en la capacidad de absorción de agua, existiendo una relación tipo exponencial entre ambas variables (Koroskenyi y Mc Carthy, 2001). Con relación al efecto del pH, Wang y col., (2008), reportaron que la viscosidad en disoluciones de glucomanano de konjac concentradas al 0.1 y 0.3%, alcanzan el máximo cuando el pH es neutro.

En cuanto a las propiedades funcionales, el glucomanano de konjac por sí solo es capaz de generar cambios de viscosidad en un intervalo de concentraciones que van de centésimas a décimas, debido a esta característica el glucomanano de konjac da lugar a la formación de geles en donde la adición de agentes alcalinos, el peso molecular y el grado de desacetilación son factores condicionantes en el proceso de gelificación. Kohyama y Nishinari (1990) informaron que la presencia de NaOH, como agente alcalino provoca que el pH del medio aumente lo suficiente para que las disoluciones de glucomanano de konjac al 0.22% a 25 °C gelifiquen en un intervalo de pH de 11.03 a 12.06, así mismo, Yoshimura y Nishinari (1999), así como Luo y col. (2013), concluyeron que la adición de un agente alcalino en disoluciones de glucomanano de konjac promueve la velocidad de gelificación debido a los efectos de desacetilación, auto-agregación y entrelazamiento de las moléculas generados por los diferentes agentes alcalinos. En el primer caso, el aumento de la concentración de Na₂CO₃ provocó la disminución del tiempo de gelificación para disoluciones de glucomanano de konjac del 1 al 3%, por su parte, en el segundo estudio la adición de NaOH 0.25 M fue útil para acelerar la gelificación de disoluciones de glucomanano de konjac del 0.5 al 2.0%.

Por otro lado, al estudiar disoluciones de glucomanano de konjac de diferentes pesos moleculares (2.56×10^5 , 4.38×10^5 , 2.44×10^5 y 5.96×10^5 Da) en presencia de Na_2CO_3 1 M a 60°C , Nishinari (2000), puso de manifiesto que todo incremento en el peso molecular del glucomanano de konjac se acompaña de un aumento en el valor del módulo elástico (G'), ya que al aumentar la longitud, las cadenas tienen mayor probabilidad de unirse. Finalmente Du y col. (2012), investigaron el papel de los grupos acetilo durante la gelificación de glucomanano de konjac a 25°C , para ello se emplearon muestras con diferentes grados de desacetilación cuyos valores oscilan del 0 al 98%. Mediante el estudio se confirmó que el aumento en el grado de desacetilación de las moléculas favorece la gelificación, ya que durante el proceso de desacetilación se sustituyen los grupos acetilo por hidrógenos así que al hidratar las moléculas de glucomanano de konjac se forman puentes de hidrógeno que fortalecen las interacciones entre las cadenas moleculares provocando la formación de una estructura de red tridimensional característica de un gel.

Dentro de las investigaciones referentes a la caracterización de los parámetros reológicos del glucomanano de konjac en disoluciones acuosas, se encuentra el estudio realizado por Wang y col. (2008), quienes reportaron que la viscosidad a 25°C de disoluciones de glucomanano de konjac en concentraciones de 0.05 a 0.4% se reduce a medida que se incrementa la velocidad de cizalla, es decir las disoluciones presentan comportamiento fluidificante, el cual es más notable a medida que la concentración aumenta; además demostraron que la viscosidad del glucomanano de konjac disminuye bruscamente en condiciones ácidas y alcalinas, lo que indica que está influenciado por el valor de pH. Por su parte, Chao y col. (2012), encontraron que las disoluciones acuosas de glucomanano de konjac a 25°C se comportan como un material fluidificante a la cizalla que se ajusta a la Ley de la Potencia en el intervalo de concentraciones de 0.55 a 1.6%, mientras tanto, las disoluciones de 0.1 a 0.4% muestran características de fluidos newtonianos. En cambio, He y col. (2012), determinaron que la disolución a 25°C pasó de un comportamiento newtoniano a un fluido con comportamiento fluidificante como consecuencia del fuerte entrecruzamiento de las cadenas poliméricas, cuando la concentración superó el 0.15%. En concentraciones de 0.01 a 0.1% se observó comportamiento newtoniano

mientras que, en las disoluciones de 0.15 al 1.5% el modelo matemático que mejor ajustó fue la ecuación de la Ley de la Potencia. Con base en la información anteriormente presentada es posible determinar que el comportamiento al flujo de las disoluciones de glucomanano de konjac depende de la concentración, la naturaleza de los tubérculos, las condiciones de cultivo y los procesos de extracción y purificación empleados por los fabricantes (Takigami y Phillips, 1995).

La aplicación del glucomanano de konjac en la tecnología de alimentos aún es limitada, sin embargo, recientes estudios han demostrado que la adición de glucomanano de konjac en suspensiones de almidón de papa y maíz provoca una ligera disminución en la cantidad de agua disponible, lo cual interrumpe el proceso de gelatinización y retrogradación de la amilosa y la amilopectina (Schwartz y col. 2014; Khanna y Tester, 2006).

Por otro lado, Leuangsukrerk y col. (2014), proponen que las películas comestibles a base de glucomanano de konjac y proteínas de suero son una alternativa para productos alimenticios, en su investigación muestran que la incorporación de las proteínas de suero incrementa la transparencia. Así mismo, mejoran la flexibilidad de manera que las películas son más resistentes e insolubles en agua.

Los geles a base de glucomanano de konjac son una alternativa para utilizarlos como sustitutos de grasa en productos cárnicos ya que proporcionan características similares a la grasa, además cuando dicho gel forma parte de la matriz del producto, éste se mantiene estable durante procesos de congelación y descongelación (Jiménez-Colmenero y col., 2013).

1.3. Interacción biopolímero- biopolímero

La mezcla de biopolímeros involucra un proceso en el que uno o más biopolímeros experimentan una transición de un estado desordenado a uno ordenado o viceversa, es por ello que se utilizan comúnmente para mejorar las características reológicas e

impartir novedosas propiedades en los productos alimenticios mediante interacciones entre ellos (Phillips y Williams, 2000; Reginald, 1998).

La interacción biopolímero-biopolímero depende principalmente de las características de los biopolímeros involucrados (solubilidad, grupos funcionales, peso y estructura molecular), las fuerzas intermoleculares (puentes de hidrógeno), las características de la solución (pH, fuerza iónica) las condiciones ambientales (temperatura, presión) y las condiciones mecánicas (cizallamiento) (Semenova, 2007; McClements, 2006).

Con relación a la solubilidad, los factores que la determinan son el peso y la estructura molecular del biopolímero, el primero de ellos se relaciona con el grado de polimerización, en este caso, los polisacáridos con bajos grados de polimerización son más solubles en comparación de los polisacáridos con elevados grados de polimerización. Asimismo, los polisacáridos de conformaciones altamente regulares, es decir con estructura lineal, son esencialmente insolubles en medio acuoso, en cambio la irregularidad de la estructura molecular que se representa por medio de ramificaciones, impide la formación de una estructura muy compacta y permite una fácil hidratación (Doublier y Cuvelier, 2006; Wang y Cui, 2005; Phillips y Williams, 2000; Reginald, 1998). Dentro de las fuerzas intermoleculares, el enlace a partir de puentes de hidrógeno es la fuerza que principalmente contribuye a las interacciones entre polisacáridos debido a que éstos contienen un gran número de grupos hidroxilo, átomos de oxígeno, y otros grupos que pueden interactuar con las moléculas de agua a través de uniones tipo puente de hidrógeno, es por ello que las interacciones biopolímero-biopolímero, así como las interacciones de la cadena de biopolímero-agua ejercen una influencia particular sobre las propiedades funcionales porque mediante dichas interacciones se controla la movilidad de las moléculas en medio acuoso, lo cual contribuye al incremento de la viscosidad del sistema (Doublier y Cuvelier, 2006; McClements, 2006).

Las interacciones entre biopolímeros disueltos en medio acuoso pueden generar alguno de los comportamientos que se representan en la Figura 5, clasificándose en interacciones repulsivas que provocan la segregación de las macromoléculas debido

a la inestabilidad del sistema y las interacciones atractivas que son las responsables de la formación de complejos solubles o insolubles (de Kruif y Tuinier, 2001).

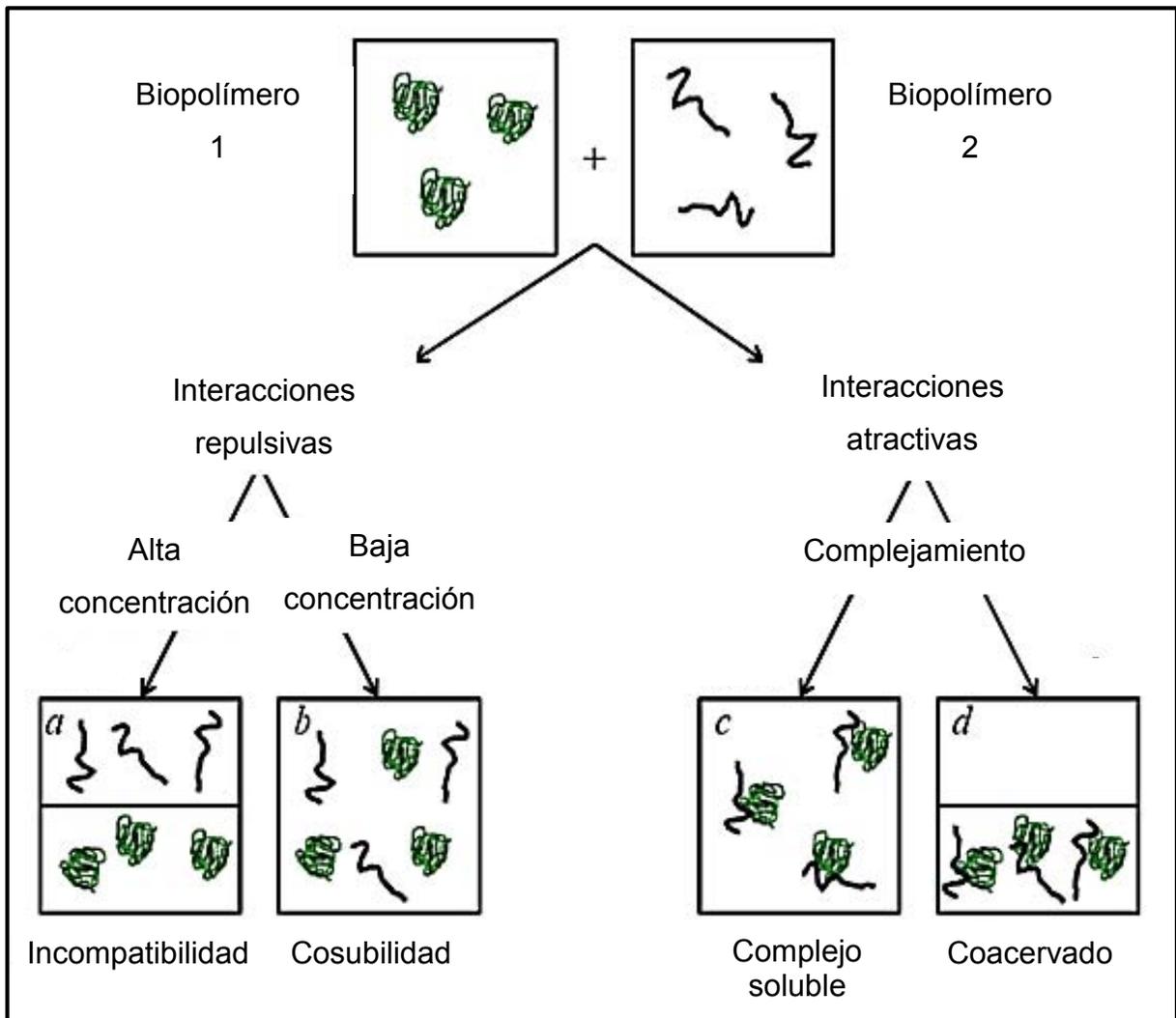


Figura 5. Interacción de dos biopolímeros en medio acuoso (adaptado de Rodríguez-Patiño y Pilosof, 2001; McClements, 2006; de Kruif y Tuinier, 2001).

En las interacciones repulsivas los biopolímeros se excluyen unos a otros, en el primer sistema (Figura 5a) la concentración de biopolímeros es alta por lo que el sistema se vuelve inestable provocando un fenómeno de segregación en donde los biopolímeros se definen como incompatibles porque predominan las fuerzas de repulsión entre ellos, por lo tanto, puede obtenerse un sistema de dos fases en el cual ambos componentes macromoleculares están concentrados en diferentes fases debido a la incompatibilidad

termodinámica de los biopolímeros en medio líquido, por su parte, cuando la disolución es diluida el sistema es estable (Figura 5b) debido al efecto predominante de la entropía de mezclado, de manera que los biopolímeros son cosolubles (McClements, 2006; de Kruif y Tuinier, 2001; Doublier y col., 2000; Grinberg y Tolstoguzov, 1997).

En las interacciones atractivas los biopolímeros se atraen unos a otros provocando la asociación entre las macromoléculas, en el primer sistema (Figura 5c) se presenta la formación de complejos solubles en una sola fase debido al efecto de solubilidad por complejamiento, por otro lado, en el segundo sistema (Figura 5d) se desarrolla un fenómeno denominado coacervación compleja que implica la formación de complejos insolubles (coacervados) a partir de dos macromoléculas y que se caracteriza por la separación del sistema en una fase que precipita porque contiene a los coacervados y una fase diluida, con baja concentración de ambos biopolímeros (McClements, 2006; de Kruif y col., 2004; de Kruif y Tuinier, 2001; Doublier y col., 2000).

La diferencia entre los sistemas líquidos de dos fases (Figura 5a) y (Figura 5d) reside en que en los distintos sistemas los biopolímeros son susceptibles a la separación de fases debido a la incompatibilidad termodinámica y a la coacervación compleja, respectivamente (McClements, 2006).

La incompatibilidad termodinámica se define como la separación espontánea del sistema en dos fases promoviendo la asociación entre las macromoléculas del mismo tipo, es decir, una fase es predominantemente rica del biopolímero 1 y la otra rica del biopolímero 2. La incompatibilidad de los biopolímeros depende de la intensidad de las interacciones entre ellos, entre las moléculas de cada una consigo mismas y con el disolvente, de manera que la presencia de una interacción repulsiva conduce a una alta probabilidad de exclusión que provoca la separación del sistema en dos fases. Los factores que afectan la incompatibilidad termodinámica es el aumento del peso molecular, la concentración de sales, la temperatura y la rigidez estructural ya que los polisacáridos lineales son más incompatibles que los ramificados además la incompatibilidad disminuye en el siguiente orden: polisacáridos con grupos carboxilo > polisacáridos neutros > polisacáridos con grupos sulfato (Doublier y col., 2000; Grinberg y Tolstoguzov, 1997; Semenova, 1996).

En el diagrama de fases para una mezcla incompatible de biopolímeros (Figura 6), la curva binodal marca el límite de cosolubilidad de los biopolímeros. Cuando la composición del sistema respecto a los dos biopolímeros se encuentra por debajo de la curva binodal, el sistema permanece como una fase simple homogénea (Figura 6b). En cambio, cuando la composición de un sistema se encuentra por encima de la curva binodal, es inestable y se separa en dos fases líquidas, una rica en biopolímero 1 y la otra en biopolímero 2 (Figura 6a). Al mezclar soluciones A y B en una proporción de volumen BC/AC, se obtiene una mezcla de composición C, este sistema mixto se separa en dos fases, D y E, de manera que los puntos D y E son los binodales, lo cual significa que los biopolímeros tienen limitada cosolubilidad en el disolvente y que cada uno se concentra en fases diferentes (Rodríguez-Patiño y Pilosof, 2011).

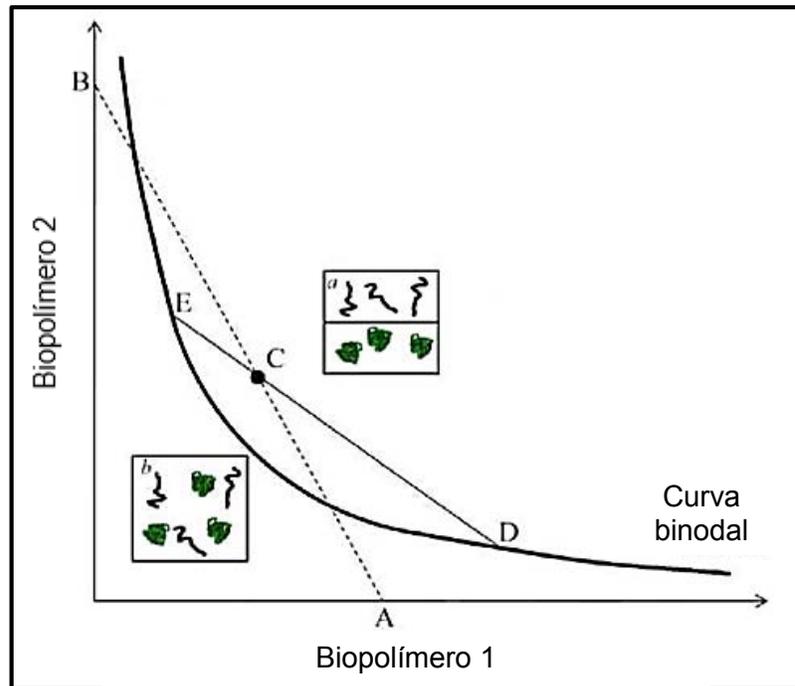


Figura 6. Diagrama de fases para una mezcla de biopolímeros incompatibles
a) Incompatibilidad en dos fases, b) Incompatibilidad en una fase (adaptado de Rodríguez-Patiño y Pilosof, 2011).

Por otro lado, la coacervación compleja es una separación espontánea de un sistema en dos fases líquidas, en donde la fase más concentrada en biopolímeros es el coacervado y la otra fase es la solución en equilibrio. La separación de la fase

asociativa de dos biopolímeros en agua ocurre si existe una fuerte atracción electrostática, de manera que la coacervación compleja es causada por la interacción de dos biopolímeros con cargas opuestas. Durante la formación de los complejos electrostáticos, se produce la disminución de la carga neta de uno de los biopolímeros por lo que se reduce la solubilidad del complejo, de manera que los complejos insolubles (coacervados) se agregan y precipitan. La formación de estos complejos es usualmente reversible, dependiendo de las condiciones del medio (de Kruif y col., 2004; de Kruif y Tuinier, 2001).

Generalmente los polisacáridos se utilizan en concentraciones que van desde 0.05% a aproximadamente 5%, pero las concentraciones de menos de 1% son típicas cuando se estudian las interacciones entre diferentes polisacáridos (Aguilera y Stanley, 1999).

Diversos estudios indican que el glucomanano de konjac es capaz de interactuar con otros polisacáridos provocando la aparición de efectos sinérgicos, tal es el caso de los estudios realizados por Fitzsimons y col. (2006), quienes han establecido que la combinación de goma xantana y glucomanano de konjac, ambos concentrados al 0.5% da lugar a la formación de un gel débil cuando la temperatura es de 20 °C, pero cuando la temperatura alcanza los 95 °C se forma un gel más fuerte en comparación de los obtenidos a bajas temperaturas, además la presencia de KCl en la mezcla se acompaña de un incremento en el módulo elástico (G') con respecto a la mezcla que no contenía sal. Por otro lado, Fitzpatrick y col. (2013) encontraron que la goma xantana nativa y desacetilada en mezcla con glucomanano de konjac forma geles termorreversibles que son más fuertes cuando los polisacáridos son disueltos en agua que en presencia de NaCl, sin embargo, en un intervalo de temperatura de 25 a 70 °C el gel con xantana nativa es menos elástico que el de xantana desacetilada. Los efectos sinérgicos encontrados entre el glucomanano de konjac y goma xantana son superiores a los encontrados entre xantana o algarrobo y otros polisacáridos similares al glucomanano de konjac (Williams y col., 1991).

La gelana es otro polisacárido con el que el glucomanano de konjac es capaz de interactuar sinérgicamente, ya que la mezcla en proporción 0.6/0.4 permite la formación de geles a bajas temperaturas (<30 °C), por el contrario, cuando los

polisacáridos están en forma individual concentrados al 0.8%, sólo presentan disoluciones diluidas (Miyoshi y col., 1997).

En estudios realizados por Penroj y col. (2005), se concluyó que el glucomanano de konjac y la κ -carragenina en concentraciones de 0.3 a 0.6%, mezclados en una proporción 1:1 a pH de 6, promueve la formación de geles y con el aumento en el grado de desacetilación del glucomanano de konjac se produce una interacción con κ -carragenina que permite la obtención de geles más elásticos.

1.4. Propiedades reológicas de biopolímeros

Los biopolímeros se definen como macromoléculas debido al gran tamaño que presentan en comparación con el tamaño de las moléculas de agua (Doublier y Cuvelier, 2006). Este término hace referencia a una gama de polisacáridos y proteínas que hoy en día son ampliamente utilizados en una variedad de sectores industriales para llevar a cabo una serie de funciones que incluyen el aumento de la viscosidad en sistemas acuosos y la estabilidad de espumas, emulsiones y suspensiones (Phillips y Williams, 2000).

El comportamiento reológico de los biopolímeros puede verse afectado por varios factores principalmente relacionados con las características moleculares y las interacciones de éstas con el disolvente. Además, otros parámetros como la temperatura, el volumen del disolvente y la concentración del biopolímero puede inducir una transición conformacional que modifica la resistencia hidrodinámica de la macromolécula a fluir (Lapasin y Pricl, 1995).

Para analizar la reología de los biopolímeros es necesario definir conceptos básicos de sus variables: esfuerzo de cizalla, deformación de cizalla, velocidad de cizalla, así como de la propiedad inherente a los sistemas fluidos que es la viscosidad. El esfuerzo (σ), es la cantidad matemática que representa a la fuerza externa aplicada por unidad de área requerida para producir una deformación en la estructura del material, siendo, igual a un vector de fuerza dividido entre el área de aplicación cuyo

valor se expresa en Pascales (Pa) (Rao, 1999). En un sistema de coordenadas cartesianas el esfuerzo puede escribirse como un tensor de nueve componentes (σ_{ij}), el primer subíndice se refiere a la orientación sobre la que actúa la fuerza y el segundo subíndice se refiere a la dirección de la fuerza (Steffe, 1996)

$$\sigma_{ij} = \begin{bmatrix} \sigma_{11} & \sigma_{12} & \sigma_{13} \\ \sigma_{21} & \sigma_{22} & \sigma_{23} \\ \sigma_{31} & \sigma_{32} & \sigma_{33} \end{bmatrix}$$

De los nueve componentes del esfuerzo, tres de ellos corresponden a los esfuerzos normales ($\sigma_{11}, \sigma_{22}, \sigma_{33}$) que son igual a cero para fluidos newtonianos y pueden tener magnitudes importantes para algunos alimentos, mientras tanto, los seis esfuerzos restantes son tangenciales ($\sigma_{12} = \sigma_{21}, \sigma_{31} = \sigma_{13}, \sigma_{32} = \sigma_{23}$) (Steffe, 1996).

Dependiendo de la aplicación de la fuerza el esfuerzo puede ser de tensión, de compresión o de cizalla, en consecuencia, la deformación (γ) producida puede ser de distintos tipos:

- a. La deformación lineal (Figura 7) se origina a partir de un esfuerzo de compresión o de tensión, donde el material se deforma en una sola dirección. Considerando una barra rectangular que debido a una fuerza es ligeramente alargada, la deformación se representa por medio de la Ecuación 1:

$$\gamma = \frac{\delta L}{L_0} \quad (1)$$

donde: L_0 es la longitud inicial de la barra y δL es el incremento de la longitud.

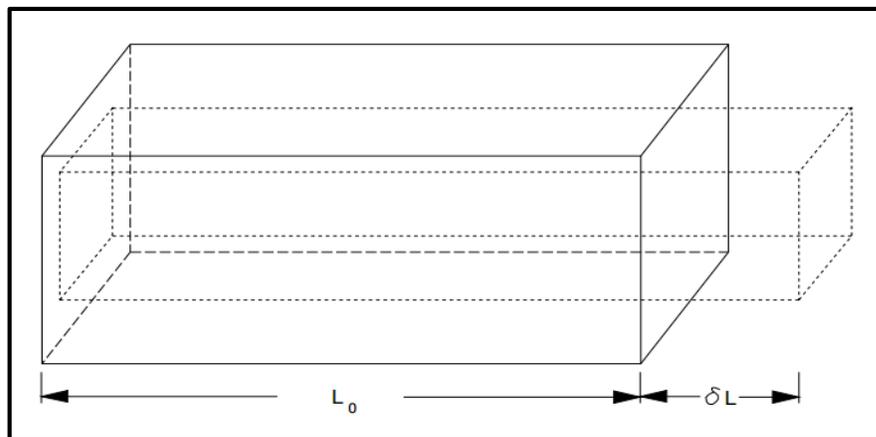


Figura 7. Deformación lineal en materiales fluidos (Steffe, 1996).

- b. La deformación bajo cizalla (Figura 8) se origina a partir de la tangente del cambio angular, este tipo de deformación perpendicular en una barra rectangular se representa por medio de la Ecuación 2:

$$\gamma = \frac{\delta L}{h} \quad (2)$$

donde: h es el espesor de una barra y δL es el desplazamiento de la superficie superior.

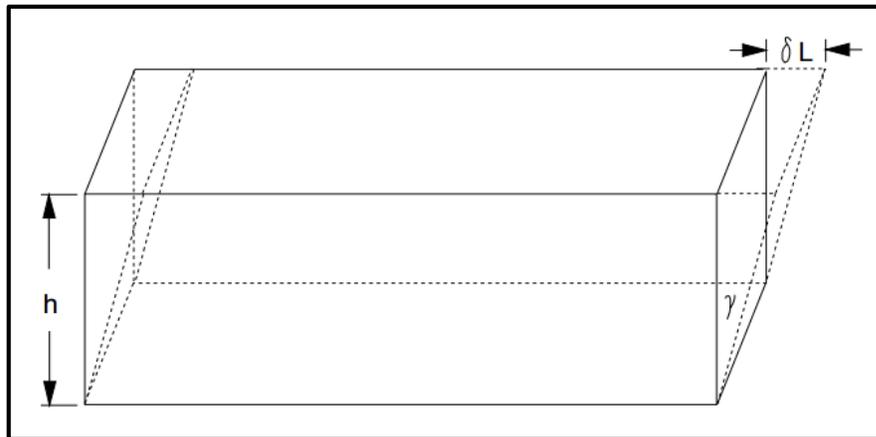


Figura 8. Deformación bajo cizalla en materiales fluidos (Steffe, 1996).

En el caso de los materiales fluidos, se utiliza la variación de la deformación con respecto al tiempo, denominada velocidad de deformación, la cual en una prueba bajo cizalla, se define como la velocidad de cizalla ($\dot{\gamma}$), que corresponde al gradiente de velocidad establecido en un fluido como resultado de la aplicación de un esfuerzo de cizalla, esta medida se expresa en segundos recíprocos (s^{-1}) (Rao, 1999).

Si un material fluido es sometido a un cizallamiento continuo a una velocidad constante, éste experimenta un comportamiento viscoso, que ocurre cuando un fluido se encuentra al interior de dos placas paralelas separadas por una distancia (h) entre ellas (Figura 9). La placa inferior permanece inmóvil a una velocidad cero, mientras que la placa superior se mueve en dirección paralela a una velocidad constante (v) debido a la aplicación de una fuerza (F), esta condición provoca un gradiente de

velocidad (Δv) como resultado de la fricción interna entre las capas, que tiene su origen en las fuerzas viscosas del fluido (Steffe, 1996).

La velocidad de cizalla se representa matemáticamente por medio de la Ecuación 3:

$$\dot{\gamma} = \frac{d\gamma}{dt} = \frac{d}{dt} \left(\frac{\delta L}{h} \right) = \frac{\Delta v}{\Delta h} \quad (3)$$

donde, δL representa el cambio de posición, h es la distancia entre las placas y t es un intervalo de tiempo en el que se deforma.

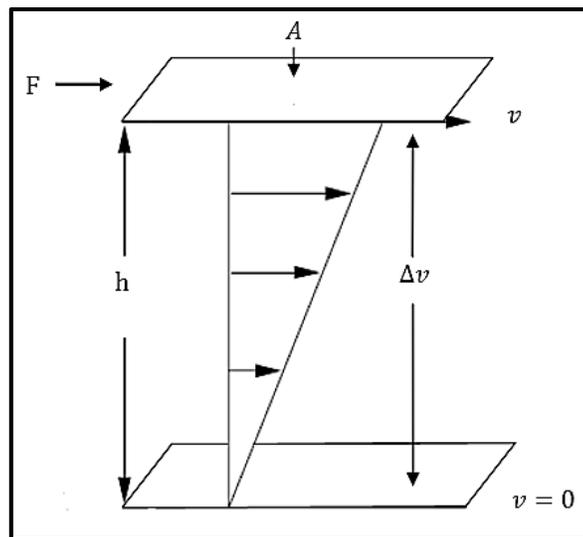


Figura 9. Gradiente de velocidad entre dos placas paralelas (Steffe, 1996).

De la relación entre el esfuerzo de cizalla y la velocidad de cizalla se determina la viscosidad (η), la cual representa la resistencia que opone un material fluido a fluir, cuyo valor se expresa en Pascal segundo ($\text{Pa} \cdot \text{s}$) (Lapasin y Pricl, 1995). Cabe señalar que a partir de la viscosidad se genera información relacionada con la estructura del biopolímero, las interacciones entre las macromoléculas y el peso molecular (Doublier y Cuvelier, 2006; Aguilera y Stanley, 1999).

En cuanto al comportamiento reológico se puede distinguir entre fluidos newtonianos y no newtonianos. En general los fluidos newtonianos son aquellos fluidos compuestos por moléculas simples de bajo peso molecular, con un comportamiento puramente

viscoso que puede ser descrito por la Ley de Newton donde el esfuerzo de cizalla es directamente proporcional a la velocidad de cizalla. Sin embargo, existen una serie de fluidos cuyo comportamiento no se ajusta al de un fluido newtoniano, al menos en un cierto intervalo de esfuerzos. Los fluidos no newtonianos suelen ser sistemas dispersos (emulsiones, suspensiones, soles de partículas, entre otros), o soluciones de macromoléculas (fluidos biológicos) los cuales presentan cierto grado de estructuración (Doublier y Cuvelier, 2006).

Normalmente, las disoluciones de biopolímeros exhiben un comportamiento newtoniano a concentraciones muy por debajo de la viscosidad crítica (C^*), es decir, su viscosidad es independiente de la velocidad de cizalla. Sin embargo, por encima de la C^* , por lo general no se observa un comportamiento newtoniano, sino un perfil caracterizado por tres distintas zonas, en el primer segmento (Figura 10a) se representa la región de bajas velocidades de cizalla, en donde se distinguen dos casos, si la concentración de la fase dispersa es alta las fuerzas estructurales predominan y la interacción entre las partículas genera un esfuerzo aparente, σ_0 , ya que la viscosidad tiende al infinito, en cambio para bajas concentraciones de la fase dispersa la viscosidad es independiente de la velocidad de cizalla. Por su parte, en el segundo segmento (Figura 10b) la velocidad de cizalla se incrementa por encima de un valor crítico, de manera que las fuerzas hidrodinámicas prevalecen sobre las fuerzas de movimiento browniano y estructurales, por lo que las partículas o aglomerados son deformados así que se pierde resistencia al flujo y con ello la viscosidad disminuye hasta que se alcanza una estructura de equilibrio. Finalmente, en el tercer segmento (Figura 10c) la velocidad de cizalla se incrementa hasta un segundo valor crítico en donde nuevamente se presentan dos casos diferentes, en el primero pueden aparecer inestabilidades en el sistema ya que las redes macromoleculares totalmente alineadas pueden romperse debido a la cizalla y causar una disminución adicional en la viscosidad, en el segundo caso, las altas velocidades generan el aumento de la dispersión favoreciendo las interacciones polisacárido-polisacárido o cambios en la estructura del polisacárido que dan lugar al incremento neto de la viscosidad (Phillips y Williams, 2000; Aguilera y Stanley, 1999; Windhab, 1995).

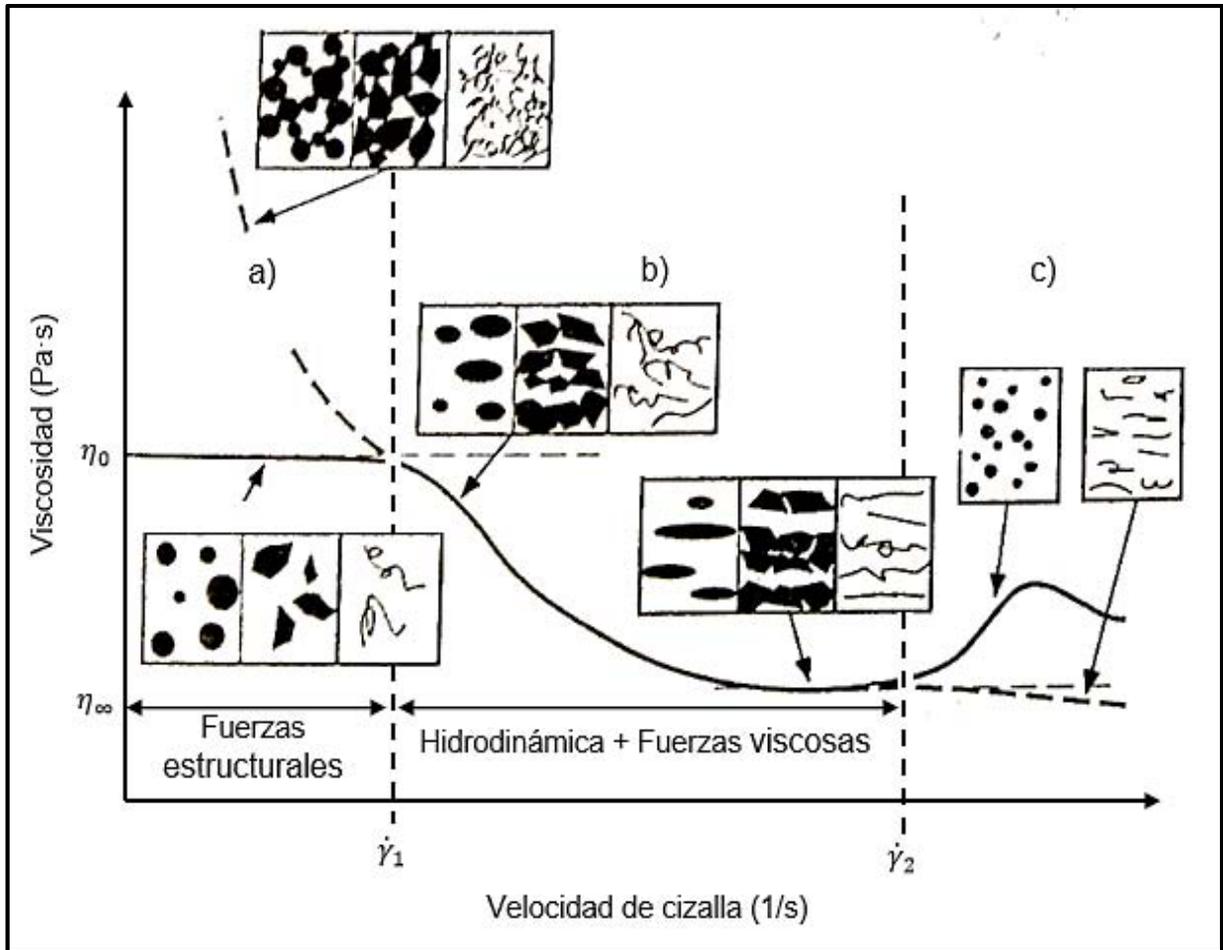


Figura 10. Comportamiento reológico y su relación con la estructura (Windhab, 1995).

Debido a la variabilidad de las disoluciones de biopolímeros se han desarrollado diversos modelos matemáticos (Cuadro 1) para describir las características de flujo, las cuales son herramientas apropiadas para el estudio de las propiedades funcionales de los polisacáridos, ya que permiten caracterizar las propiedades generales del sistema (Phillips y Williams, 2000).

En el modelo Ostwald-de Waele o Ley de la Potencia, k , es el índice de consistencia (Pa s^n) y n es el índice de comportamiento al flujo. Si $n < 1$ el material es fluidificante, y la viscosidad del mismo disminuye con el aumento de la velocidad de cizalla. En cambio si $n > 1$ el fluido es espesante y su viscosidad aumenta al aumentar la velocidad de cizalla. Para el modelo de Bingham, η_{plas} representa la viscosidad

plástica y σ_0 es un esfuerzo de cizalla inicial para empezar a fluir denominado esfuerzo de cedencia, una vez que el fluido comienza a fluir se comporta como un fluido newtoniano. De igual manera, el modelo Herschel-Bulkley, presenta un esfuerzo de cedencia, σ_0 , por debajo de este esfuerzo se comporta como un sólido y una vez iniciado el flujo presenta un comportamiento tipo potencia (Steffe, 1996; Lapasin y Pricl, 1995).

Por su parte, los modelos de Carreau y de Cross se utilizan para representar a un fluido estructural que se comporta de forma fluidificante a velocidades de cizalla intermedias, y de manera newtoniana a bajas y altas velocidades de cizalla. En ambos modelos η_0 y η_∞ representan la viscosidad a la velocidad de cizallamiento cero e infinito respectivamente, sin embargo, cuando $\eta \ll \eta_0$ y $\eta \gg \eta_\infty$ se obtiene el modelo de Ostwald-de Waele a partir de una serie de simplificaciones. Por su parte, λ es una constante de tiempo asociada con la ruptura de las interacciones moleculares consecuencia de la aplicación de la cizalla y m es una constante de velocidad adimensional que indica el grado de dependencia de la viscosidad sobre la velocidad de cizallamiento en la región fluidificante. Si el valor de m tiende a cero describe fluidos newtonianos en cambio si m que tiende a la unidad el material es fluidificante (Lapasin y Pricl, 1995; Cross, 1964).

Cuadro 1. Modelos matemáticos de ajuste para diferentes comportamientos reológicos en materiales fluidos.

Modelo	Ecuación
Ostwald-de Waele	$\sigma = k \dot{\gamma}^n$
Bingham	$\sigma = \sigma_0 + \eta_{\text{plas}} \dot{\gamma}$
Herschel-Bulkley	$\sigma = \sigma_0 + k \dot{\gamma}$
Carreau	$\eta = \eta_\infty + \frac{(\eta_0 - \eta_\infty)}{[1 + (\lambda \dot{\gamma})^2]^m}$
Cross	$\eta = \eta_\infty + \frac{\eta_0 - \eta_\infty}{1 + \lambda \dot{\gamma}^m}$

(adaptado de Steffe, 1996; Lapasin y Pricl, 1995).

II. Metodología

2.1. Objetivos

2.1.1. Objetivo general

Evaluar el efecto de diferentes concentraciones de fructanos de agave y glucomanano de konjac en disolución acuosa mediante pruebas de pH, densidad y comportamiento al flujo, de los sistemas individuales y en mezcla, estableciendo un punto de partida para su aplicación en sistemas dispersos alimenticios.

2.1.2. Objetivos particulares

- Determinar el pH y la densidad de disoluciones acuosas de fructanos de agave a diferentes concentraciones, solo y en mezcla con glucomanano de konjac, como pruebas de control de las muestras.
- Determinar las propiedades de flujo de disoluciones acuosas de fructanos de agave a diferentes concentraciones, solo y en mezcla con glucomanano de konjac, estableciendo el modelo reológico que mejor describa a los sistemas.

2.2. Materiales

Se utilizaron fructanos de agave (Ingredion México S.A de C.V., lote 4VMD28), glucomanano de konjac (Alfadelta S.A. de C.V., lote 1304114) y agua purificada (e-pura, grupo Pepsico, México). De ambos polisacáridos se determinó la humedad y se obtuvo un valor de 4.91 ± 0.02 para los fructanos de agave y 8.23 ± 0.03 para el glucomanano de konjac.

2.3. Métodos

2.3.1. Preparación de las muestras

Las disoluciones acuosas fueron elaboradas a diferentes concentraciones, en el caso de los fructanos de agave se prepararon al 10, 15, 20, 25 y 30% p/p, mientras que las

disoluciones de glucomanano de konjac fueron al 0.10, 0.25 y 0.50% p/p, ambos en base seca. En el caso de las mezclas, las combinaciones se muestran en el Cuadro 2.

Cuadro 2. Concentraciones de fructanos de agave y glucomanano de konjac empleadas en las diferentes combinaciones.

FA (%)	GK (%)
10	0.10
	0.25
	0.50
15	0.10
	0.25
	0.50
20	0.10
	0.25
	0.50
25	0.10
	0.25
	0.50
30	0.10
	0.25
	0.50

Las disoluciones de fructanos de agave y glucomanano de konjac se prepararon adicionando gradualmente la cantidad asignada de fructanos de agave o de glucomanano de konjac en agua purificada, utilizando un agitador de hélice con 3 palas (IKA RW 20 digital, Alemania), manteniendo una velocidad de agitación de 500 rpm durante 10 minutos, a 25 °C. Para asegurar la completa hidratación de las muestras se mantuvieron en reposo durante 24 h en refrigeración antes de realizar su análisis.

En las mezclas, primero se hidrató el glucomanano de konjac con la mitad del agua purificada, posteriormente se adicionó los fructanos de agave previamente hidratados con el resto de agua purificada, utilizando un agitador de hélice con 3 palas (IKA RW 20 digital, Alemania), a una velocidad de agitación de 500 rpm durante 10 minutos a 25 °C. Las mezclas se mantuvieron en reposo durante 24 h en refrigeración para permitir una hidratación completa de los polisacáridos antes de realizar su análisis.

2.3.2. Determinación de humedad

Para determinar la humedad de los polisacáridos se utilizó una termobalanza (Ohaus MB45, E.U.A.), la cual funciona sobre la base del principio termogravimétrico, en el que se mide la variación del peso de la muestra cuando se somete a un cambio de temperatura por medio de una unidad de luz halógena desecadora, en donde la humedad de la muestra se evapora continuamente (Ohaus, 2001).

La prueba se llevó a cabo mediante el perfil de medición rápido con el criterio de finalización cronometrada, A60, la temperatura de desecación fue de 100 ± 1 °C, se emplearon 5 g de fructanos de agave o de glucomanano de konjac, realizando 3 repeticiones para cada uno de los polisacáridos.

A los resultados en porcentaje de humedad de cada una de las repeticiones se calculó el promedio (\bar{x}) y la desviación estándar (s). Posteriormente el valor promedio de humedad se utilizó en el balance de materia para calcular la cantidad en base seca de cada uno de los polisacáridos y con ello preparar las disoluciones.

2.3.3. Determinación de pH

El pH de los sistemas se midió con un potenciómetro (Conductronic 120, E.U.A), el equipo utiliza como principio de funcionamiento el método electroquímico que mide el potencial generado a través de una membrana de vidrio que es sensible a la actividad de los iones de hidrógeno $[H^+]$. Este potencial es comparado con uno de referencia, que genera un potencial constante e independiente del pH, por lo tanto, la diferencia de potencial existente está relacionada con el pH de la disolución problema (Gillespie, 2004).

Antes de iniciar la prueba se calibró el instrumento utilizando las soluciones amortiguadoras de pH de 7.00 y de 4.01, se utilizó 30 ml de cada una de las disoluciones, la temperatura se mantuvo a 25 ± 1 °C y se realizaron 3 repeticiones por muestra. Al resultado de pH de cada una de las repeticiones se calculó el promedio (\bar{x}) y la desviación estándar (s).

2.3.4. Determinación de densidad

Para determinar la densidad de los sistemas se utilizó un densímetro DMA 500 (Anton Paar, Austria), el principio de funcionamiento del equipo se basa en la oscilación electromagnética inducida de un tubo de vidrio en U (Anton Paar, 2011).

Antes de iniciar la prueba se verificó que el equipo estuviera calibrado, para ello se midió la densidad del aire y después la del agua. Durante la prueba se llenó el tubo de vidrio en U con cada una de las disoluciones, la temperatura se mantuvo a 20 °C y se realizaron 6 repeticiones por muestra.

Se calculó el promedio (\bar{x}) y la desviación estándar (s) del resultado de densidad de cada una de las repeticiones, con el promedio de la densidad relativa se calculó la densidad absoluta de las dispersiones a 25 °C, multiplicándola por la densidad del agua a la misma temperatura.

2.3.5. Determinación del comportamiento al flujo

Se realizaron pruebas de flujo bajo cizalla rotacional empleando un reómetro MCR301 (Physica Anton Paar, Austria), con un dispositivo CP 75-1 (cono de 75 mm de diámetro y un ángulo de 1°). El principio de funcionamiento del instrumento se basa en la transferencia de cantidad de movimiento desde el cono que rota hacia la placa en la que está contenida la muestra. Se mide el torque del motor requerido para mover el cono y se transforma a esfuerzo de cizalla por una constante. La velocidad de rotación se transforma en velocidad de cizalla con la constante de proporcionalidad respectiva, que también depende de las dimensiones del cono que rota. La viscosidad, que es una medida de la resistencia a transferir cantidad de movimiento, se calcula a través del cociente del esfuerzo de cizalla entre la velocidad de cizalla (Martínez-Padilla, 2012).

El estudio consistió en un ciclo de ascenso-descenso de velocidad de cizalla con 25 puntos cada uno, y 10 s por punto, con un intervalo de velocidad de cizalla de 10 a 400 s⁻¹, para las disoluciones de fructanos de agave en medio acuoso; mientras que

en las disoluciones de glucomanano de konjac solas y en mezcla el intervalo de velocidad de cizalla fue de 1 a 1000 s⁻¹. La temperatura durante la prueba se mantuvo a 25 °C y se realizaron 3 repeticiones por muestra.

Se elaboró una curva de viscosidad (viscosidad en función de la velocidad de cizalla) utilizando los datos obtenidos por el software del equipo. Una vez elaborada la curva de viscosidad se estableció el modelo matemático que mejor se ajustó a la curva y se obtuvieron los parámetros reológicos correspondientes.

III. Resultados y discusión

3.1. Determinación de pH

En el Cuadro 3, se presenta el promedio de los valores de pH correspondiente a las disoluciones de fructanos de agave (FA) y glucomanano de konjac (GK) solos y en mezcla.

Cuadro 3. pH de las disoluciones de fructanos de agave y de glucomanano de konjac a diferentes concentraciones.

Disolución	pH
FA 10%	$6.01 \pm 4.47 \times 10^{-3}$
FA 15%	$6.00 \pm 5.48 \times 10^{-3}$
FA 20%	$6.01 \pm 4.47 \times 10^{-3}$
FA 25%	$6.01 \pm 8.37 \times 10^{-3}$
FA 30%	$6.01 \pm 5.48 \times 10^{-3}$
GK 0.10%	$6.27 \pm 7.07 \times 10^{-3}$
GK 0.25%	$6.26 \pm 8.37 \times 10^{-3}$
GK 0.50%	$6.27 \pm 8.37 \times 10^{-3}$
FA 10% - GK 0.10%	$6.05 \pm 1.00 \times 10^{-2}$
FA 15% - GK 0.10%	$6.04 \pm 1.52 \times 10^{-2}$
FA 20% - GK 0.10%	$6.05 \pm 1.14 \times 10^{-2}$
FA 25% - GK 0.10%	$6.06 \pm 4.47 \times 10^{-3}$
FA 30% - GK 0.10%	$6.05 \pm 8.94 \times 10^{-3}$
FA 10% - GK 0.25%	$6.07 \pm 8.37 \times 10^{-3}$
FA 15% - GK 0.25%	$6.08 \pm 1.34 \times 10^{-2}$
FA 20% - GK 0.25%	$6.08 \pm 7.07 \times 10^{-3}$
FA 25% - GK 0.25%	$6.07 \pm 8.37 \times 10^{-3}$
FA 30% - GK 0.25%	$6.07 \pm 1.30 \times 10^{-2}$
FA 10% - GK 0.50%	$6.10 \pm 5.48 \times 10^{-3}$
FA 15% - GK 0.50%	$6.09 \pm 1.14 \times 10^{-2}$
FA 20% - GK 0.50%	$6.09 \pm 7.07 \times 10^{-3}$
FA 25% - GK 0.50%	$6.10 \pm 8.94 \times 10^{-3}$
FA 30% - GK 0.50%	$6.10 \pm 4.47 \times 10^{-3}$

El pH promedio de las disoluciones de GK y FA se mantuvo en un intervalo de 6.00 a 6.27, de manera que la concentración de cualquiera de los polisacáridos no afectó el

valor de pH ya que se mantuvo prácticamente constante. En el caso de las disoluciones de FA en medio acuoso el pH fue de 6.00 a 6.01, mientras que en las disoluciones de GK en medio acuoso el valor del pH fue más cercano a la neutralidad debido a que se mantuvo en un intervalo de 6.26 a 6.27, finalmente el pH en las mezclas incrementó conforme la concentración de GK aumentó, dicho incremento fue del 0.66, 1.06 y 1.43% con respecto a los FA en medio acuoso, debido a que las disoluciones de GK son más cercanas a la neutralidad. Los resultados obtenidos para las disoluciones de GK en medio acuoso coinciden con los reportados por Wang y col. (2008), quienes determinaron que valores neutros de pH favorecen el aumento de la viscosidad en las disoluciones. Por su parte, los valores de pH registrados en las disoluciones de FA son similares a los reportados por Castellanos-Pérez y col. (2012) y Mancilla-Margalli y López, (2002), quienes confirman que el pH de los FA presenta una tendencia a la neutralidad. Las diferencias encontradas son consecuencia principalmente de la composición de los polisacáridos y del proceso de purificación, en el caso de los FA se ha encontrado que los ácidos orgánicos tales como el acético, propanoico, butanoico, pentanoico, hexanoico, heptanoico y varios más son responsables del valor de pH (Mancilla-Margalli y López, 2002).

3.2. Determinación de densidad

En el Cuadro 4, se presenta los valores de densidad relativa de las disoluciones de FA y GK solos y en mezcla.

La densidad es una propiedad que depende directamente de la masa, por ello al incrementar la concentración de cualquiera de los polisacáridos, los valores de la densidad también aumentaron. En el caso de las disoluciones de GK en medio acuoso la densidad relativa se mantuvo en un intervalo de 1.000 a 1.002, por su parte, la densidad relativa en las disoluciones FA en medio acuoso fue de 1.039 a 1.122, mientras que en las mezclas de FA y GK la densidad relativa se mantuvo en un intervalo de 1.042 a 1.133. Por estos valores es posible determinar que la densidad

promedio la define los FA, ya que la concentración de este polisacárido es mayor con respecto a la del GK.

Cuadro 4. Densidad relativa de las disoluciones de fructanos de agave y de glucomanano de konjac a diferentes concentraciones.

Disolución	ρ_{relativa}
FA 10%	1.039 ± 0.00
FA 15%	1.060 ± 0.05
FA 20%	1.080 ± 0.05
FA 25%	1.100 ± 0.05
FA 30%	1.122 ± 0.05
GK 0.10%	1.000 ± 0.05
GK 0.25%	1.001 ± 0.05
GK 0.50%	1.002 ± 0.05
FA 10% - GK 0.10%	1.042 ± 0.00
FA 15% - GK 0.10%	1.063 ± 0.05
FA 20% - GK 0.10%	1.085 ± 0.05
FA 25% - GK 0.10%	1.105 ± 0.00
FA 30% - GK 0.10%	1.126 ± 0.14
FA 10% - GK 0.25%	1.044 ± 0.05
FA 15% - GK 0.25%	1.066 ± 0.05
FA 20% - GK 0.25%	1.087 ± 0.09
FA 25% - GK 0.25%	1.109 ± 0.09
FA 30% - GK 0.25%	1.130 ± 0.11
FA 10% - GK 0.50%	1.045 ± 0.09
FA 15% - GK 0.50%	1.068 ± 0.13
FA 20% - GK 0.50%	1.090 ± 0.05
FA 25% - GK 0.50%	1.113 ± 0.05
FA 30% - GK 0.50%	1.133 ± 0.11

A partir de la Figura 11, es posible demostrar que la densidad promedio de las disoluciones de FA en medio acuoso presentó una tendencia similar para todo el intervalo de concentraciones estudiado con respecto a la densidad de las disoluciones de fructosa y glucosa reportados en Nordic Sugar (2015), debido a que las moléculas de FA están compuestas de glucosa y fructosa.

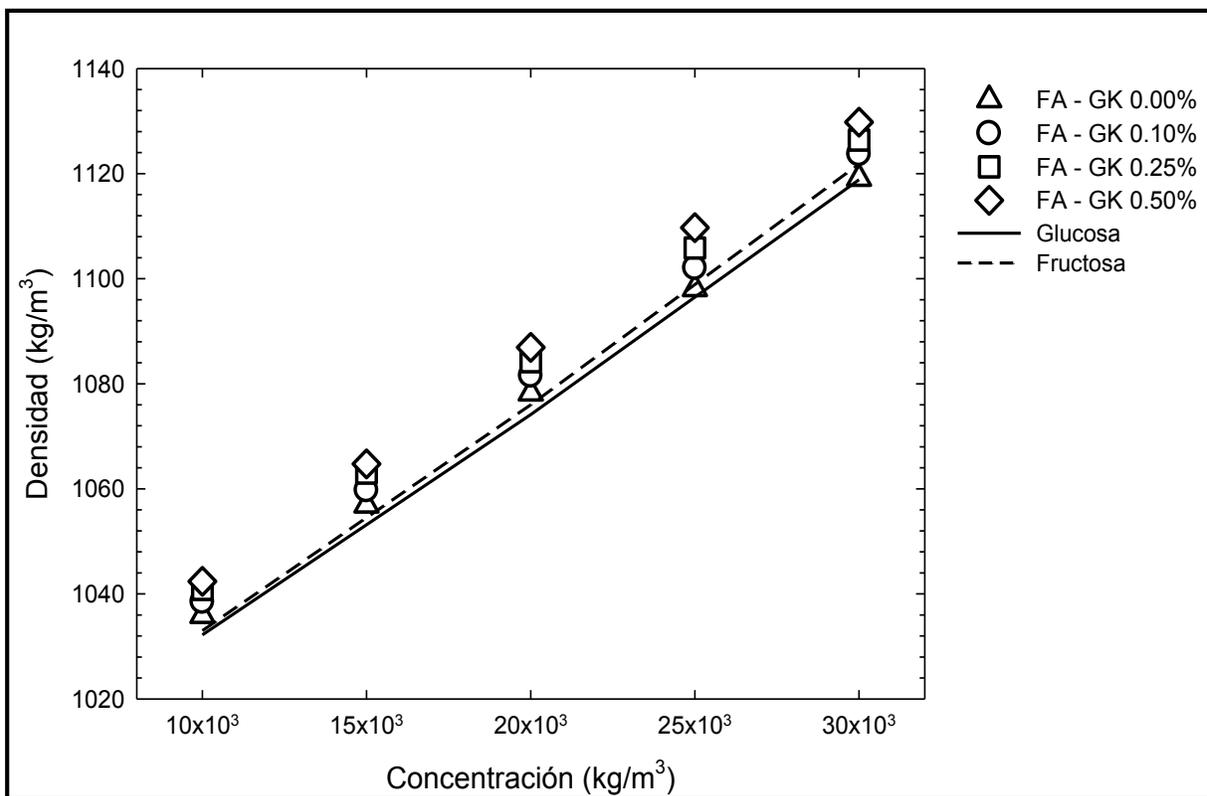


Figura 11. Densidad de las disoluciones de fructanos de agave en medio acuoso y en mezcla con glucomanano de konjac a 25 °C.

La densidad promedio de las disoluciones de FA en medio acuoso y en mezcla con GK, aumentó de forma proporcional a medida que la concentración de cualquiera de los polisacáridos se incrementó (Figura 11). Dicho comportamiento se describe mediante una relación lineal, cuyos parámetros se muestran en el Cuadro 5.

Cuadro 5. Parámetros de regresión lineal para las disoluciones de fructanos de agave en medio acuoso y en mezcla con glucomanano de konjac a diferentes concentraciones.

Disolución	m	b (kg/m³)	r ²
FA – GK 0.00%	4.13	994.59	0.9998
FA – GK 0.10%	4.21	996.62	0.9999
FA – GK 0.25%	4.30	998.15	0.9999
FA – GK 0.50%	4.39	998.81	0.9996

El valor de la pendiente (m) indica el incremento de la densidad cuando la concentración de FA aumenta, mientras que la ordenada al origen (b) es un término independiente expresado en kg/m^3 , que representa el valor de la densidad cuando la concentración de FA es cero. De acuerdo con el Cuadro 5, los valores m y b aumentaron a medida que la concentración de GK se incrementó.

3.3. Comportamiento al flujo

Fructanos de agave en medio acuoso

La Figura 12 presenta las curvas de viscosidad en función de la velocidad de cizalla de las disoluciones de FA al 10, 15, 20, 25 y 30%. En las disoluciones no existió dependencia con el tiempo de cizallamiento porque las curvas de ascenso-descenso

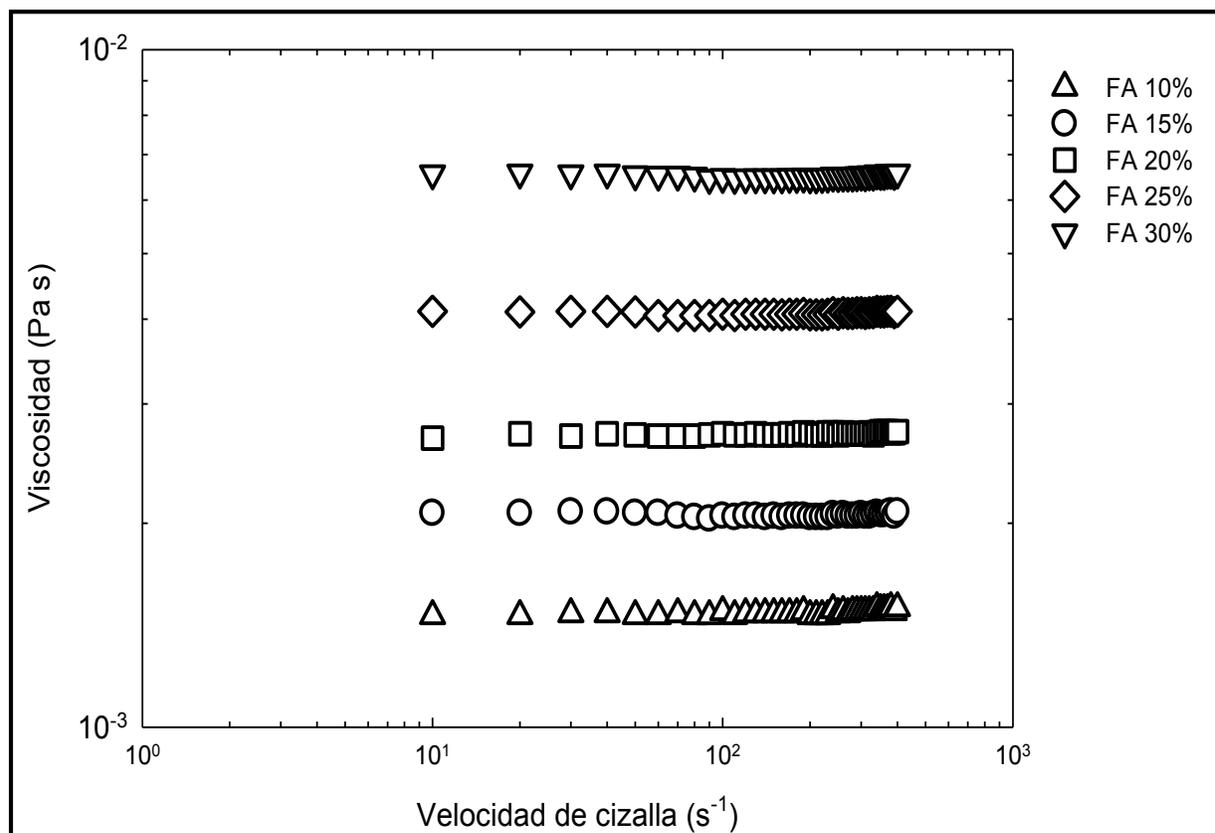


Figura 12. Viscosidad en función de la velocidad de cizalla a 25 °C para disoluciones de fructanos de agave solo en medio acuoso.

La viscosidad de las disoluciones se mantuvo constante para todo el intervalo de velocidad de cizalla estudiado, por lo tanto, los FA en medio acuoso mostraron un comportamiento newtoniano, cuyos valores de viscosidad se presentan en el Cuadro 6. Los resultados obtenidos en este estudio son similares a los reportados por Ponce y col. (2008), quienes determinaron que las disoluciones de FA se comportan como fluido newtoniano en concentraciones menores al 70%.

Cuadro 6. Viscosidad a partir del modelo Newtoniano para las disoluciones de fructanos de agave en medio acuoso.

Disolución	η (Pa · s)
FA 10%	$1.49 \times 10^{-3} \pm 8.50 \times 10^{-6}$
FA 15%	$2.05 \times 10^{-3} \pm 7.62 \times 10^{-6}$
FA 20%	$2.73 \times 10^{-3} \pm 2.32 \times 10^{-5}$
FA 25%	$4.07 \times 10^{-3} \pm 2.97 \times 10^{-5}$
FA 30%	$6.62 \times 10^{-3} \pm 1.38 \times 10^{-5}$

Los FA en disolución acuosa son sistemas que exhiben baja viscosidad, para 10% la viscosidad fue de 1.49×10^{-3} Pa·s y para 30% de 6.62×10^{-3} Pa·s, por estos valores se puede considerar que las moléculas de FA forman pequeños agregados para los cuales se ha reportado que poseen una estructura casi esférica (Dan y col., 2009), y debido al bajo peso molecular de los FA (Arrizon y col., 2010; Mancilla-Margalli y López, 2006) no adquieren un gran volumen hidrodinámico al hidratarse con el agua, de manera que la expansión de la molécula es limitada y en consecuencia, la viscosidad de las disoluciones de FA es baja en comparación a la de otros polisacáridos de mayor peso molecular como los galactomananos, los carragenatos, los derivados de la celulosa, las pectinas y los almidones modificados (Harding, 1997; 1995) .

En la Figura 13 se presenta la influencia de la concentración de FA sobre la viscosidad de las disoluciones de FA en medio acuoso.

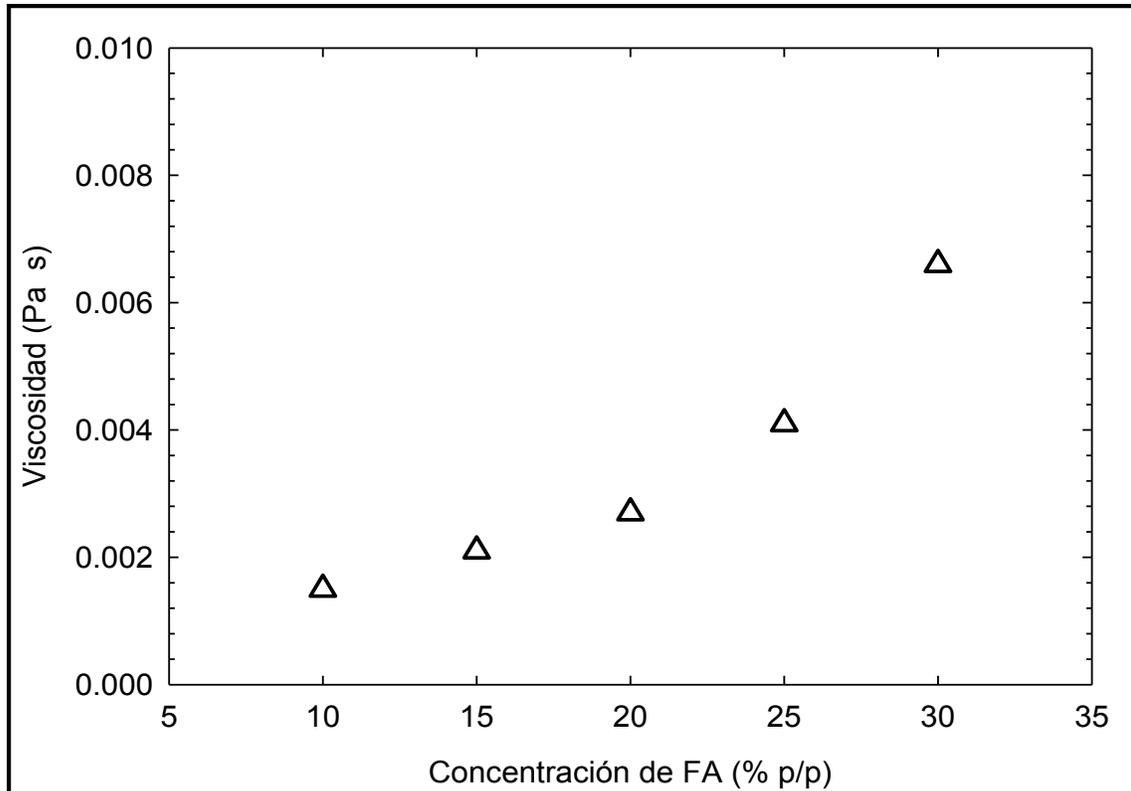


Figura 13. Viscosidad en función de la concentración de disoluciones de fructanos de agave a 25 °C en medio acuoso.

La dependencia de la viscosidad con respecto a la concentración de FA es lineal hasta 20%, a partir de 25% se observa un cambio de pendiente, lo que indica que la viscosidad del sistema aumenta más rápidamente cuando la concentración de FA es superior al 25%, de manera que las moléculas de FA son capaces de absorber y retener más agua provocando un incremento de la viscosidad a medida que la concentración de FA aumenta tal y como se reporta por López y Urías-Silvas (2007).

Glucomanano de konjac en medio acuoso

La Figura 14 presenta las curvas de viscosidad en función de la velocidad de cizalla de las disoluciones de GK al 0.10, 0.25 y 0.50%. Las disoluciones no presentaron dependencia con el tiempo de cizallamiento porque las curvas de ascenso-descenso coinciden mostrando el mismo comportamiento.

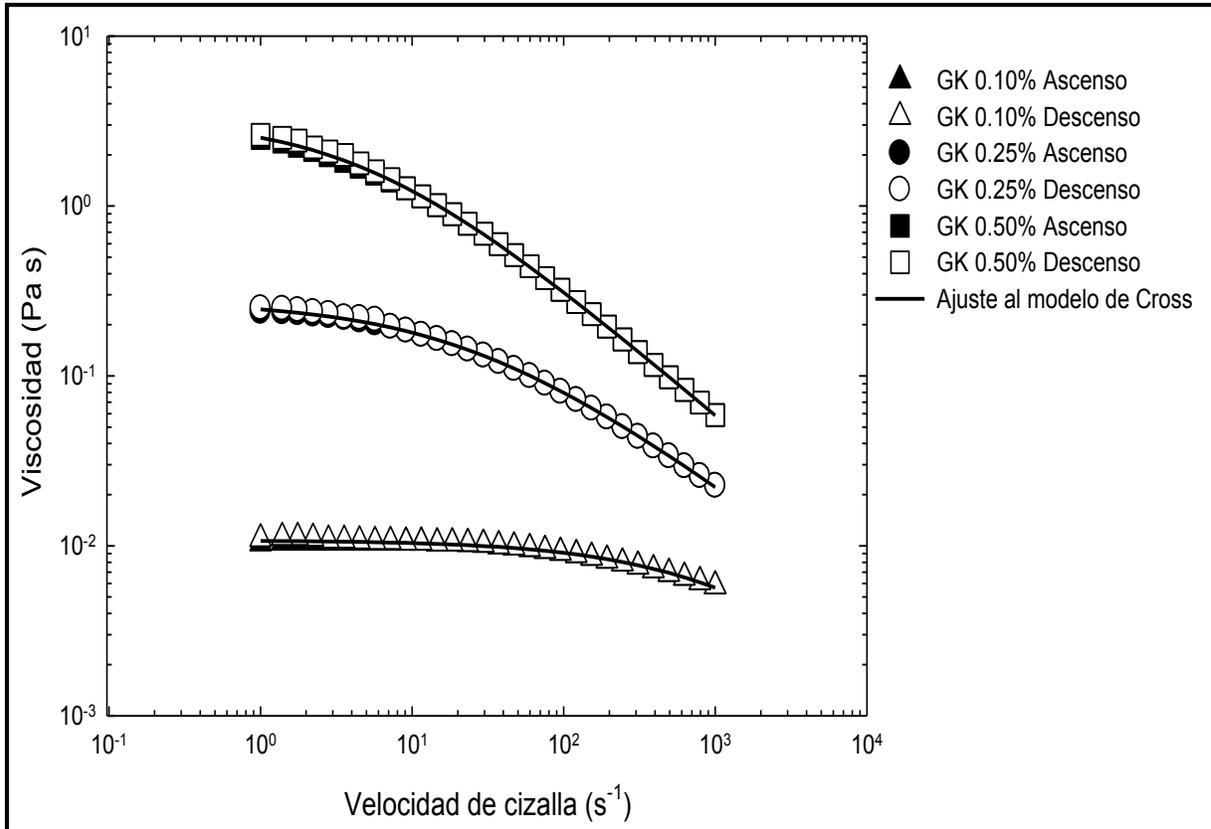


Figura 14. Viscosidad en función de la velocidad de cizalla a 25 °C para disoluciones de glucomanano de konjac al 0.10, 0.25 y 0.50% en medio acuoso.

La viscosidad de las disoluciones de GK disminuyó con respecto al incremento de la velocidad de cizalla por lo que presentaron un comportamiento claramente fluidificante, sin embargo, a bajas velocidades de cizalla existe una región en donde la viscosidad se mantuvo prácticamente constante. En esta región el número de interacciones formadas por las moléculas de GK están en equilibrio con la ruptura de las interacciones debido al efecto de la cizalla tal y como lo describe Álvarez-Manceñido y col. (2006) para disoluciones de GK concentradas de 0.25 al 0.50%. Por su parte, a altas velocidades de cizalla el comportamiento fluidificante fue más notable a medida que la concentración de GK aumentó, dicho comportamiento se debe a que las fuerzas hidrodinámicas prevalecieron sobre las fuerzas de movimiento browniano y las estructurales, por lo tanto las moléculas de GK fueron rotas, orientadas y deformadas hasta que la resistencia al flujo fue mínima y con ello la viscosidad disminuye como se

ha reportado para hidrocoloides de alto peso molecular (Phillips y Williams, 2000; Windhab, 1995).

Los resultados obtenidos en este estudio son similares a los reportados en disoluciones de GK en un intervalo de concentración de 0.25 a 0.50%, en donde se muestran características de materiales fluidificantes (Chao y col., 2012; He y col., 2012; Wang y col., 2008; Álvarez-Manceñido y col., 2006). Sin embargo, los resultados de Chao y col. (2012) y He y col. (2012), indicaron que la disolución de GK al 0.10% se comporta como un fluido newtoniano. Aunque los resultados obtenidos son similares con los autores para cierto intervalo de concentraciones, las diferencias en el comportamiento al flujo pueden ser derivadas de las características de la materia prima y del proceso de extracción y purificación realizado en la muestra de este estudio (Takigami y Phillips, 1995).

Debido a que la curva de viscosidad para las disoluciones de GK en medio acuoso está caracterizada por una región de viscosidad constante a bajas velocidades de cizalla y un comportamiento fluidificante para altas velocidades de cizalla (Figura 14), se utilizó el modelo de Cross (Ecuación 4), ya que describe mediante diferentes parámetros las propiedades de flujo presentadas por las disoluciones de GK y el comportamiento estructural asociado con la formación y ruptura de interacciones moleculares, consecuencia de la aplicación de la cizalla (Cross, 1996):

$$\eta = \eta_{\infty} + \frac{\eta_0 - \eta_{\infty}}{1 + \lambda \dot{\gamma}^m} \quad (4)$$

donde η es la viscosidad para cualquier valor de velocidad de cizalla expresada en $\text{Pa} \cdot \text{s}$, η_0 es la viscosidad a bajas velocidades de cizalla que se utiliza como la representación macroscópica de la naturaleza microestructural que indica las interacciones moleculares del polisacárido expresada en $\text{Pa} \cdot \text{s}$, η_{∞} es la viscosidad a altas velocidades de cizalla que se considera despreciable porque su valor tiende a cero, λ es una constante de tiempo asociada con la ruptura de las interacciones moleculares expresada en s y m es una constante de velocidad adimensional que indica el grado de dependencia de la viscosidad sobre la velocidad de cizalla en la

región fluidificante. Los valores de m que tienden a cero describen fluidos newtonianos mientras que los materiales fluidificantes tienen un valor de m que tiende a la unidad (Cross, 1964).

En el Cuadro 7 se presentan los parámetros reológicos derivados del modelo de Cross para las disoluciones de GK en medio acuoso.

Cuadro 7. Parámetros reológicos del modelo de Cross para las disoluciones de glucomanano de konjac en medio acuoso.

Disolución	η_0 (Pa · s)	λ (s)	m
GK 0.10%	$0.011 \pm 1.23 \times 10^{-4}$	$0.008 \pm 1.53 \times 10^{-4}$	$0.588 \pm 1.17 \times 10^{-3}$
GK 0.25%	$0.274 \pm 1.74 \times 10^{-3}$	$0.113 \pm 1.22 \times 10^{-3}$	$0.668 \pm 1.24 \times 10^{-3}$
GK 0.50%	$3.261 \pm 1.47 \times 10^{-3}$	$0.290 \pm 1.13 \times 10^{-3}$	$0.759 \pm 1.18 \times 10^{-3}$

Los valores de η_0 , así como las constantes λ y m aumentaron a medida que la concentración de GK incrementó. Por los valores registrados de η_0 se puede considerar que en la disolución de GK al 0.50% se estableció un mayor número de interacciones moleculares en comparación de las disoluciones de GK al 0.25 y 0.10%. Debido a que los valores de m son inferiores a la unidad pero mucho mayores del cero se confirmó que las disoluciones exhiben un comportamiento fluidificante acentuándose con el aumento en la concentración de GK. Así mismo, el coeficiente de determinación para todo el intervalo de concentraciones fue de 0.999 por lo que se considera cercano a la unidad, y con ello se demostró que el modelo de Cross presentó un buen ajuste a los datos experimentales. En estudios realizados por Álvarez-Manceñido y col. (2008, 2006), coincide que el modelo de Cross es el modelo que mejor se ajusta a las curvas de viscosidad para disoluciones de GK al 0.50% en un intervalo de velocidad de cizalla de 0.01 a 1000 s^{-1} sin embargo, estos resultados difieren de los publicados por Chao y col. (2012) y He y col. (2012), en donde el modelo Ostwald-de Waele es generalmente utilizado para describir el comportamiento de las disoluciones de GK de 0.25 a 0.50% en un intervalo de velocidad de cizalla de 0.01 a 200 s^{-1} .

Dado que las disoluciones de GK muestran un comportamiento estructural cuya explicación microscópica está relacionada con las interacciones y el ordenamiento de las moléculas debido a la aplicación de la cizalla, en la Figura 15 se presenta la influencia de la concentración de GK sobre la viscosidad del sistema acuoso a velocidad de cizalla aproximadamente de 1 y 1000 s⁻¹.

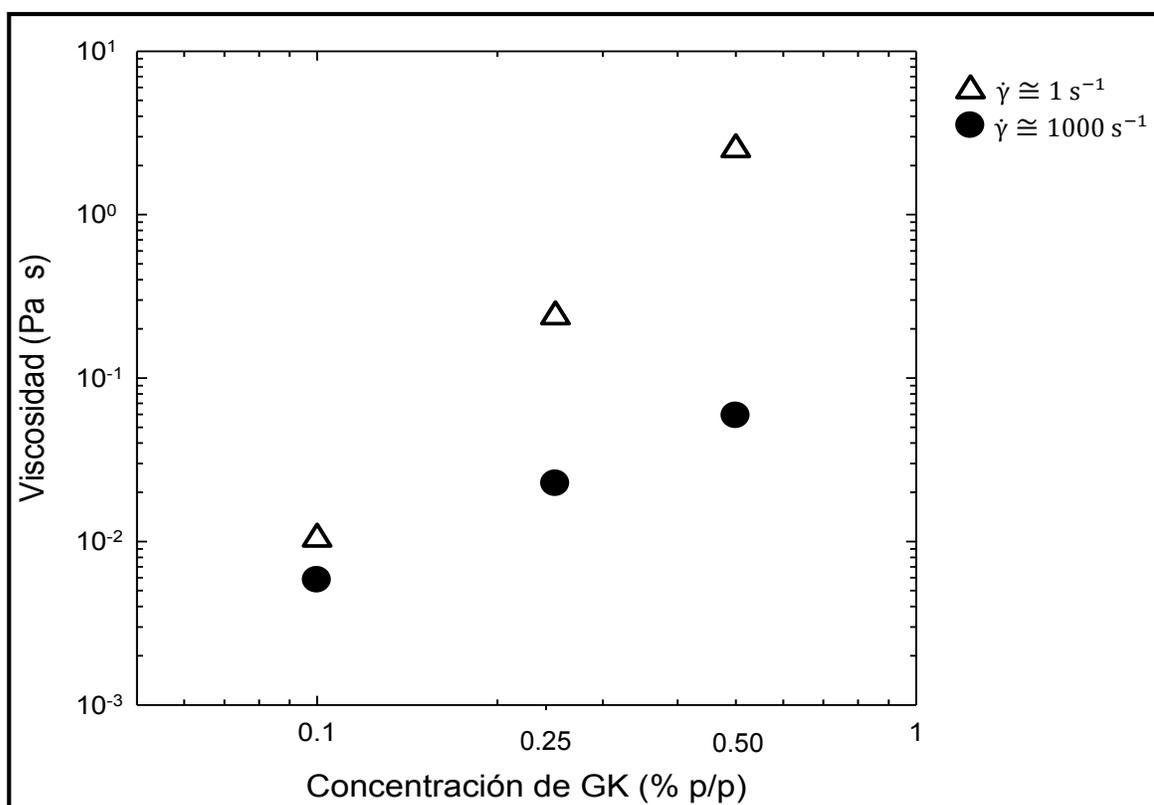


Figura 15. Viscosidad a una velocidad de cizalla aproximadamente de 1 y 1000 s⁻¹ en función de la concentración de disoluciones de glucomanano de konjac a 25 °C en medio acuoso.

La viscosidad de los sistemas de GK mantuvo un incremento proporcional con respecto a la concentración de GK (0.10 a 0.50 % p/p), independientemente de la velocidad de cizalla aplicada, de manera que mínimas variaciones en la concentración generaron importantes cambios en la viscosidad de las disoluciones, consecuencia de las fuertes interacciones de las moléculas de GK, tal y como ha sido reportado por He

y col. (2012) y Yoshimura y Nishinari (1999) para disoluciones de GK en un intervalo de concentraciones de 0.01 a 1.50%.

Los valores de viscosidad de las disoluciones a bajas velocidades de cizalla ($\cong 1 \text{ s}^{-1}$) fueron de 1.04×10^{-2} a $2.51 \text{ Pa}\cdot\text{s}$, mientras que a altas velocidades de cizalla ($\cong 1000 \text{ s}^{-1}$) se obtuvieron viscosidades en un intervalo de 5.8×10^{-3} a $5.89 \times 10^{-2} \text{ Pa}\cdot\text{s}$, obsérvese que la aplicación de altas velocidades de cizalla provocó que la viscosidad de las disoluciones de GK al 0.10, 0.25 y 0.50% disminuyera en un 1.79, 10.53 y 42.61% con respecto a la viscosidad de las disoluciones de GK a bajas velocidades de cizalla. Por estos valores se puede considerar que el empleo de altas velocidades de cizalla provocó que la ruptura de las interacciones superará la formación de nuevas interacciones entre las moleculares de GK, dando lugar a la separación y alineación de dichas cadenas moleculares hasta el descenso de la viscosidad (Beltrán y Marcilla, 2012; Álvarez-Manceñido y col., 2006).

En la Figura 16 se muestra de forma esquemática el comportamiento propuesto para las disoluciones de GK en medio acuoso en presencia de altas velocidades de cizalla.

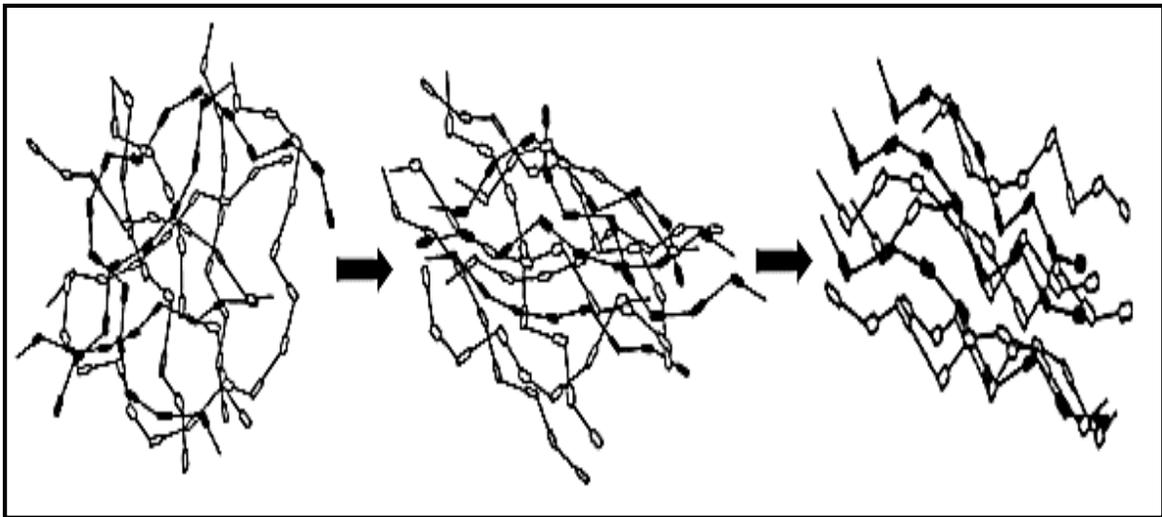


Figura 16. Comportamiento propuesto para las disoluciones de glucomanano de konjac solo en medio acuoso en presencia de altas velocidades de cizalla (adaptado de Beltrán y Marcilla, 2012).

Por su parte, a bajas velocidades de cizalla se propone que en la concentración de GK al 0.10%, las moléculas se mueven libremente de manera que las interacciones entre ellas son despreciables (Figura 17a), por lo tanto el volumen hidrodinámico, que se define como el volumen que ocupan las cadenas de GK en disolución, se contrae provocando que la viscosidad del sistema sea menor en comparación con la disolución de GK al 0.25% (Figura 17b), donde las colisiones entre las moléculas fueron más frecuentes, por lo que las interacciones entre las propias moléculas de GK así como con el agua generaron el incremento del volumen hidrodinámico y con ello mayor viscosidad para la disolución. Posteriormente cuando la concentración del GK fue de 0.50% (Figura 17c), las moléculas se entrecruzan y enredan entre sí, debido a la alta concentración, ya que no hay suficiente espacio para que las cadenas de GK se muevan libremente, por lo tanto la disolución adquirió el mayor volumen hidrodinámico que se reflejó en notables aumentos de viscosidad, como ha sido reportado en GK y otros polisacáridos (Luo y col., 2013; Lapasin y Pricl, 1995).

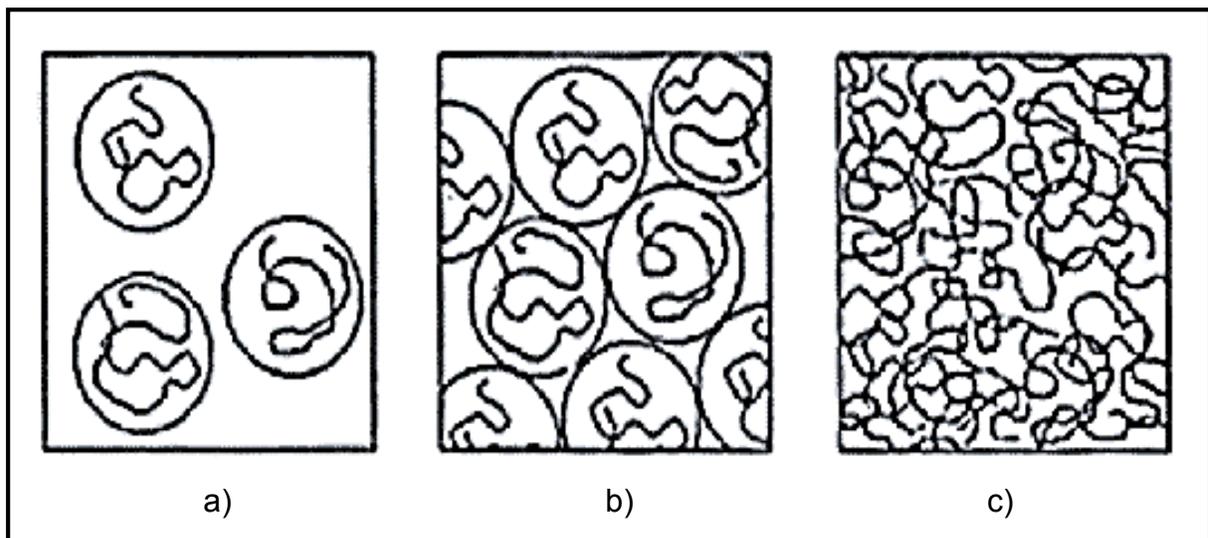


Figura 17. Entrecruzamiento de moléculas de glucomanano de konjac en medio acuoso a diferentes concentraciones a) GK al 0.10%, b) GK al 0.25%, c) GK al 0.50%, el círculo que rodea a las cadenas de glucomanano de konjac representa el volumen hidrodinámico de la molécula (adaptado de Lapasin y Pricl, 1995).

Mezcla de fructanos de agave con glucomanano de konjac en medio acuoso

En la Figura 18 se presentan las curvas de viscosidad en función de la velocidad de cizalla para las disoluciones de FA a diferentes concentraciones en mezcla con GK al 0.10% en medio acuoso. Similar al comportamiento de las disoluciones de GK en medio acuoso, la mezcla de FA a diferentes concentraciones con GK al 0.10% mostraron un comportamiento fluidificante, ya que la viscosidad disminuyó con respecto al incremento de la velocidad de cizalla.

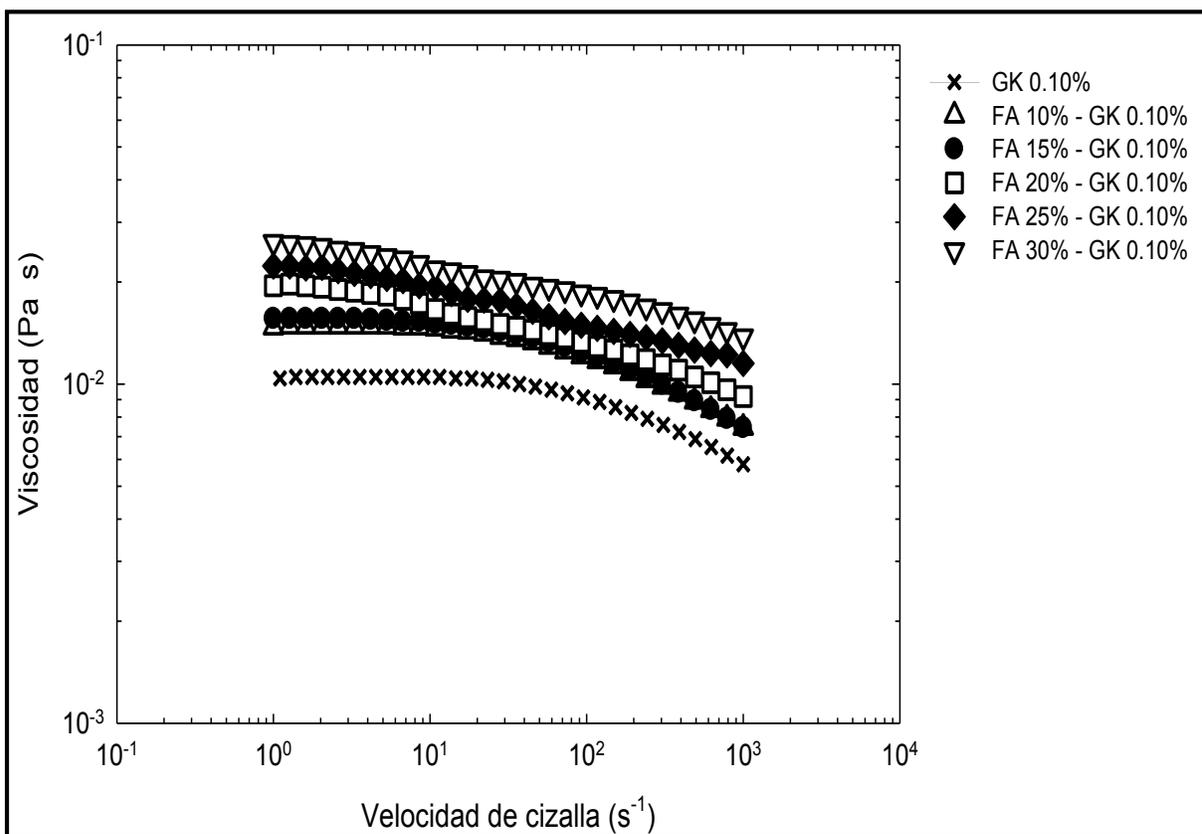


Figura 18. Viscosidad en función de la velocidad de cizalla a 25 °C para las mezclas de FA a diferentes concentraciones con glucomanano de konjac al 0.10% en medio acuoso.

La viscosidad del GK al 0.10% en medio acuoso incrementó a medida que la concentración de FA aumentó. Cuando la concentración de FA en la mezcla fue de 10 y 15% la viscosidad a bajas velocidades de cizalla ($\cong 1 \text{ s}^{-1}$), presentó un incremento del 5 y 11% con respecto al GK al 0.10% en medio acuoso. Además, cabe señalar

que las mezclas con FA a bajas concentraciones (10 y 15%) mostraron un comportamiento similar entre ellas para todo el intervalo de velocidad de cizalla estudiado. Por su parte, el aumento de la viscosidad a bajas velocidades de cizalla ($\cong 1 \text{ s}^{-1}$), de las disoluciones con 20, 25 y 30% de FA fue del 39, 59 y 87% con respecto al GK al 0.10% en medio acuoso. Por los valores de viscosidad registrados en las disoluciones se puede considerar que las moléculas de ambos polisacáridos no adquirieron un gran volumen hidrodinámico debido al bajo peso molecular de los FA reportado previamente por Arrizon y col. (2010) y Mancilla-Margalli y López (2006).

Por otro lado, en la Figura 19 se presentan las curvas de viscosidad en función de la velocidad de cizalla para las disoluciones de FA a diferentes concentraciones en mezcla con GK al 0.25% en medio acuoso, donde nuevamente las disoluciones exhiben un comportamiento claramente fluidificante.

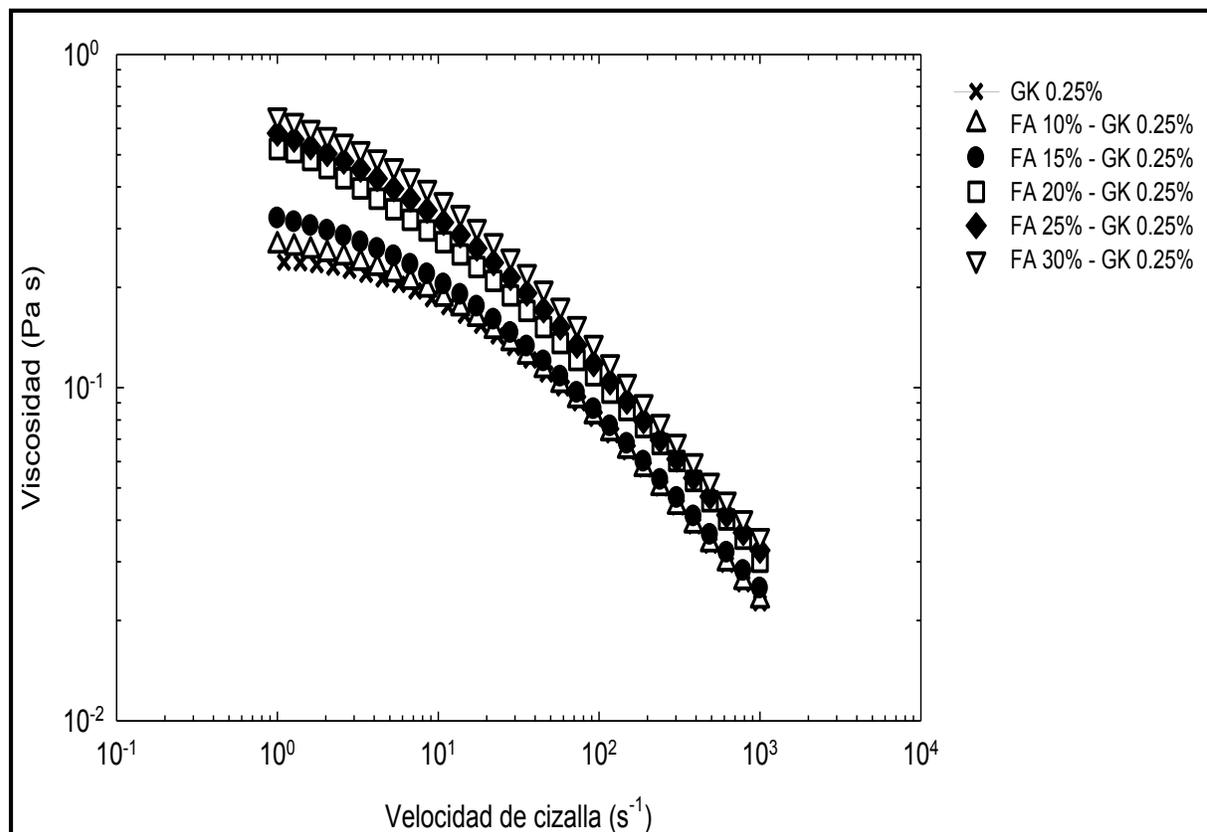


Figura 19. Viscosidad en función de la velocidad de cizalla a 25 °C para las mezclas de FA a diferentes concentraciones con glucomanano de konjac al 0.25% en medio acuoso.

Similar al comportamiento de las mezclas de FA y GK al 0.10%, la viscosidad del GK al 0.25% en medio acuoso aumentó conforme al incremento de la concentración de FA, obsérvese que la disolución de GK al 0.25% en medio acuoso presentó un comportamiento semejante con la mezcla que contiene 10% de FA, por su parte en la mezcla con 15% de FA la viscosidad solamente aumentó un 35% con respecto al GK al 0.25% en medio acuoso. En cambio, la viscosidad de las disoluciones con 20, 25 y 30% de FA incrementó en un 118, 143 y 175% con respecto al GK al 0.25% en medio acuoso, aunque la viscosidad registrada en las mezclas fue superior a la de los polisacáridos por separado, los valores sugieren que las disoluciones posiblemente experimentaron un fenómeno de incompatibilidad termodinámica, en donde las fuerzas de repulsión entre GK y FA provocó que las moléculas de ambos polisacáridos se excluyeran unas a otras, debido a la alta concentración de GK y FA generándose la segregación de los polisacáridos, este comportamiento es similar al reportado por Martínez-Padilla y col. (2015) en mezclas de goma xantana con concentrado de proteína de suero, al igual que lo reportado por Pérez y col. (2006) en sistemas de hidroxipropilcelulosa mezclados con concentrado de proteína de suero.

La Figura 20 presenta las curvas de viscosidad en función de la velocidad de cizalla para las disoluciones de FA a diferentes concentraciones en mezcla con GK al 0.50% en medio acuoso, las cuales también muestran un comportamiento fluidificante.

A bajas velocidades de cizalla ($\cong 1 \text{ s}^{-1}$) la viscosidad de la mezcla de FA a diferentes concentraciones con GK al 0.50% presentó dos efectos, en el primer caso cuando la concentración de FA en la mezcla fue de 10, 15 y 20% la viscosidad aumentó en un 47, 71 y 122% con respecto a la viscosidad del GK al 0.50% en medio acuoso, estos valores denotan la posible existencia de agregados, tal y como lo proponen Dan y col. (2009) debido a la baja concentración de FA. En cambio, cuando la concentración de FA en la mezcla fue de 25 y 30% mostraron un comportamiento similar con la mezcla de FA al 15%, por lo que la viscosidad de las disoluciones no aumentó probablemente debido a la falta de hidratación de las moléculas provocada por el exceso de solutos en la disolución de polisacáridos, como ha sido reportados por Doublier y Cuvelier (2006) y Wang y Cui (2005) en disoluciones de galactomananos, pectinas y

carragenatos. Por su parte, a altas velocidades de cizalla ($\cong 1000 \text{ s}^{-1}$) la orientación de las moléculas y la resistencia al flujo fue la misma que la del GK al 0.50% en medio acuoso sin importar la concentración de FA

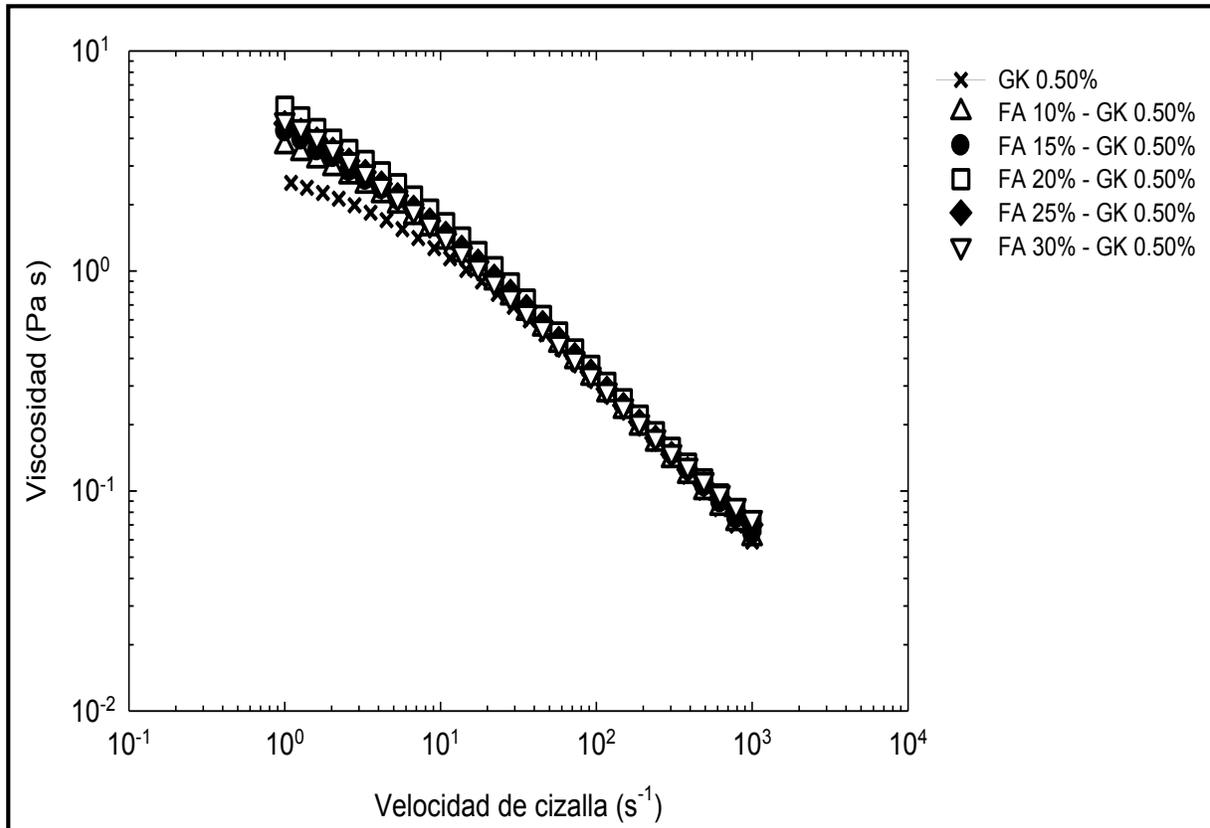


Figura 20. Viscosidad en función de la velocidad de cizalla a 25 °C para las mezclas de FA a diferentes concentraciones con glucomanano de konjac al 0.50% en medio acuoso.

Debido a que el comportamiento de las mezclas de GK y FA fue típicamente fluidificante para altas velocidades de cizalla, similar a las disoluciones de GK en medio acuoso, el modelo que mejor ajustó a los datos experimentales para describir el comportamiento estructural de las mezclas también fue el modelo de Cross (Ecuación 1). En el Cuadro 8 se presentan los parámetros reológicos del modelo para cada una de las mezclas de GK y FA a diferentes concentraciones.

Cuadro 8. Parámetros reológicos del modelo de Cross para las disoluciones de glucomanano de konjac en mezcla con fructanos de agave a diferentes concentraciones.

Disolución	η_0 (Pa · s)	λ (s)	m
FA 10% - GK 0.10%	$0.015 \pm 1.72 \times 10^{-4}$	$0.017 \pm 1.59 \times 10^{-4}$	$0.605 \pm 1.21 \times 10^{-3}$
FA 15% - GK 0.10%	$0.016 \pm 1.42 \times 10^{-4}$	$0.021 \pm 1.70 \times 10^{-4}$	$0.609 \pm 1.59 \times 10^{-3}$
FA 20% - GK 0.10%	$0.021 \pm 1.34 \times 10^{-4}$	$0.060 \pm 1.48 \times 10^{-4}$	$0.613 \pm 1.32 \times 10^{-3}$
FA 25% - GK 0.10%	$0.023 \pm 1.22 \times 10^{-4}$	$0.069 \pm 1.32 \times 10^{-4}$	$0.622 \pm 2.29 \times 10^{-3}$
FA 30% - GK 0.10%	$0.026 \pm 1.28 \times 10^{-4}$	$0.082 \pm 1.57 \times 10^{-4}$	$0.635 \pm 1.50 \times 10^{-3}$
FA 10%-GK 0.25%	$0.305 \pm 1.52 \times 10^{-3}$	$0.141 \pm 1.22 \times 10^{-3}$	$0.670 \pm 1.17 \times 10^{-3}$
FA 15%-GK 0.25%	$0.403 \pm 1.31 \times 10^{-3}$	$0.162 \pm 1.45 \times 10^{-3}$	$0.671 \pm 2.28 \times 10^{-3}$
FA 20%-GK 0.25%	$0.683 \pm 1.20 \times 10^{-3}$	$0.199 \pm 2.71 \times 10^{-3}$	$0.699 \pm 1.52 \times 10^{-3}$
FA 25%-GK 0.25%	$0.850 \pm 1.24 \times 10^{-3}$	$0.226 \pm 1.36 \times 10^{-3}$	$0.711 \pm 1.23 \times 10^{-3}$
FA 30%-GK 0.25%	$0.873 \pm 1.12 \times 10^{-3}$	$0.235 \pm 2.52 \times 10^{-3}$	$0.719 \pm 1.97 \times 10^{-3}$
FA 10%-GK 0.50%	$5.659 \pm 1.14 \times 10^{-3}$	$0.535 \pm 1.61 \times 10^{-3}$	$0.759 \pm 2.27 \times 10^{-3}$
FA 15%-GK 0.50%	$5.790 \pm 1.25 \times 10^{-3}$	$0.469 \pm 1.70 \times 10^{-3}$	$0.765 \pm 2.42 \times 10^{-3}$
FA 20%-GK 0.50%	$10.830 \pm 1.44 \times 10^{-3}$	$0.989 \pm 1.27 \times 10^{-3}$	$0.796 \pm 1.31 \times 10^{-3}$
FA 25%-GK 0.50%	$9.616 \pm 2.43 \times 10^{-3}$	$0.989 \pm 1.43 \times 10^{-3}$	$0.720 \pm 1.72 \times 10^{-3}$
FA 30%-GK 0.50%	$9.554 \pm 2.95 \times 10^{-3}$	$1.885 \pm 2.58 \times 10^{-3}$	$0.681 \pm 2.65 \times 10^{-3}$

Los valores de η_0 , así como las constantes λ y m aumentaron a medida que la concentración de GK incrementó a excepción de las disoluciones de GK al 0.50% en mezcla con 25 y 30% de FA, en donde los valores de η_0 y m no corresponden con la tendencia observada, ya que disminuyeron. Por los valores registrados de η_0 se puede considerar que en la mezcla de FA al 20% con GK al 0.50% se establecieron un mayor número de interacciones moleculares en relación a las mezclas de FA a diferentes concentraciones con GK al 0.25 y 0.10%. Debido a que los valores de m son inferiores a la unidad pero mucho mayores del cero se reafirmó que las mezclas son fluidos claramente fluidificantes a la cizalla y dado que el valor del coeficiente de determinación fue de 0.999 para todas las mezclas se demostró que el modelo de Cross presentó un buen ajuste a los datos experimentales.

Por otro lado, en la Figura 21 se presenta la influencia de la concentración de FA sobre la viscosidad de las mezclas a velocidad de cizalla aproximadamente de 1 y 1000 s^{-1} .

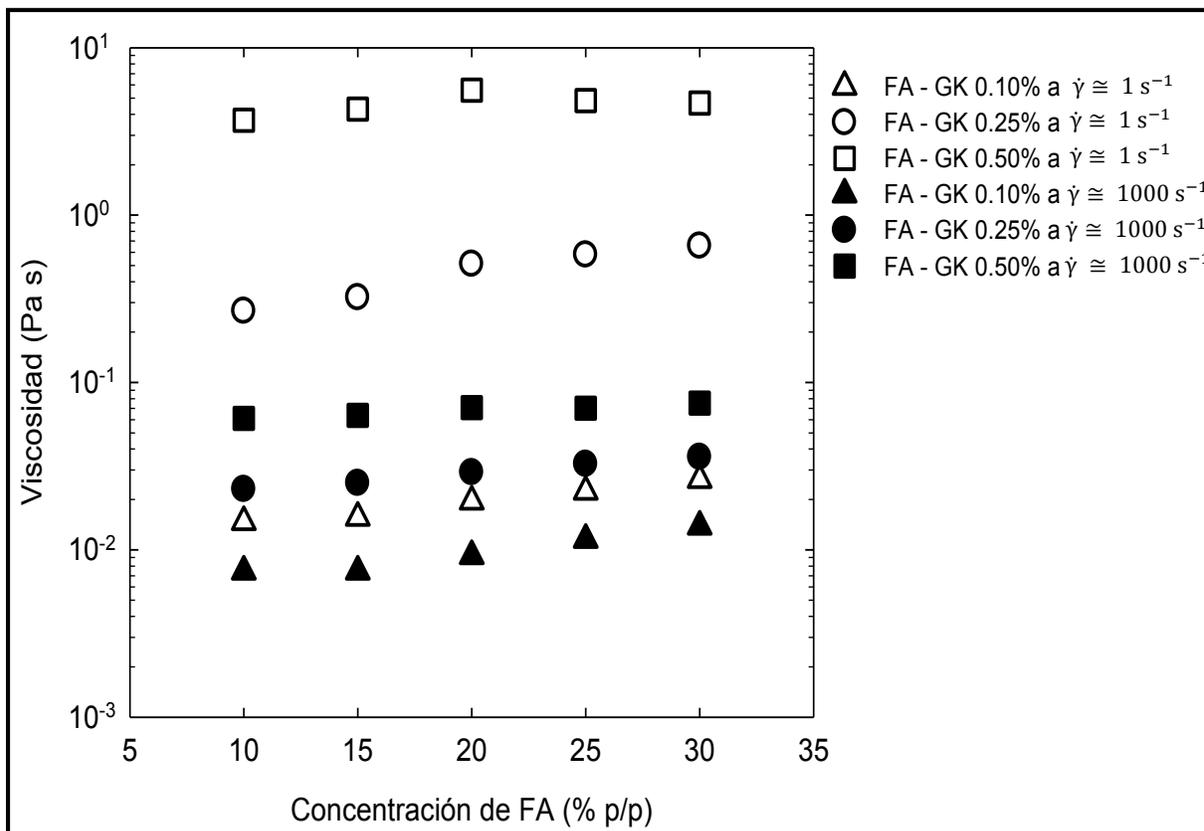


Figura 21. Viscosidad a una velocidad de cizalla aproximadamente de 1 y 1000 s^{-1} en función de la concentración de fructanos de agave para las disoluciones de glucomanano de konjac con fructanos de agave a diferentes concentraciones.

La viscosidad de las mezclas a bajas y altas velocidades de cizalla aumentó con respecto al incremento de la concentración de FA de forma prácticamente lineal para las disoluciones de GK al 0.10 y al 0.25% en mezcla con FA a diferentes concentraciones. Por su parte, la mezcla de GK al 0.50% con FA a diferentes concentraciones mostró dos comportamientos diferentes, a bajas velocidades de cizalla ($\cong 1$ s^{-1}) no hubo aumento de la viscosidad para la mezcla de GK al 0.50% con 25 y 30% de FA, ya que el exceso de solutos debido a la alta concentración de GK y de FA probablemente provocó que las moléculas no se hidrataran lo suficiente impidiendo el desarrollo de la funcionalidad del GK principalmente, dando como

resultado un menor volumen hidrodinámico y con ello la disminución de la viscosidad tal y como ha sido reportado por Doublier y Cuvelier (2006), Wang y Cui (2005) y Billmeyer (2004) para disoluciones de galactomananos, pectinas y carragenatos, mientras tanto, a altas velocidades de cizalla ($\cong 1000 \text{ s}^{-1}$) la viscosidad se mantuvo prácticamente constante sin importar la concentración de FA en la mezcla.

Obsérvese que el aumento de la velocidad de cizalla provocó que la viscosidad de las mezclas disminuyera notablemente ya que a bajas velocidades de cizalla ($\cong 1 \text{ s}^{-1}$) la viscosidad se mantuvo en un intervalo de 1.47×10^{-2} a $5.58 \text{ Pa}\cdot\text{s}$, mientras que, a altas velocidades de cizalla ($\cong 1000 \text{ s}^{-1}$) los valores de viscosidad fueron de 7.44×10^{-3} a $7.53 \times 10^{-2} \text{ Pa}\cdot\text{s}$, estos valores sugieren que la aplicación de altas velocidades de cizalla provocó que la disolución perdiera su estructura de manera que las partículas de ambos polisacáridos fueron disgregadas en dirección al flujo, tal y como ha sido reportado por Chenlo y col. (2010) para sistemas de goma guar con goma tragacanto.

Al igual que el GK solo, las mezclas presentaron un comportamiento estructural similar, debido a la diferencia con el tamaño de la molécula dominó el comportamiento del GK. El aumento de la viscosidad en las mezclas se produjo posiblemente a que las cadenas moleculares de ambos polisacáridos fueron hidratadas por las moléculas de agua, con lo cual se extendieron y formaron puentes de hidrógeno con el agua, una vez que las moléculas de GK y FA están lo suficientemente extendidas tienen mayor facilidad de interaccionar provocando el entrecruzamiento de las cadenas del mismo tipo, de manera que el peso molecular de los polisacáridos en disolución aumentó y con ello adquirieron un gran volumen hidrodinámico generando que la viscosidad de la solución aumente (Benedict y Carrahe, 2002; Billmeyer, 2004).

En la Figura 22 se infiere de forma simplificada la propuesta dicho mecanismo, en donde las líneas representan las cadenas moleculares del GK, mientras que los círculos a los agregados de FA.

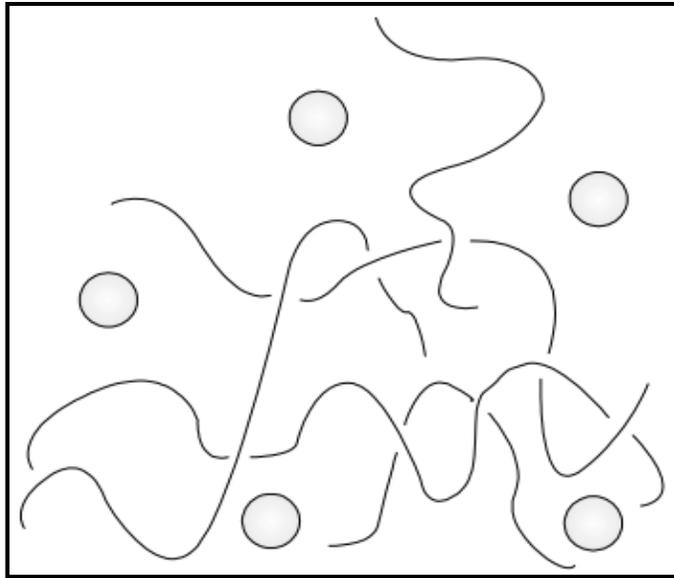


Figura 22. Mecanismo propuesto del estado en medio acuoso del glucomanano de konjac y fructanos de agave (adaptado de Benedict y Carrahe, 2002).

Conclusiones

En las disoluciones de fructanos de agave y glucomanano de konjac solos y en mezcla, el pH se mantuvo en un intervalo de 6.00 a 6.27, por lo tanto se comprobó que el cambio en la concentración de cualquiera de los polisacáridos no presentó influencia sobre los valores de pH. Por otro lado, la densidad de los fructanos de agave en medio acuoso y en mezcla con glucomanano de konjac fue descrita mediante una relación lineal.

En cuanto a las propiedades de flujo, los fructanos de agave, en las concentraciones estudiadas mostraron un comportamiento newtoniano ya que la viscosidad se mantuvo constante en un intervalo de velocidad de cizalla de 10 a 400 s⁻¹.

Los sistemas de glucomanano de konjac solo y en mezcla presentaron un comportamiento fluidificante a la cizalla descrito por el modelo de Cross, en donde los valores de η_0 , así como las constantes λ y m aumentaron a medida que la concentración de fructanos de agave incrementó.

En cuanto a la funcionalidad del sistema, es posible notar que los incrementos de la viscosidad son mínimos en la mezcla de glucomanano de konjac al 0.10% con diferentes concentraciones de fructanos de agave, en cambio en las disoluciones de glucomanano de konjac al 0.25% con fructanos de agave al 20, 25 y 30%, la viscosidad aumento más del 100% con respecto al GK en medio acuoso, y debido a los notables aumentos en la viscosidad, fue posible determinar que las disoluciones posiblemente experimentaron un fenómeno de incompatibilidad termodinámica. En el caso de la mezcla de glucomanano de konjac al 0.50% con 10, 15 y 20% de fructanos de agave mostró un incrementó en la viscosidad, sin embargo, cuando la concentración de los fructanos de agave fue de 25 y 30%, la viscosidad no aumentó más de la obtenida a 20% debido al exceso de solutos en la disolución, ya que posiblemente las moléculas de ambos polisacáridos no se hidrataron lo suficiente provocando la disminución las interacciones polisacárido-agua. Dadas las características de flujo mostradas en las mezclas de fructanos de agave y glucomanano de konjac se sugiere su aplicación en

sistemas dispersos alimenticios que requieran de elevada viscosidad, debido a dicha capacidad sirve para dar cuerpo y mejorar la textura, lo que lo convierte en un ingrediente potencial para reemplazar la grasa, incrementar la palatabilidad y reducir las calorías en los alimentos por lo que resulta una excelente alternativa debido a los efectos benéficos asociados con la salud.

Referencias

- Aguilera, J.M., Stanley D.W. 1999. *Microstructural principles of food processing and engineering*, 2nd ed. Aspen Publisher, Estados Unidos de América.
- Alfadelta. 2014. Ficha técnica de glucomanano de konjac. México
- Álvarez, M.F. 2007. Evaluación del glucomanano de konjac como excipiente base en formas de dosificación sólidas de liberación modificado. Tesis doctoral de Farmacia y Tecnología Farmacéutica. Universidad de Santiago de Compostela, España.
- Álvarez-Manceñido, F., Braeckmans, K., De Smedt, S.C., Demeester, J., Landin, M., Martínez-Pacheco, R. 2006. Characterization of diffusion of macromolecules in konjac glucomannan solutions and gels by fluorescence recovery after photobleaching technique. *International Journal of Pharmaceutics*, 316, 37–46.
- Álvarez-Manceñido, F., Landin, M., Lacik, I., Martínez-Pacheco, R., 2008. Konjac glucomannan and konjac glucomannan/xanthan gum mixtures as excipients for controlled drug delivery systems. Diffusion of small drugs. *International Journal of Pharmaceutics*, 349, 11-18.
- Anton Paar. 2011. Manual densímetro DMA500. Austria.
- Arrizon, J., Morel, S., Gschaedler, A., Monsan, P. 2010. Comparison of the water-soluble carbohydrate composition and fructan structures of Agave tequilana plants of different ages. *Food Chemistry*, 122, 123-130.
- Beltrán, R. M., Marcilla, G. A. 2012. *Tecnología de polímeros. Procesado y propiedades*. UNE, España.
- Benedict, R., Carrahe, S. 2002. *Introducción a la química de los polímeros*. 2^{da} ed. Reverté, España.

- Biliaderis, G. C., Izydorczyk, S. M. 2007. *Functional food carbohydrates*. CRC Press, Estados Unidos de América
- Billmeyer, W. 2004. *Ciencia de los polímeros*. 2^{da} ed. Reverté, España.
- Castellanos-Pérez, N., Rodríguez-Mendiola, M., López de Alba, P., López-Martínez, L., Gutiérrez-Miceli, F., Arias-Castro, C. 2012. Optimización de los procesos de extracción y fraccionamiento por grado de polimerización de fructanos, obtenidos a partir de *agave tequilana weber* azul, para la obtención de prebióticos. *Gayana Botánica*, 69, 31-39.
- Chao, W., Xu, M., Lv, W., Qiu, P., Gong, Y., Li, D. 2012. Study on rheological behavior of konjac glucomannan. *Bioengineering*, 33, 25-30.
- Chen, H. L., Cheng, H. C., Liu, Y. J., Liu, S. Y., Wu, W. T. 2006. Konjac acts as a natural laxative by increasing stool bulk and improving colonic ecology in healthy adults. *Nutrition*, 22, 1112–1119.
- Chenlo, F., Moreira, R., Silva, C. 2010. Rheological behaviour of aqueous systems of tragacanth and guar gums with storage time. *Journal of Food Engineering*, 96, 107-113.
- Crispín-Isidro, G., Lobato-Calleros, C., Espinosa-Andrews, H., Álvarez-Ramírez, J., Vernon-Carter, J. 2014. Effect of inulin and agave fructans addition on the rheological, microstructural and sensory properties of reduced-fat stirred yogurt. *Food Science and Technology*, 29, 1-7.
- Cross, M. 1964. Rheology of non-Newtonian fluids: a new flow equation for pseudoplastic systems. *Journal of Colloid Science*, 20, 414-437.
- Dan, A., Ghosh, S., Moulik, S. 2009. Physicochemical studies on the biopolymer inulin: A critical evaluation of its self-aggregation, aggregate-morphology, interaction with water, and thermal stability. *Biopolymers*, 91, 687-699.

- Darin, P., Wim, V.E. 2014. Fructans: prebiotics and immunomodulators. *Journal of Functional Foods*, 8, 348-357.
- de Kruif C. G., Tuinier R. 2001. Polysaccharide protein interactions. *Food Hydrocolloids*, 15, 555-563.
- de Kruif C. G., Weinbreck F., de Vries R. 2004. Complex coacervation of proteins and anionic polysaccharides. *Current Opinion in Colloid & Interface Science*, 9, 340-349.
- Doublier J. L., Garnier C., Renard D., Sanchez C. 2000. Protein-polysaccharide interactions. *Current Opinion in Colloid & Interface Science*, 5, 202-214.
- Doublier, J. L., Cuvelier, G. (2006). Gums and hydrocolloids: functional aspects. En: *Carbohydrates in Food*, (Eliasson, A., ed.), Taylor & Francis, Estados Unidos de América, pp. 233-272.
- Du, X., Li, J., Chen, J., Li, B. 2012. Effect of degree of deacetylation on physicochemical and gelation properties of konjac glucomannan. *Food Research International*, 46, 270-278.
- Espinosa-Andrews, H., Urias-Silvas, J. E. 2012. Thermal properties of agave fructans (*Agave tequilana weber var. azul*). *Carbohydrate Polymers*, 87, 2671-2676.
- Fang, W.X., y Wu, P.W., 2004. Variantions of konjac glucomannan from *Amorphophallus konjac* and its refined power in China. *Food Hydrocolloids*, 18, 167-170.
- Fitzpatrick, P., Meadows, J., Ratcliffe, I., Williams, P. A. 2013. Control of the properties of xanthan/glucomannan mixed gels by varying xanthan fine structure. *Carbohydrate Polymers*, 92, 1018-1025.
- Fitzsimons, S., Tobin, J., Morris, E. 2006. Synergistic binding of konjac glucomannan to xanthan on mixing at room temperature. *Food Hydrocolloids*, 22, 36-46.

- Gao, S.J., Nishinari, K., 2004. Effect of degree of acetylation on gelation of konjac glucomannan. *Biomacromolecules*, 5, 175-185.
- Gillespie, R. J. 2004. *Química, Vol 2*. Reverté, España.
- Grinberg V. Y., Tolstoguzov V. B. 1997. Thermodynamic incompatibility of proteins and polysaccharides in solutions. *Food Hydrocolloids*, 11, 145-158.
- Harding, S. E. 1995. On the hydrodynamic analysis of macromolecular conformation. *Biophysical Chemistry*, 55, 69-93.
- Harding, S. E. 1997. The intrinsic viscosity of biological macromolecules. Progress in measurement, interpretation and application to structure in dilute solution. *Progress in Biophysics and Molecular Biology*, 68, 207-262.
- He, P., Luo, X., Lin, X., Zhang, H. 2012. The Rheological properties of konjac glucomannan (KGM) Solution. *Materials Science Forum*, 724, 57-60.
- Ingredion. 2014. Ficha técnica fructanos de agave. México.
- Jiménez-Colmenero, F., Cofrades, S., Herrero, A.M., Solas, M.T., Ruiz-Capillas, C. 2013. Konjac gel for use as potential fat analogue for healthier meat product development: effect chilled and frozen storage. *Food Hydrocolloids*, 30, 351-357.
- Katsuraya, K., Okuyama, K., Hatanaka, K., Oshima, R., Sato, T., Matsuzaki, K. 2003. Constitution of konjac glucomannan: chemical analysis and ¹³C NMR spectroscopy. *Carbohydrate Polymers*, 53, 183-189.
- Khanna, S., Tester, R. F. 2006. Influence of purified konjac glucomannan on gelatinization and retrogradation properties of maize and potato starches. *Food Hydrocolloids*, 20, 567-576.
- Kohyama, K. Nishinari, K. 1990. Dependence of the specific volume of konjac glucomannan on pH. En: *Gums and stabilizers for the food industry* 5, Philips,

- G. O., Wedlock, D.J., Williams, P.A. (Eds.), IRL Press, Estados Unidos de América, pp. 459-462.
- Koroskenyi, B., Mc Carthy, S. P. 2001. Synthesis of acetylated konjac glucomannan and effect of degree of acetylation on water absorbency. *Biomacromolecules*, 2, 824-826.
- Lapasin, R., Prici, S. 1995. Rheology of polysaccharide systems. En: Rheology of industrial polysaccharides: theory and applications, Lapasin, R., Pricls, S., (Eds.), Chapman & Hall, Gran Bretaña, pp. 250–267.
- Leuangsukrerkerk, M., Phupoksakul, T., Tananuwong, K., Borompichaichartkul, C., Janjarasskul, T. 2014. Properties of konjac glucomannan whey protein isolate blend films. *Food Science and Technology*, 59, 94-100.
- Li, B., Xie B. 2003. Study on molecular chain morphology of konjac glucomannan. *Agricultural Sciences in China*, 2, 798-803.
- Lin, X., Wu, Q., Luo, X., Liu, F., Luo, X., He, P. 2010. Effect of degree of acetylation on thermoplastic and melt rheological properties of acetylated konjac glucomannan. *Carbohydrate Polymers*, 82, 167-172.
- López, G.M., Mancilla, M.N., Mendoza, D.G. 2003. Molecular structures of fructans from *agave tequilana weber* var. azul. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 51, 7835-7840.
- López, M.G., Urías-Silvas, E.J. 2007. Agave fructans as prebiotics. *Fructooligosaccharides*, 37, 1-14.
- Luo, X., He, P., Lin, X. 2013. The mechanism of sodium hydroxide solution promoting the gelation of konjac glucomannan (KGM). *Food Hydrocolloids*, 30, 92-99.
- Madrigal, L., Sangronis, E. 2007. La inulina y derivados como ingredientes claves en alimentos funcionales. *Archivos Latinoamericanos de Nutrición*, 57, 387-396.

- Maeda, M., Shimahara, H., Sugiyama, N. 1980. Detailed examination of the branched structure of konjac glucomannan. *Agricultural and Biological Chemistry*, 38, 315-321.
- Mancilla-Margalli, A., López, M. G. 2002. Generation of maillard compounds from inulin during the thermal processing of *agave tequilana weber var. azul*. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 50, 806–812.
- Mancilla-Margalli, A., López, M. G. 2006. Water-soluble carbohydrates and fructan structure patterns from *agave* and *dasyilirion* species. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 54, 7832-7839.
- Martínez-Padilla, L. P. 2012. Guía rápida de uso del Reómetro MCR 301 Physica Anton Paar. Documento interno LAPRYFAL, FES Cuautitlán, UNAM.
- Martínez-Padilla, L. P., García-Rivera, J. L., Romero-Arreola, V., Casas-Alencáster, N. B. 2015. Effects of xanthan gum rheology on the foaming properties of whey protein concentrate. *Journal of Food Engineering*, 156, 22–30.
- McClements D. J. 2006. Non-covalent interactions between proteins and polysaccharides. *Biotechnology Advances*, 24, 621-625.
- Mellado-Mojica, E., López, M. G. 2012. Fructan metabolism in *A. tequilana weber* blue variety along its developmental cycle in the field. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 60, 11704-11713.
- Miyoshi, E., Takaya, T., Williams, P.A., Nishinari, K. 1997. Rheological and DC studies of mixtures of gellan gum and konjac glucomannan. *Macromolecular Symposia*, 120, 271-280.
- Moreno-Vilet, L., García-Hernández, M.H., Delgado-Portales, R.E., Corral-Fernández, N.E., Cortez-Espinosa, N., Ruiz-Cabrera, M.A., Portales-Pérez, D.P. 2014. *In vitro* assessment of agave fructans (*agave salmiana*) as prebiotics and immune system activators. *International Journal of Biological Macromolecules*, 63, 181-187.

- Narváez-Zapata, J. A.; Sánchez-Teyer, L. F. 2009. Agaves as a raw material: recent technologies and applications. *Recent Patents on Biotechnology*, 3, 185-191.
- Nishinari, K. 2000. Konjac glucomannan. *Developments in Food Science*, 41, 309-330.
- Nishinari, K., Williams, P. A., Phillips, G. O. 1992. Review of the physico-chemical characteristics and properties of konjac mannan. *Food Hydrocolloids*, 6, 199-222.
- Nordic Sugar. 2015. The functional properties of sugar. (Nordzucker Group, Folleto), Copenhagen K. Consultado: Agosto 17, 2015, <http://www.nordicsugar.com>.
- Ohaus. 2001. Manual termobalanza MB45. E.U.A.
- Olvera, C., Castillo, E., López-Munguía, A. 2007. Fructosiltransferasas, fructanas y fructosa. *Instituto de Biotecnología UNAM*, 14, 327-346. Consultado: Agosto 26, 2014, http://www.ibt.unam.mx/computo/pdfs/libro_25_aniv/capitulo_29.pdf.
- Penroj, P., Mitchell, J., Hill, S., Ganjanagunchorn, W. 2005. Effect of konjac glucomannan deacetylation on the properties of gels formed from mixtures of kappa carrageenan and konjac glucomannan. *Carbohydrate Polymers*, 59, 367-376.
- Pérez, O. E., Wargon, V., Pilosof, M. R. (2006) Gelation and structural characteristics of incompatible whey proteins/hydroxypropylmethylcellulose mixtures. *Food Hydrocolloids*, 20, 966–974.
- Phillips, G. O., Williams P. A. 2000. Introduction to food hydrocolloids. En: *Handbook of hydrocolloids*, Phillips, G. O., Williams P. A. (Eds.), CRC Press, E.U.A., pp. 1-20.
- Ponce, S. J., Macías, B. E., Soltero, M. A., Fernández, E. V., Zuñiga, P. V., Escalona, B. H. 2008. Physical-Chemical and non-linear rheological properties of aqueous solutions of agave fructans. e-Gnosis [online], 6, 1-23. Consultado: Agosto 5, 2014, <http://www.e-gnosis.udg.mx/vol6/art8>.

- Rao, M. A. 1999. *Rheology of fluid and semisolid foods principles and applications*. Aspen Publication, Estados Unidos de América
- Reginald H. W. 1998. *Polysaccharide dispersions: chemistry and technology in food*. Academic Press, Estados Unidos de América, pp 29-40.
- Roberfroid, M.B., 2005. Introducing inulin type fructans. *British Journal of Nutrition*, 93, 13-25.
- Rodríguez-Patiño, J., Pilosof, M. 2011. Protein-polysaccharide interactions at fluid interfaces. *Food Hydrocolloids*, 25, 1925-1937.
- Schwartz, J. M., Bail, K. L., Garnier, C., Llamas, G., Queveaub, D., Pontoire, B., Srzednicki, G., Bail, P. 2014. Available water in konjac glucomannane starch mixtures. Influence on the gelatinization, retrogradation and complexation properties of two starches. *Food Hydrocolloids*, 41, 71-78.
- Semenova M. G. 1996. Factors determining the character of biopolymer-biopolymer interactions in multicomponent aqueous solutions modeling food systems. En: *Macromolecular interactions in food technology*, Parris, N., Kato, A., Creamer, L., Pearce, J., (Eds.), American Chemical Society, Estados Unidos de América, pp. 37-49.
- Semenova, M.G. 2007. Thermodynamic analysis of the impact of molecular interactions on the functionality of food biopolymers in solution and in colloidal systems. *Food Hydrocolloids*, 21, 23-45.
- Steffe, F. J. 1996. *Rheological methods in food process engineering*, 2nd ed. Freeman Press, Estados Unidos de América.
- Stephen, A. M., Phillips, G. O., Williams, P. A. 2006. *Food Polysaccharides and their Applications*. 2nd edition. Taylor & Francis, Estados Unidos de América.
- Takagami, S. 2000. Konjac mannan. En: *Handbook of hydrocolloids*, Phillips, G. O., Williams P. A. (Eds.), CRC Press, Estados Unidos de América, pp. 413-424.

- Takigami, S., Phillips, G. O. 1995. The production and quality of konjac mannan. En: *Gums and stabilisers for the food industry 8*, Phillips, G. O., Williams, P. A., Wedlock, D. J. (Eds.), CRC Press, Estados Unidos de América, pp. 385-391.
- Ulloa, J. A., Espinosa, A. H., Cruz, R. K., Petra, R. U., Ulloa, R. E., Ramírez, R. J. 2010. Los fructanos y su papel en la promoción de la salud. *Revista Fuente*, 2, 57-62.
- Urías-Silvas, J. E., Cani, P. D., Delmeé, E., López, M. G., Delzenne, N. M. 2008. Physiological effects of dietary fructans extracted from *agave tequilana* Gto. and *dasyilirion sp.* *British Journal of Nutrition*, 99, 254–261.
- Waleckx, E., Gschaedler, A., Colonna-Ceccaldi, B., Monsan, P. 2008. Hydrolysis of fructans from *agave tequilana weber var. azul* during the cooking step in a traditional tequila elaboration process. *Food Chemistry*, 108, 40-48.
- Wang, Q., Cui, S. 2005. Understanding the physical properties of food polysaccharides. En: *Food carbohydrates: chemistry, physical properties and applications*, Cui, S. (Ed.), Taylor & Francis, Estados Unidos de América, pp. 159-217.
- Wang, Y. I., Li, Z., Wei, Y. 2008. Rheology and influence factor of low concentration konjac gum solutions. *Journal of Central South University of Technology*, 15, 516–519.
- Williams, M. A., Foster, T. J., Martin, D. R., Norton, I. T., Yoshimura, M., Nishinari, K. 2000. A molecular description of the gelation mechanism of konjac mannan. *Biomacromolecules*, 1, 440–450.
- Williams, P. A., Day, D. H., Langdon, M. I., Phillips, G.O., Nishinari, K. 1991. Synergistic interaction of xanthan gum with glucomannans and galactomannans. *Food Hydrocolloids*, 4, 489-493.
- Windhab, E. J. 1995. Rheology in food processing. En: *Physico-chemical aspects of food processing*, Beckett, S. T. (Ed.), Blackie Academic & Professional, Gran Bretaña, pp. 80-116.

- Wu, W. T., y Chen, H. L. 2011. Konjac glucomannan and inulin systematically modulate antioxidant defense in rats fed a high-fat fiber-free diet. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 59, 9194-9200.
- Wu, W. T., Yang, L. C., Chen, H. L. 2014. Effects of konjac glucomannan, inulin and cellulose on acute colonic responses to genotoxic azoxymethane. *Food Chemistry*, 155, 304-310.
- Xu, C., Luo, X., Lin, X. Zhuo, X., Liang, L. 2009. Preparation and characterization of polylactide/thermoplastic konjac glucomannan blends. *Polymer*, 50, 3698-3705.
- Yoshimura, M., Nishinari, K. 1999. Dynamic viscoelastic study on the gelation of konjac glucomannan with different molecular weights. *Food Hydrocolloids*, 13, 227-233.