



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE
MÉXICO**

FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES CUAUTILÁN

**Efecto del glucomanano de konjac en la gelatinización de
almidón de papa durante tratamiento térmico y comportamiento
reológico a temperatura ambiente**

TESIS

**QUE PARA OBTENER EL GRADO DE:
INGENIERA EN ALIMENTOS**

PRESENTA

ANA PILAR CASAS LÓPEZ

Asesoras

Dra. Laura Patricia Martínez Padilla

I.BQ. Norma Beatriz Casas Alencáster

Cuautitlán Izcalli, Edo. de México 2018



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



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.



UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTÓNOMA DE
MÉXICO

**FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES CUAUTITLÁN
UNIDAD DE ADMINISTRACIÓN ESCOLAR
DEPARTAMENTO DE EXÁMENES PROFESIONALES**

ASUNTO: VOTO APROBATORIO

**M. en C. JORGE ALFREDO CUÉLLAR ORDAZ
DIRECTOR DE LA FES CUAUTITLÁN
PRESENTE**

**ATN: I.A. LAURA MARGARITA CORTAZAR FIGUEROA
Jefa del Departamento de Exámenes Profesionales
de la FES Cuautitlán.**

Con base en el Reglamento General de Exámenes, y la Dirección de la Facultad, nos permitimos comunicar a usted que revisamos el: Trabajo de Tesis

Efecto del glucomanano de konjac en la gelatinización de almidón de papa durante tratamiento térmico y comportamiento reológico a temperatura ambiente.

Que presenta la pasante: **Ana Pilar Casas López**

Con número de cuenta: 412066672 para obtener el Título de la carrera: Ingeniería en Alimentos

Considerando que dicho trabajo reúne los requisitos necesarios para ser discutido en el **EXAMEN PROFESIONAL** correspondiente, otorgamos nuestro **VOTO APROBATORIO**.

ATENTAMENTE

"POR MI RAZA HABLARÁ EL ESPÍRITU"

Cuautitlán Izcalli, Méx. a 24 de Octubre de 2017.

PROFESORES QUE INTEGRAN EL JURADO

	NOMBRE	FIRMA
PRESIDENTE	Dra. Laura Patricia Martínez Padilla	
VOCAL	Dra. María Eugenia Ramírez Ortiz	
SECRETARIO	I.A. Patricia Muñoz Aguilar	
1er. SUPLENTE	I.A. Miriam Alvarez Velasco	
2do. SUPLENTE	Dra. Virginia Agustina Delgado Reyes	

NOTA: los sinodales suplentes están obligados a presentarse el día y hora del Examen Profesional (art. 127).

LMCF/cga*

AGRADECIMIENTOS

A mis asesoras, la Dra. Laura Patricia Martínez Padilla y la I.BQ. Norma B. Casas Alencáster por todo su tiempo, esfuerzo y dedicación, pero sobre todo por compartir su conocimiento conmigo. Fue un honor trabajar a su lado.

*A la **FES Cuautitlán UNAM**, por haberme permitido formarme en sus aulas y brindarme todas las herramientas necesarias para poder culminar la carrera.*

A la DGAPA-UNAM, Programa de apoyo a Proyectos de Investigación e Innovación Tecnológica, PAPIIT IN118214, “Propiedades reológicas y fisicoquímicas de biomoléculas funcionales de interés en la formación de sistemas coloidales alimenticios” por la beca recibida para el desarrollo de este trabajo.

DEDICATORIAS

A la memoria de mi Padre (1952-2017)

A mi mamá y a mi abuelita Tere por su apoyo incondicional y todo su esfuerzo, gracias a ustedes he logrado llegar hasta aquí. Gracias por creer y confiar en mí.

A mis hermanos: Rocio, Maricruz, Enrique, Paulina, Claudia, Laura, Diana y Arturo por todo su apoyo, pero en especial a mi hermana Pau por estar siempre al pendiente de mí y apoyar a nuestra madre para que yo pudiera terminar mis estudios. Gracias por confiar en mí y ser un gran ejemplo.

A mi tía Briseida (Mara) por tus sabias palabras y consejos, los cuales siempre llevaré conmigo, aunque parezca que no te hago caso.

A mis amigas, mis hijas: Anita, Fabb, Narett, Joss y Clarita; por permitirme formar parte de sus vidas y compartir tantos momentos inolvidables durante nuestra etapa universitaria, gracias por su apoyo.

ÍNDICE

ÍNDICE DE CUADROS	I
ÍNDICE DE FIGURAS	III
RESUMEN	1
INTRODUCCIÓN	3
CAPÍTULO I. ANTECEDENTES	6
1.1. Almidón	6
1.1.1. Estructura	7
1.1.2. Gelatinización	8
1.1.3. Modificaciones del almidón	12
1.1.3.1. Modificaciones físicas	13
1.1.3.2. Modificaciones químicas	14
1.1.3.2.1. Acetilación	17
1.1.4. Reología de pastas y geles de almidón.....	18
1.1.4.1. Comportamiento al flujo	20
1.1.4.1.1. Fluidos Newtonianos	20
1.1.4.1.2. Fluidos no-newtonianos independientes al tiempo de cizallamiento	20
1.1.4.1.3. Fluidos no-newtonianos dependientes al tiempo de cizallamiento	25
1.1.4.2. Viscoelasticidad	26
1.2. Almidón de papa	29
1.2.1. Composición y estructura	29
1.2.2. Gelatinización del almidón de papa.....	31
1.2.3. Reología de pastas y geles de almidón de papa.....	32
1.3. Glucomanano de konjac	34
1.3.1. Obtención	35
1.3.2. Estructura y composición	36
1.3.3. Reología del glucomanano de konjac.....	37

1.4. Interacciones de almidón con otros polisacáridos.....	39
CAPÍTULO II. METODOLOGÍA.....	41
2.1. OBJETIVOS.....	41
2.2. DESARROLLO EXPERIMENTAL.....	41
2.2.1. Materiales	41
2.2.2. Métodos.....	41
Determinación de humedad de polvos	41
Preparación de las muestras.....	42
Determinación de pH.....	43
Seguimiento del desarrollo de viscosidad durante la gelatinización.....	43
Propiedades de flujo.....	43
Propiedades viscoelásticas	44
CAPÍTULO III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	45
3.1. Humedad de polvos	45
3.2. pH de las mezclas almidón-glucomanano de konjac	45
3.3. Seguimiento del desarrollo de viscosidad durante la gelatinización	46
3.3.1. Almidón nativo y acetilado al 4 y 2%	47
3.3.2. Mezclas de almidón nativo-glucomanano de konjac.....	49
3.3.3. Mezclas de almidón acetilado-glucomanano de konjac.....	53
3.4. Propiedades de flujo	56
3.4.1. Mezclas de almidón nativo-glucomanano de konjac.....	56
3.4.2. Mezclas de almidón acetilado-glucomanano de konjac.....	63
3.5. Propiedades viscoelásticas.....	67
3.5.1. Determinación de la zona viscoelástica lineal	67
3.5.2. Barrido de velocidad angular	69
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	72
REFERENCIAS	74

ÍNDICE DE CUADROS

		Página
Cuadro 1.1	Características de los gránulos de almidón de diferentes fuentes botánicas	6
Cuadro 1.2	Temperatura de gelatinización y viscosidad pico de almidones nativos mediante visco-analizador rápido con 8% de almidón	12
Cuadro 1.3	Modificaciones del almidón y técnicas de obtención	15
Cuadro 1.4	Propiedades y aplicaciones de algunos almidones modificados	16
Cuadro 1.5	Modelos reológicos que describen el comportamiento de fluidos independientes al tiempo de cizallamiento	21
Cuadro 1.6	Resumen de los estudios sobre el efecto de polisacáridos en las propiedades de gelatinización de almidón y las propiedades de la pasta y gel	40
Cuadro 3.1	Humedad (%) de almidón nativo, acetilado y glucomanano de konjac	45
Cuadro 3.2	pH de las dispersiones de almidón nativo (AN) y acetilado (AA) al 4% con y sin glucomanano de konjac (GMK) al 0.5%	45
Cuadro 3.3	Parámetros de gelatinización del almidón nativo y acetilado al 4 y 2%	48
Cuadro 3.4	Parámetros de gelatinización del almidón nativo al 4% con y sin glucomanano de konjac al 0.15, 0.3 y 0.5%	51
Cuadro 3.5	Parámetros de gelatinización del almidón nativo al 2% con y sin glucomanano de konjac al 0.15, 0.3 y 0.5%	51
Cuadro 3.6	Parámetros de gelatinización del almidón acetilado al 4% con y sin glucomanano de konjac al 0.15, 0.3 y 0.5%	55
Cuadro 3.7	Parámetros de gelatinización del almidón acetilado al 2% con y sin glucomanano de konjac al 0.15, 0.3 y 0.5%	55
Cuadro 3.8	Parámetros reológicos del modelo de la potencia del almidón nativo al 4% con y sin GMK a 40 y 25 °C	58

Cuadro 3.9	Parámetros reológicos del modelo de Carreau de las disoluciones de glucomanano de konjac	61
Cuadro 3.10	Parámetros reológicos del modelo de Carreau de las mezclas de almidón al 4% con GMK a 25 °C	62
Cuadro 3.11	Parámetros reológicos del modelo de Carreau de las mezclas de almidón nativo al 2% con GMK, a 25 y 40 °C	63
Cuadro 3.12	Parámetros reológicos del modelo de la potencia del almidón acetilado al 4 y 2% con y sin GMK, a 40 y 25 °C	65
Cuadro 3.13	Parámetros reológicos del modelo de Carreau de las mezclas de almidón acetilado al 2% con GMK al 0.3 y 0.5%, a 40 y 25°C	67

ÍNDICE DE FIGURAS

		Página
Figura 1.1	Estructura del almidón	8
Figura 1.2	a) Cambios morfológicos y de viscosidad durante el calentamiento de los gránulos de almidón. b) Curvas de gelatinización (amilogramas) de diferentes almidones	10
Figura 1.3	Modificaciones del almidón	13
Figura 1.4	Clasificación de los comportamientos reológicos	19
Figura 1.5	Curvas típicas de fluidos independientes del tiempo de cizallamiento (esfuerzo de cizalla en función de la velocidad de cizalla)	22
Figura 1.6	Curvas de la viscosidad en función de la velocidad de cizalla	22
Figura 1.7	Ajuste al modelo de Carreau	25
Figura 1.8	Respuesta del esfuerzo de diferentes materiales a una deformación sinusoidal	28
Figura 1.9	Micrografía electrónica de barrido del almidón de papa	30
Figura 1.10	Amilograma de almidón de papa nativo al 12.5% p/p	31
Figura 1.11	Curvas de flujo a diferentes temperaturas de almidón de papa gelatinizado	32
Figura 1.12	Espectro mecánico de geles de almidón de papa al 4-6% de concentración	33
Figura 1.13	Tubérculos de <i>Amorphophallus konjac</i>	34
Figura 1.14	Proceso de obtención del glucomanano de konjac	35
Figura 1.15	Estructura del glucomanano de konjac	36
Figura 1.16	a) Efecto de la velocidad de cizalla en la viscosidad de diferentes concentraciones de GMK. b) Efecto de la velocidad de cizalla y la temperatura en la viscosidad del GMK al 1%	37
Figura 1.17	Espectros mecánicos de dispersiones de GMK a diferentes concentraciones	38
Figura 3.1	Amilograma de almidón de maíz nativo	46
Figura 3.2	Amilograma del almidón nativo y acetilado	47

Figura 3.3	Amilogramas del almidón nativo al 4% con y sin glucomanano de konjac al 0.15, 0.3 y 0.5%	49
Figura 3.4	Amilogramas del almidón nativo al 2% con y sin glucomanano de konjac al 0.15, 0.3 y 0.15%	50
Figura 3.5	Amilogramas del almidón acetilado al 4% con y sin glucomanano de konjac al 0.15, 0.3 y 0.5%	53
Figura 3.6	Amilogramas del almidón acetilado al 2% con y sin glucomanano de konjac al 0.15, 0.3 y 0.5%	54
Figura 3.7	Curvas de flujo del almidón nativo al 4% con y sin GMK a 25 °C	56
Figura 3.8	Curvas de flujo (ascenso) de las pastas de almidón nativo al 2 y 4% a 40 y 25 °C y de las mezclas almidón nativo 4%-GMK a 40 °C	57
Figura 3.9	Curvas de viscosidad en función de la velocidad de cizalla (ascenso) de las mezclas almidón-glucomanano de konjac a 25 y 40 °C	60
Figura 3.10	Curvas de viscosidad en función de la velocidad de cizalla (ascenso) del glucomanano de konjac	60
Figura 3.11	Curvas de flujo (ascenso) del almidón acetilado al 4 y 2% con y sin GMK, a 40 y 25 °C	64
Figura 3.12	Curvas de viscosidad en función de la velocidad de cizalla (ascenso) de las mezclas almidón acetilado al 2%-GMK al 0.3 y 0.5% a 25 y 40 °C	66
Figura 3.13	Zona viscoelástica lineal del almidón nativo y acetilado al 4% con y sin GMK al 0.5%	68
Figura 3.14	Zona viscoelástica lineal del glucomanano de konjac al 0.5%	68
Figura 3.15	Espectro mecánico del glucomanano de konjac al 0.5% y del almidón nativo y acetilado al 4% con y sin glucomanano	70
Figura 3.16	Variación de la $\tan \delta$ en función de la velocidad angular de las pastas de almidón nativo y acetilado con y sin glucomanano de konjac	71
Figura 3.17	Variación de la $\tan \delta$ en función de la velocidad angular del glucomanano de konjac a 0.5	71

RESUMEN

Las mezclas de almidón-polisacárido se utilizan en la industria de los alimentos para mejorar la textura y estabilidad de los productos, además de que reducen costos. Sin embargo, el efecto del glucomanano de konjac (GMK) en la gelatinización de almidones de papa, así como en sus propiedades reológicas han sido poco estudiados, por ello el objetivo principal de esta investigación fue evaluar el efecto de diferentes concentraciones de GMK (0.15, 0.3 y 05%) en la gelatinización de almidones de papa (nativo y acetilado) a 2 y 4%.

Se realizó el seguimiento del desarrollo de la viscosidad durante la gelatinización mediante amilogramas en un reómetro con un dispositivo de paletas. Se determinaron las propiedades viscoelásticas con una placa rugosa, mientras que las propiedades de flujo se determinaron con un dispositivo cilíndrico a 40 y 25°C.

Se observó que el GMK aumentó la viscosidad de los almidones durante la gelatinización. Las mezclas que contenían la mayor concentración tanto de almidón como de GMK presentaron picos de viscosidad mayores, disminuyendo la temperatura a la que se alcanza la viscosidad máxima. Asimismo, se observó que las dispersiones que contenían GMK presentaron porcentajes menores de aumento de viscosidad, en comparación a las dispersiones que solamente contenían almidón, además de que el GMK disminuyó la estabilidad al tratamiento térmico y al cizallamiento.

Solamente las curvas de flujo de las pastas con la mayor concentración (4%) de almidón nativo y sus mezclas con GMK, a 25 °C, presentaron tixotropía (bucle de histéresis). Las curvas de flujo de ascenso de la velocidad de cizalla a 40 °C se ajustaron al modelo de la potencia, mientras que las mezclas con esta concentración de almidón, pero a una temperatura de 25 °C se ajustaron al modelo de Carreau.

El mismo comportamiento se presentó en las mezclas con la menor concentración de almidón (2%) a ambas temperaturas. Lo mismo ocurrió con las curvas de flujo de las pastas de almidón acetilado y sus mezclas con GMK, sin embargo, las curvas que contenían este almidón se ajustaron en su mayoría al modelo de la potencia.

En cuanto a las propiedades viscoelásticas, determinadas dentro la zona de viscoelasticidad lineal, el almidón gelatinizado y las mezclas presentaron un predominio del comportamiento sólido viscoelástico, mientras que para el glucomanano konjac predominó el comportamiento de un fluido viscoelástico.

INTRODUCCIÓN

El almidón es un carbohidrato ampliamente utilizado en la industria de los alimentos ya que contribuye en las propiedades de textura, actuando como espesante, estabilizador coloidal, gelificante y agente de retención de agua (Singh *et al.*, 2003).

Comercialmente se extrae de diversas fuentes botánicas como cereales (maíz, trigo, arroz, etc.) y tubérculos (papa, tapioca, camote, etc.). Se encuentra en forma de gránulos insolubles semi-cristalinos con diferentes niveles de cristalinidad (Copeland *et al.*, 2009), estos gránulos se componen principalmente de dos polisacáridos, amilosa y amilopectina; la amilosa es un polímero esencialmente lineal, que consiste en unidades de D-glucosa unidas por enlaces glucosídicos $\alpha(1-4)$, mientras que la amilopectina es un polímero altamente ramificado que consiste, al igual que la amilosa, en unidades de D-glucosa unidas en un 94 a 95% por enlaces $\alpha(1-4)$ y aproximadamente 5% por enlaces $\alpha(1-6)$, dichas ramificaciones están localizadas aproximadamente cada 15-25 unidades lineales de glucosa y se asocia exclusivamente a la zona cristalina del gránulo (Ai y Jane, 2015).

La cristalinidad de los gránulos de almidón es a menudo un factor básico que influye en las propiedades funcionales, debido a que el colapso del orden cristalino durante la gelatinización provoca cambios irreversibles, tales como, el desenrollamiento y disociación de las dobles hélices, produciendo geles suaves y películas débiles (Singh *et al.*, 2003).

Cuando los almidones son sometidos a altas temperaturas en presencia de agua, los gránulos se hinchan y se rompen debido a la interrupción de doble hélices de amilopectina por la formación de puentes de hidrógeno con el agua, mientras que la amilosa se filtra preferentemente fuera de los gránulos hinchados, cambiando el orden cristalino del almidón a una forma amorfa. Estos eventos, conocidos como gelatinización, se acompañan de un aumento en la viscosidad (Khanna y Tester, 2006).

La fuente botánica de los almidones hace que tengan diferentes características en cuanto a tamaño y forma de los gránulos, peso molecular, contenido de amilosa y amilopectina, grado de cristalinidad; estas características influyen en la temperatura a la que inicia la gelatinización, la temperatura a la cual se alcanza la máxima viscosidad y el valor de ésta. Asimismo, la viscosidad puede decaer en mayor o menor medida en los diferentes almidones si se continúa el calentamiento y aumentar en mayor o menor medida durante el enfriamiento.

Para mejorar el desempeño de los almidones en las diferentes aplicaciones se recurre a realizarles diversas modificaciones físicas o químicas enfocadas a que se hidraten sin necesidad de calentar (pregelatinización), a modificar las curvas de viscosidad en función de la temperatura durante la gelatinización (sustitución, entrecruzamiento) a impartirles propiedades lipofílicas, entre otras (Singh *et al.*, 2007).

Es también muy común el empleo de otros polisacáridos, junto con almidones nativos o modificados, para impartir mejores características reológicas, texturales y de estabilidad a diferentes productos, mejorando su calidad, además de reducir costos y/o facilitar su procesamiento, ya que sus interacciones modifican la viscosidad, el proceso de gelatinización y retrogradación (Shi y BeMiller, 2002).

Se han realizado diversos estudios sobre el efecto de otros polisacáridos (xantana, carrageninas, carboximetilcelulosa, goma guar y goma algarrobo) en la gelatinización de diferentes almidones (Shi y BeMiller, 2002; Funami *et al.*, 2005; Chaisawang y Suphantharika, 2005; Zhou *et al.*, 2008; BeMiller, 2011; Heyman *et al.*, 2013; Chandanasree *et al.*, 2016), entre ellos el almidón de papa y sus derivados que se caracterizan por poseer grandes gránulos con un considerable poder de hinchamiento que le proporcionan propiedades especiales como una baja temperatura de gelatinización y altas viscosidades (Grommers y Van der Krogt, 2009).

Sin embargo, el efecto del glucomanano de konjac en la gelatinización de almidones ha sido poco estudiado. El glucomanano de konjac es un polisacárido esencialmente lineal compuesto por bloques de unidades de manosa y glucosa unidos por enlaces glucosídicos β (1-4), es considerado una fibra baja en calorías, útil en la reducción de los niveles de colesterol y prebiótico además de tener una alta capacidad de retención de agua (Shah *et al.*, 2015; Wang *et al.*, 2012) lo cual le da la pauta para utilizarlo en conjunto con almidones dentro de la industria de los alimentos. Khanna y Tester (2006) determinaron la influencia del glucomanano de konjac en las propiedades de gelatinización de almidones de maíz y papa mediante calorimetría diferencial de barrido con humedad restringida y en exceso; encontrando que el glucomanano de konjac extendió la endoterma de la gelatinización de almidón y por lo tanto aumenta la temperatura final de gelatinización, concluyendo que esto se debía al efecto secuestrante del glucomanano, que limita la cantidad de agua disponible para que el almidón se gelatinizara. No obstante, no se ha evaluado dicho efecto en el desarrollo de viscosidad, propiedad importante en el desarrollo de productos, por lo que en esta investigación se propone su estudio.

CAPÍTULO I. ANTECEDENTES

1.1. Almidón

El almidón es el principal polisacárido de las especies botánicas y fuente de energía; se encuentra en forma de gránulos insolubles semi-cristalinos en los tejidos de almacenamiento de las plantas (semillas, tubérculos, raíces y tallos) y se produce también en menor medida en la mayoría en los tejidos vegetativos (Singh *et al.*, 2003; Copeland *et al.*, 2009).

Al encontrarse en una amplia gama de tejidos, entre y dentro de muchas especies, el almidón presenta variaciones en el tamaño de los gránulos (aproximadamente de 1-100 μm de diámetro), forma (redonda, lenticular, poligonal), distribución de tamaño (uni o bi-modal), asociación como agrupaciones individuales (simples) o de gránulos (compuestos) y la composición (lípidos, humedad, proteína y minerales) que reflejan el origen botánico (Tester *et al.*, 2004); algunas de estas características se presentan en el Cuadro 1.1.

Cuadro 1.1 Características de los gránulos de almidón de diferentes fuentes botánicas (Tester *et al.*, 2004).

Almidón	Tipo	Forma	Distribución	Tamaño (μm)
Cebada	Cereal	Lenticular (tipo-A), Esférico (tipo-B)	Bimodal	15-25 2-5
Maíz (céreo y normal)	Cereal	Esférico/poliedrico	Unimodal	2-30
Amilomaíz	Cereal	Irregular	Unimodal	2-30
Mijo	Cereal	Poliedro	Unimodal	4-12
Avena	Cereal	Poliedro	Unimodal	3-10 (simple) 80 (completo)
Frijol	Legumbre	Reniforme	Unimodal	5-100
Papa	Tubérculo	Lenticular	Unimodal	5-100
Arroz	Cereal	Poliedro	Unimodal	3-8 (simple) 150 (completo)
Centeno	Cereal	Lenticular/esférico	Bimodal	10-40
Sorgo	Cereal	Esférico	Unimodal	5-20
Tapioca	Raíz	Esférico/lenticular	Unimodal	5-45
Trigo	Cereal	Lenticular	Bimodal	15-35

Este polisacárido es ampliamente utilizado en la industria de los alimentos ya que contribuye en gran medida a las propiedades de textura, tiene muchas aplicaciones industriales como espesante, estabilizador coloidal, agente gelificante y agente de retención de agua (Singh *et al.*, 2003); debido a su gran variabilidad, los almidones presentan diversas propiedades, además de que su producción es económica debido a que se puede aislar fácilmente mediante sedimentación por gravedad, centrifugación y filtración, y puede ser sometido a modificaciones químicas, físicas y enzimáticas con el lavado y el tratamiento posterior (Jane, 2009).

1.1.1. Estructura

Los almidones se componen de dos polisacáridos, amilosa y amilopectina, que representan aproximadamente 98 a 99% del peso seco; la amilosa es un polisacárido esencialmente lineal, que consiste de moléculas de D-glucosa unidas por enlaces glucosídicos $\alpha(1-4)$, mientras que la amilopectina es un polímero altamente ramificado que consiste, al igual que la amilosa, en unidades de D-glucosa unidas en un 94 a 95% por enlaces $\alpha(1-4)$ y aproximadamente 5% por enlaces $\alpha(1-6)$, dichas ramificaciones están localizadas aproximadamente cada 15-25 unidades lineales de glucosa y se asocia exclusivamente a la zona cristalina del gránulo (Figura 1.1); la relación de los dos polisacáridos varía según el origen botánico del almidón (Ai y Jane, 2015; Tester *et al.*, 2004).

La diferencia en la estructura de ambos polisacáridos hace que tengan distintas propiedades. Por ejemplo, la amilosa tiene una alta tendencia a retrogradar, produce geles duros y películas fuertes, mientras que la amilopectina, en una dispersión acuosa, es más estable, produce geles suaves y películas débiles (Jane, 2009).

En términos generales el almidón consiste en aproximadamente 70 a 80% de amilopectina y 20-30% de amilosa, algunos cereales como el maíz, el sorgo y el arroz tienen variedades céreas que consisten principalmente de amilopectina y 0-8% de amilosa; hay otras que tienen hasta 90% de amilosa. Además de estos polisacáridos, la mayoría de los almidones de cereales también contienen lípidos,

incluyendo fosfolípidos, los cuales parecen estar asociados con la fracción de amilosa, éstos tienen un impacto significativo en la temperatura de gelatinización, viscosidad, en la estabilidad y claridad, así como en velocidad de retrogradación de las pastas. Además, muchos almidones de tubérculos y raíces tienen derivados de monoéster fosfato (Lui, 2005; Jane, 2009; Ai y Jane, 2016; Badui, 2012).

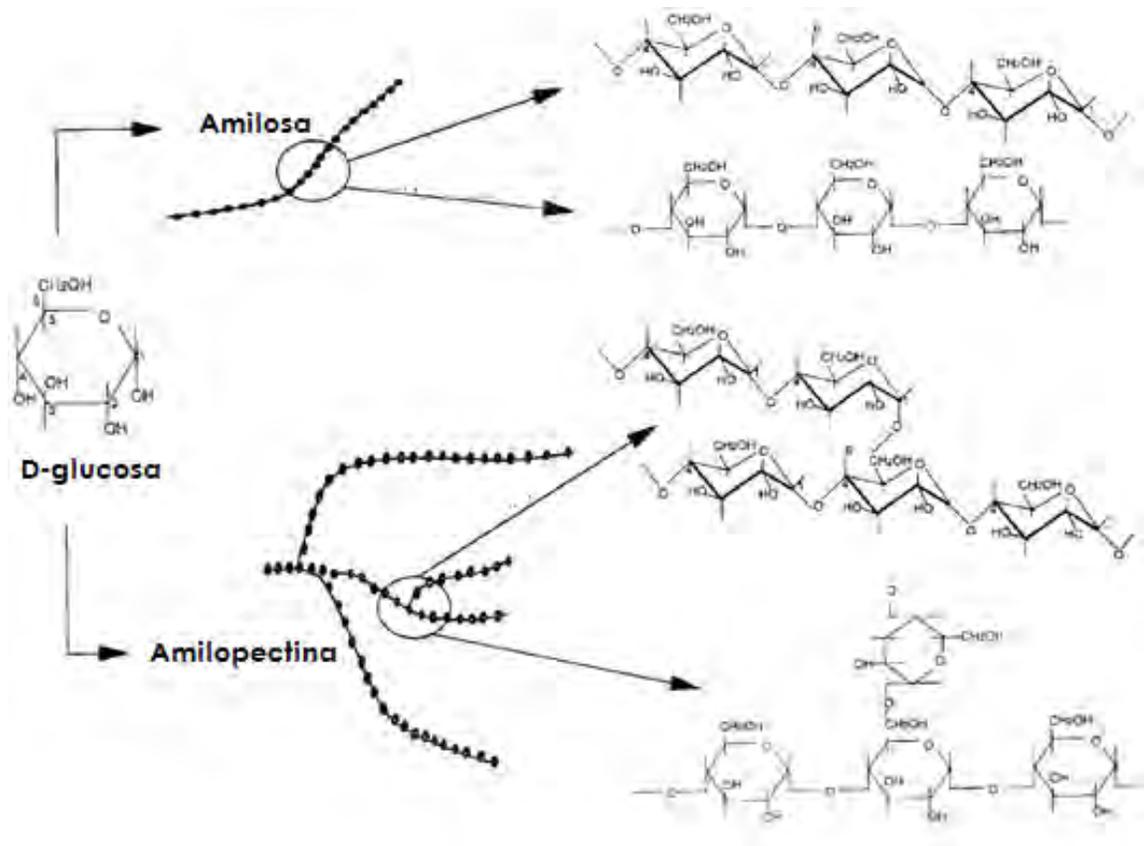


Figura 1.1 Estructura del almidón (Taggart, 2004).

1.1.2. Gelatinización

Los gránulos de almidón son insolubles en agua fría, debido a que su estructura está altamente organizada, presenta una gran estabilidad por las múltiples interacciones que existen con sus dos polisacáridos constituyentes; cuando se calientan en presencia de exceso de agua, se someten a una transición de fase orden-desorden denominada gelatinización (Badui, 2012). La transición de fase está asociada con la difusión de agua en el gránulo, la absorción de agua en las zonas

amorfos (amilosa), esto debido a que son las menos organizadas y las más accesibles, ya que los puentes de hidrógeno no son tan numerosos ni rígidos como en las zonas cristalinas (amilopectina); además los gránulos se hinchan y pierden la birrefringencia óptica, hay absorción de calor, pérdida del orden cristalino, desenrollamiento y disociación de dobles hélices (en las zonas cristalinas) y lixiviación de la amilosa; todo lo cual da lugar a una masa viscosa que puede ser descrita por un sistema de dos fases compuesto por una fase dispersa de gránulos hinchados y de una fase continua de amilosa lixiviada (Hoover, 2001; Fennema, 2010; Lui, 2005).

Quizá el método más común para el estudio de la gelatinización del almidón es el estudio de los cambios en la viscosidad durante un proceso de calentamiento-enfriamiento (Eliasson y Gudmundsson, 2006). Los cambios de viscosidad de dispersiones de almidón durante la gelatinización se miden con mayor frecuencia con el viscoamilógrafo de Brabender que se utiliza en la industria alimentaria como un instrumento de control de calidad; la velocidad de calentamiento es generalmente de 1.5 °C / min, y se realiza a velocidades de rotación constante. Después de mantener la dispersión típicamente a 95 °C por 10 a 30 minutos se lleva a cabo un enfriamiento a 1.5 °C / min. La viscosidad, medida en unidades Brabender (BU), se registra como una función de la temperatura (Eliasson y Gudmundsson, 2006; Ai y Jane, 2015).

En la Figura 1.2a se muestra un perfil característico de los cambios morfológicos de los gránulos de almidón y de viscosidad que ocurren durante la gelatinización, mientras que en la Figura 1.2b se muestran curvas de gelatinización (amilogramas) de algunos almidones. A medida que incrementa la temperatura, los gránulos comienzan a hincharse aumentando varias veces su volumen, lo que provoca un aumento de viscosidad; la temperatura en el inicio de este aumento se le conoce como temperatura de gelatinización y la viscosidad máxima que se alcanza, como pico de viscosidad, ésta se produce en el punto de equilibrio entre el hinchamiento

y la lixiviación de la amilosa; tanto el pico de viscosidad como la temperatura de gelatinización indican la capacidad de unión entre el agua y el almidón.

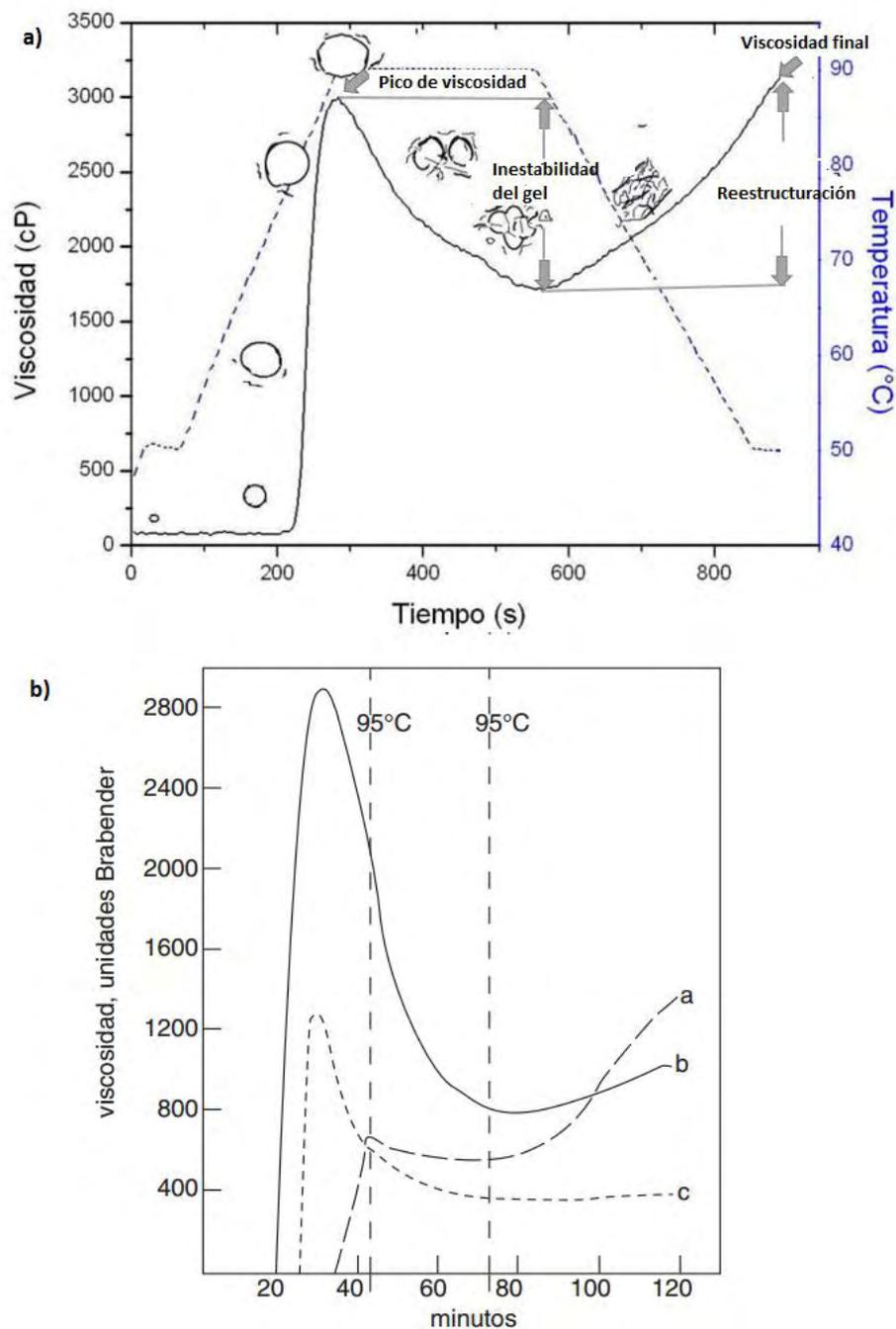


Figura 1.2 a) Cambios morfológicos y de viscosidad durante el calentamiento de los gránulos de almidón (Quintero-Castaño, 2016). b) Curvas de gelatinización (amilogramas) de diferentes almidones (Badui, 2012).

Cuando la temperatura se mantiene elevada durante un periodo de tiempo, se produce el rompimiento de los gránulos, posterior a esto, la amilosa y la amilopectina, fuertemente hidratadas, se dispersan, lo que disminuye la viscosidad de la pasta hasta un valor mínimo, a este proceso se le conoce como inestabilidad del gel o “breakdown”, este valor de viscosidad evalúa la estabilidad y resistencia del almidón al calor y al cizallamiento (Lui, 2005; Álzate-Carvajal *et al.*, 2013). A medida que disminuye la temperatura se produce una reorganización entre las moléculas de almidón, generalmente de la amilosa, esto provoca un aumento de viscosidad, a esta etapa de la gelatinización se le denomina de reestructuración o “setback”, y se asocia a la retrogradación, entre mayor sea el valor de viscosidad final alcanzada, los almidones son más susceptibles a sufrir retrogradación (Lui, 2005; Lucas-Aguirre y Quintero-Castaño, 2016).

Tanto la temperatura de gelatinización, como la viscosidad pico, la pérdida y aumento de viscosidad son propiedades características de cada almidón, dependen de varios aspectos, por ejemplo, el porcentaje de amilosa, la forma y tamaño del gránulo. En el Cuadro 1.2 se muestran dichas propiedades de algunos almidones; normalmente estas propiedades se miden usando viscoamilógrafos como el de Brabender y el visco-analizador rápido, también se pueden determinar mediante la observación de la pérdida de cruz de Malta utilizando un microscopio de polarización equipado con un sistema de calentamiento, la medición de la transparencia de una suspensión de almidón durante el calentamiento, o utilizando calorimetría diferencial de barrido debido a que la gelatinización es un proceso endotérmico (Ai y Jane, 2016).

La gelatinización del almidón también se puede lograr mediante el uso de soluciones químicas, tales como soluciones acuosas alcalinas (por ejemplo, NaOH y KOH), dimetilsulfóxido, y varias soluciones de sal neutra (por ejemplo, KI, KSCN, CaCl₂, y LiCl). Las soluciones acuosas de NaOH y KOH (0.5 M o superior) y dimetilsulfóxido (90%) se utilizan comúnmente para gelatinizar y dispersar el almidón. Una solución

de sulfato de sodio concentrado, sin embargo, se puede utilizar para aumentar la temperatura de gelatinización del almidón (Ai y Jane, 2016).

Cuadro 1.2 Temperatura de gelatinización y viscosidad pico de almidones nativos mediante visco-analizador rápido con 8% de almidón (Ai y Jane, 2015).

Almidón	Temperatura de gelatinización (°C)	Viscosidad máxima (RVU)	Pérdida de viscosidad (RVU)	Aumento de viscosidad (RVU)
Maíz	82	152	95	74
Maíz céreo	69.5	205	84	16
Arroz	79.9	113	96	64
Arroz céreo	64.1	205	84	16
Trigo	88.6	104	75	79
Cebada	91.2	88	58	58
Amaranto céreo	70.2	125	75	11
Tapioca	67.6	173	61	46
Papa	63.5	702	165	66
RVU: Unidades de viscosidad del visco-analizador rápido				

1.1.3. Modificaciones del almidón

Los almidones nativos tienen muchas desventajas para aplicaciones industriales tales como la insolubilidad en agua fría, la pérdida de viscosidad por efecto de la agitación a temperaturas altas (inestabilidad) y el poder de espesamiento después de la cocción. Además, la retrogradación se produce después de la pérdida de estructura ordenada en la gelatinización, lo que resulta en la sinéresis o separación de agua en los sistemas de alimentos ricos en almidón, es por ello que comúnmente se modifican para lograr propiedades funcionales deseables (Xie *et al.*, 2005).

Las modificaciones del almidón son un medio para alterar su estructura, afectando a los enlaces de hidrógeno de una manera controlable para mejorar y extender su aplicación, introduciendo pequeñas cantidades de grupos iónicos o hidrófobos en

las moléculas. Las alteraciones tienen lugar a nivel molecular, con poco o ningún cambio en la apariencia superficial del gránulo, por lo tanto, el origen botánico del almidón todavía se puede identificar microscópicamente (Taggart, 2004). Sin embargo, alteran sus propiedades, incluyendo viscosidad de la solución, el comportamiento de asociación, y estabilidad de almacenamiento en los productos finales. Otro propósito de la modificación del almidón es estabilizar los gránulos de almidón durante el procesamiento y hacer que el almidón sea adecuado para muchos alimentos y aplicaciones industriales (Xie *et al.*, 2005). El almidón puede ser modificado químicamente y físicamente, o a través de medios biotecnológicos. Algunas de las modificaciones se describen esquemáticamente en la Figura 1.3.

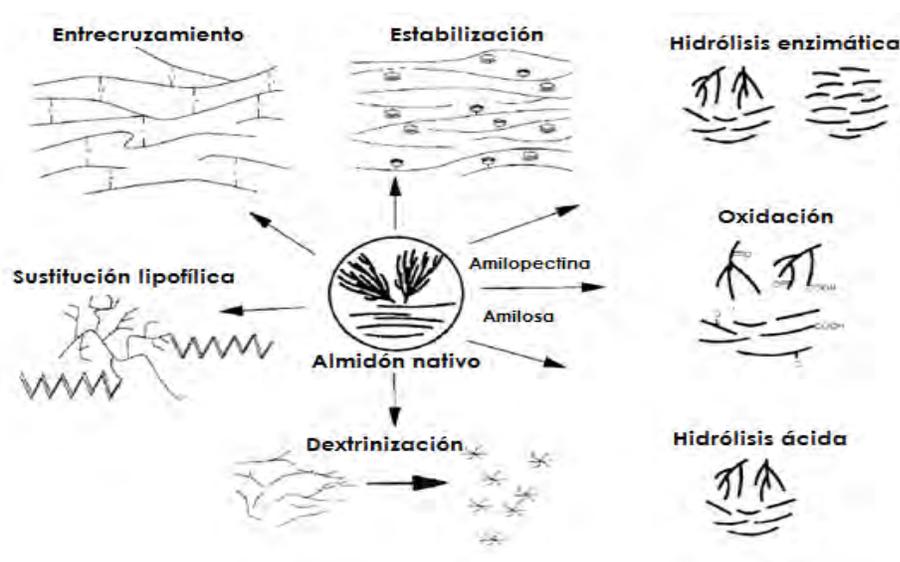


Figura 1.3 Modificaciones del almidón (Taggart, 2004).

1.1.3.1. Modificaciones físicas

Los métodos de modificación físicos implican el tratamiento de los gránulos de almidón nativo bajo diferentes combinaciones de temperatura, humedad, presión, cizallamiento e irradiación. La modificación física incluye también el desgaste mecánico para alterar el tamaño físico de los gránulos de almidón (Xie *et al.*, 2005). Una de las modificaciones físicas más importantes es la pregelatinización, los almidones pregelatinizados, también llamados instantáneos, a diferencia de los almidones nativos, son capaces de absorber agua e incrementar la viscosidad a

temperatura ambiente, es por ello que se han desarrollado para reducir los costos de energía en la producción de alimentos y para evitar la pérdida de vitaminas, agentes saborizantes, color y compuestos bioactivos, asociada a las altas temperaturas (Mason, 2009; Hedayati *et al.*, 2016a).

Los almidones pregelatinizados (PG) se producen usando secadores de tambor o de aspersión y por el proceso de extrusión; para su obtención los gránulos de almidón nativo son calentados en exceso de agua hasta su temperatura de gelatinización, posteriormente son recuperados por secado. Uno de los métodos comunes para la producción de estos almidones es el uso de secadores de tambor, ya que es la técnica más convencional debido a su eficiencia, bajos costos y alta tasa de producción. Los almidones PG en secadores de tambor pueden ser producidos por la cocción simultánea y el secado de suspensión de almidón en la superficie de los tambores calentados por vapor (100 °C) o la cocción puede ser en un gran recipiente de gelatinización para posteriormente ser secado en el tambor. Después de la pregelatinización, los almidones secos se retiran de los tambores por un rascador, se muelen y se tamizan (Hedayati *et al.*, 2016b).

1.1.3.2. Modificaciones químicas

La modificación química del almidón generalmente se lleva a cabo a través de reacciones de derivación tales como la estabilización (eterificación y esterificación) y el entrecruzamiento, y por descomposición como lo son la hidrólisis ácida, dextrinización y la oxidación. Algunas de estas modificaciones se muestran en el Cuadro 1.3. La mayoría de las modificaciones químicas consisten en la introducción de grupos sustituyentes en niveles relativamente bajos a través de la interacción con grupos hidroxilos de la molécula empleando reactivos químicos capaces de reaccionar en condiciones relativamente bajas (Singh *et al.*, 2007; Morikawa *et al.*, 2000).

Cuadro 1.3 Modificaciones del almidón y técnicas de obtención (Singh *et al.*, 2007).

Modificación	Tipo	Proceso
Conversión	Hidrólisis ácida parcial	Tratamiento con ácido hidroclicórico o ácido ortofosfórico o ácido sulfúrico
	Tratamiento alcalino	Tratamiento con hidróxido de sodio o hidróxido de potasio
	Oxidación	Tratamiento con ácido peracético y/o peróxido de hidrogeno, o hipoclorito de sodio o clorito de sodio, o dióxido de sulfuro, o permanganato de potasio
Derivación	Eterificación	Almidón hidroxipropilado-Eterificación con óxido de propileno
	Esterificación	Acetato de almidón. Esterificación con anhídrido acético o vinil acetato
		Adipato de di-almidón acetilado. Esterificación con anhídrido acético y anhídrido adípico
	Entrecruzamiento	Fosfato di-almidón-Esterificación con trimetafosfato de sodio
Fosfato monoalmidón-Esterificación con ácido ortofosfórico, o sodio		

Estas modificaciones pretenden proveer a los almidones de ciertas características, como, por ejemplo, de estabilidad al calor y al cizallamiento, lo cual se puede obtener a partir del entrecruzamiento, esta modificación refuerza los gránulos, uniendo grupos hidroxilo de polímeros adyacentes con enlaces covalentes, retardando así la tasa de hinchamiento y reduciendo la tendencia de ruptura, esto se logra introduciendo reactivos bifuncionales (Mason, 2009). Otra de las características que se pretenden proveer a los almidones es estabilidad a bajas temperaturas para evitar la retrogradación, lo cual se obtiene con la estabilización; en esta modificación se adicionan sustituyentes de bloqueo con el fin de impedir estéricamente la asociación de los polisacáridos dispersos del almidón y así evitar que éstos se alineen y retrograden (Taggart, 2004). Existen cuatro tipos de estabilización: acetilación (esterificación), hidroxipropilación (eterificación), monofosforilación (esterificación) y octenilsuccinilación; los primeros tres interfieren en la retrogradación y mejoran la estabilidad a temperaturas frías; mientras que la octenilsuccinilación proporciona un almidón con capacidad emulsionante (Mason, 2009).

El comportamiento y las propiedades logradas después de la modificación química depende, entre otras cosas, de la fuente de almidón, las condiciones de reacción (concentración de reactivos, tiempo de reacción, el pH y la presencia de catalizador), el tipo de sustituyente, el grado de sustitución, y la distribución del sustituyente en la molécula de almidón (Singh *et al.*, 2007; Frassen y Boeriu, 2014). Las propiedades y aplicaciones de algunos almidones modificados se presentan en el Cuadro 1.4.

Cuadro 1.4 Propiedades y aplicaciones de algunos almidones modificados (Singh *et al.*, 2007).

Tipo	Propiedades	Aplicaciones
Hidrolisis parcial ácida o parcial enzimática	Peso molecular del polímero reducido, exhibe viscosidad disminuida, retrogradación incrementada	Útil en confitería, masas y cubiertas
Oxidación blanqueamiento	Baja viscosidad, alta claridad y baja temperatura de estabilidad	Usado en masas y cubiertas de panificación para rellenos, en confitería como ligantes y formadores de película, en lácteos como modificadores de textura.
Eterificación	Mejora la claridad de las pastas de almidón, aumenta la viscosidad, reduce la sinéresis y funciona como estabilizador durante la descongelación	Usado en una amplia variedad de aplicaciones alimentarias tales como jugos, salsas, rellenos en pasteles de frutas y pudines
Esterificación	Bajas temperaturas de gelatinización, baja tendencia de formar geles y alta claridad en pasta	Usado en alimentos refrigerados y congelados, estabilizador de emulsiones y encapsulador
Entrecruzamiento	Alta estabilidad de los gránulos durante la hidratación, altas temperaturas, altas condiciones de cizalla y acidez.	Usado para aumentar la viscosidad y textura en sopas, salsas, jugos, productos de panadería y lácteos

1.1.3.2.1. Acetilación

El almidón acetilado se obtiene por esterificación con anhídrido acético, vinil acetato o ácido acético, es por ello que durante este proceso los grupos hidroxilo de las unidades de glucosa se convierten en grupos CH_3COO^- (Colussi *et al.*, 2015). La acetilación se utiliza principalmente para reducir la sinéresis y cambios de textura en almidones de maíz céreos, tapioca y papa utilizados en alimentos refrigerados y congelados; también se utiliza para reducir la gelificación de pastas de almidón de maíz normales y para aumentar la facilidad de cocción en almidones de maíz con alto contenido de amilosa (Mason, 2009).

La introducción de los grupos acetilo interrumpe la estructura ordenada del almidón nativo e interfiere con la reasociación de moléculas de amilosa y amilopectina en el almidón gelatinizado, dando lugar a una disminución de la temperatura de gelatinización, un aumento o disminución de hinchamiento y solubilidad junto con la estabilidad en el almacenamiento (Bello-Pérez *et al.*, 2010). Los cambios promovidos por la acetilación dependen de la fuente botánica, el grado de sustitución, la proporción amilosa-amilopectina y de la estructura molecular del almidón. En la reacción de acetilación, el número de grupos acetilo incorporados en la molécula de almidón y el rendimiento de la reacción dependen del tipo de reactivo, concentración, pH, presencia de catalizador, tiempo de reacción, origen botánico y características del tamaño de los gránulos de almidón (Colussi *et al.*, 2015).

Las aplicaciones de este almidón están reguladas por sus características, tales como el grado de acetilación o grado de sustitución (GS) y el porcentaje de grupos acetilo (% Ac). Estas características determinan el uso de estos almidones, por ejemplo, para la aplicación en alimentos, la Administración de Alimentos y Medicamentos de Estados Unidos (FDA, por sus siglas en inglés) recomienda un porcentaje de grupos acetilo menor al 2.5% (Bello-Pérez *et al.*, 2010)

1.1.4. Reología de pastas y geles de almidón

Las propiedades reológicas de un material se definen como el comportamiento de deformación o flujo en respuesta a un esfuerzo aplicado (Steffe, 1996). En la caracterización de las propiedades reológicas del almidón, la viscosidad es una propiedad importante ya que éstos se utilizan a menudo como espesantes en diferentes aplicaciones. Las características reológicas de las pastas y geles de almidón dependen de muchos factores, incluyendo su estructura química, concentración, las condiciones de la gelatinización (por ejemplo, temperatura, velocidad de cizalla, y velocidad de calentamiento), y las condiciones de almacenamiento: temperatura y tiempo (Ai y Jane, 2015).

Los eventos que se producen durante la gelatinización de una dispersión de almidón, especialmente el hinchamiento y la fuga de amilosa / amilopectina, cambiarán drásticamente las propiedades reológicas de ésta (Eliasson y Gudmundsson, 2006).

Con el fin de controlar las propiedades reológicas finales de los productos alimenticios a base de almidón, es necesario tener un mejor conocimiento de la influencia de la temperatura y velocidad de cizalla y su efecto acoplado sobre el comportamiento reológico de dispersiones de almidón para cada paso del proceso de fabricación (Lagarrigue y Álvarez, 2001).

Para comprender mejor el comportamiento reológico de las dispersiones de almidón es importante conocer algunos conceptos, como: esfuerzo de cizalla, deformación y velocidad de cizalla. El esfuerzo de cizalla, denotado por el símbolo, σ , es el componente de fuerza aplicada tangencialmente. Es igual a la fuerza (vector) dividida por el área de aplicación y se expresa en unidades de fuerza por unidad de área (Pa) (Rao, 2014). La deformación que es denotada por el símbolo, γ , es el cambio relativo de dimensión o de forma de un material al aplicarle un esfuerzo, dicha deformación puede ser angular (tangencial) o longitudinal en función de la dirección del esfuerzo aplicado, denominados esfuerzo de cizalla o esfuerzo de compresión o extensión, según la dirección de la aplicación (Steffe,1996). Por

último, la derivada de la deformación con respecto al tiempo de cizallamiento, es definida como velocidad de cizalla, denotada por el símbolo, $\dot{\gamma}$, es el gradiente de velocidad establecido en un fluido como resultado de la aplicación de un esfuerzo de cizalla, dividido por el espesor de la zona cizallada. Se expresa en unidades de segundos recíprocos, s^{-1} (Rao, 2014). Teniendo en cuenta los conceptos anteriormente definidos, el comportamiento reológico de los materiales implica la cuantificación de la función entre de éstos, y las propiedades reológicas resultantes tales como el comportamiento al flujo y la viscoelasticidad (Day y Golding, 2016).

Los materiales sólidos y fluidos se pueden clasificar de acuerdo con su comportamiento reológico. En la Figura 1.4 se muestran la clasificación reológica de los materiales, los cuales se clasifican en sólidos, fluidos y en materiales que presentan ambos comportamientos, como lo son, los viscoelásticos (en ciertas condiciones las dispersiones de almidón presentan este comportamiento).

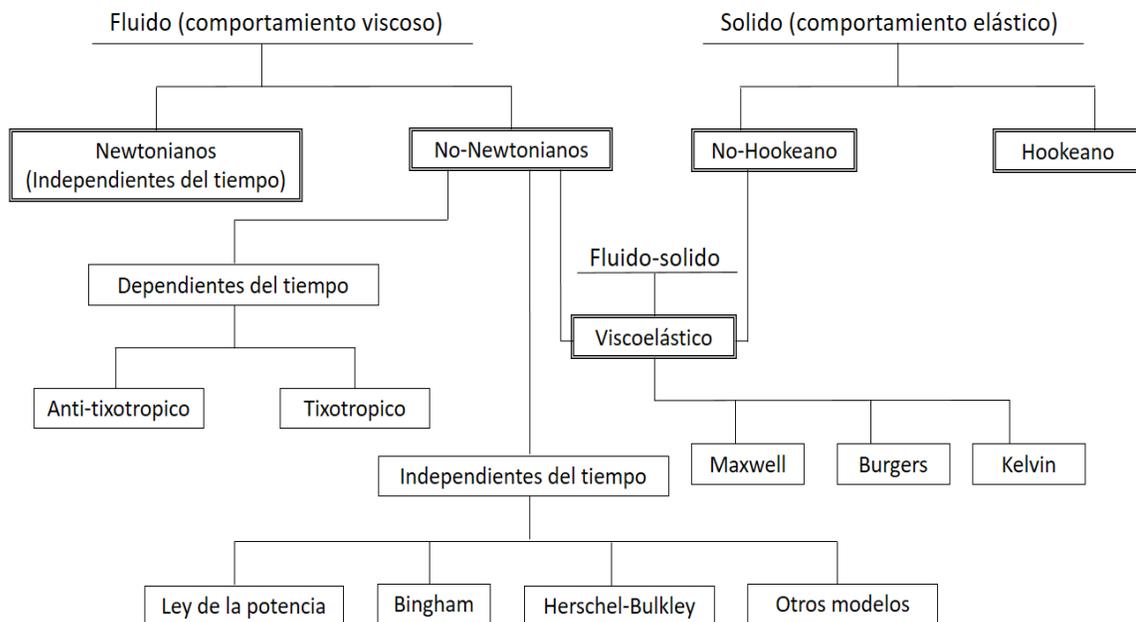


Figura 1.4 Clasificación de los comportamientos reológicos (Steffe, 1996).

1.1.4.1. Comportamiento al flujo

Una de las propiedades fundamentales, que caracterizan el comportamiento al flujo de los alimentos fluidos, es la viscosidad, ya que el comportamiento elástico es tan pequeño que se puede despreciar, la viscosidad es una propiedad intrínseca y una medida de la resistencia de un fluido al movimiento (flujo) cuando se aplica una velocidad de cizalla (o esfuerzo de cizalla, menos común en el estudio del flujo de materiales fluidos). El comportamiento al flujo de los materiales bajo cizalla se clasifica como newtoniano o no-newtoniano, la clasificación se basa en su relación de esfuerzo de cizalla-velocidad de deformación de cizalla (o velocidad de cizalla) y puede ser descrito por medio de diagramas de esfuerzo de cizalla o viscosidad en función de la velocidad de cizalla (Steffe, 1996).

1.1.4.1.1. Fluidos Newtonianos

Los fluidos newtonianos son aquellos en donde el esfuerzo de cizalla es directamente proporcional a la velocidad de cizalla con un origen igual a cero. Los alimentos newtonianos típicos son aquellos que contienen compuestos de bajo peso molecular (por ejemplo, azúcares) y que no contienen grandes concentraciones de polímeros disueltos o suspendidos (por ejemplo, pectinas, proteínas, almidones) o sólidos insolubles. Algunos ejemplos son: agua, jarabes de azúcar, la mayoría de las mieles, la mayoría de las bebidas carbonatadas, aceites comestibles, jugos filtrados y leche (Rao, 2014). El comportamiento newtoniano está descrito por la Ecuación 1.1.

$$\sigma = \eta \dot{\gamma} \quad (1.1)$$

1.1.4.1.2. Fluidos no-newtonianos independientes al tiempo de cizallamiento

Los fluidos no-newtonianos son aquellos en donde la relación entre el esfuerzo de cizalla y la velocidad de cizalla no es lineal, y en algunos fluidos la curva que describe su comportamiento no comienza en el origen, presentando así, un esfuerzo de cedencia (σ_0), el cual es definido como el esfuerzo requerido para que un material comience a fluir y se relaciona con el nivel de estructura interna del material

que debe ser destruida antes de que ocurra el flujo. La cuantificación del esfuerzo de cedencia debe hacerse con cuidado debido a que el valor obtenido depende de la técnica analítica (Rao, 2014; Steffe, 1996). El comportamiento al flujo de los fluidos no-newtonianos independientes del tiempo de cizalla dependen solamente de la velocidad de cizallamiento. Se han reportado varios modelos reológicos que describen el comportamiento independiente del tiempo de cizallamiento de los alimentos fluidos, los cuales se muestran en el Cuadro 1.5.

Cuadro 1.5 Modelos reológicos que describen el comportamiento de fluidos independientes del tiempo de cizallamiento (Steffe, 1996; Rao, 2014).

Modelo	Ecuación
Ostwald de Waele (potencia)	$\sigma = K\dot{\gamma}^n$
Bingham	$\sigma = \sigma_0 + \eta\dot{\gamma}$
Herschel Bulkley	$\sigma = \sigma_0 + K\dot{\gamma}^n$
Ellis	$\eta = \frac{\eta_0}{1 + \left(\frac{\sigma}{\sigma_{1/2}}\right)^{\alpha-1}}$
Carreau	$\eta_a = \eta_\infty + \frac{\eta_0 - \eta_\infty}{[1 + (\lambda_c\dot{\gamma})^2]^n}$

Un modelo reológico puede ser considerado como una ecuación matemática que puede representar datos reológicos, tales como el esfuerzo de cizalla y viscosidad, en función de la velocidad de cizalla, en un diagrama básico que los relaciona (Figura 1.5 y 1.6), y que proporciona de una manera conveniente y concisa el comportamiento de los materiales (Rao, 2014). A continuación, se describen los más comunes.

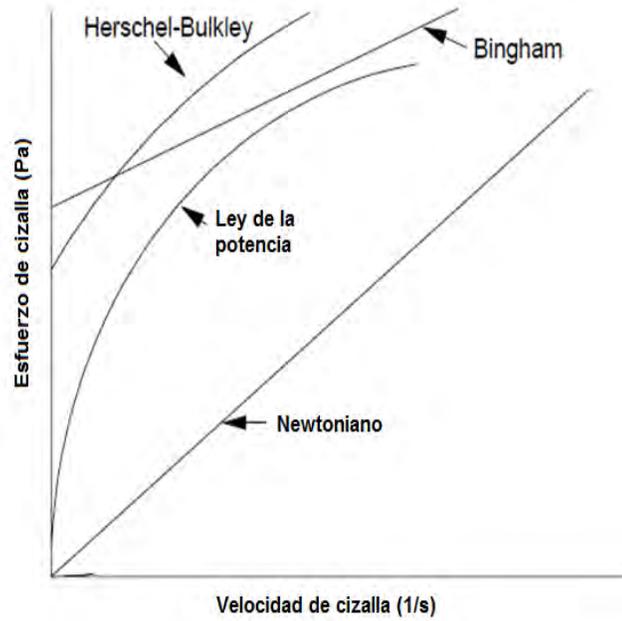


Figura 1.5 Curvas típicas de fluidos independientes del tiempo de cizallamiento (esfuerzo de cizalla en función de la velocidad de cizalla) (Steffe, 1996).

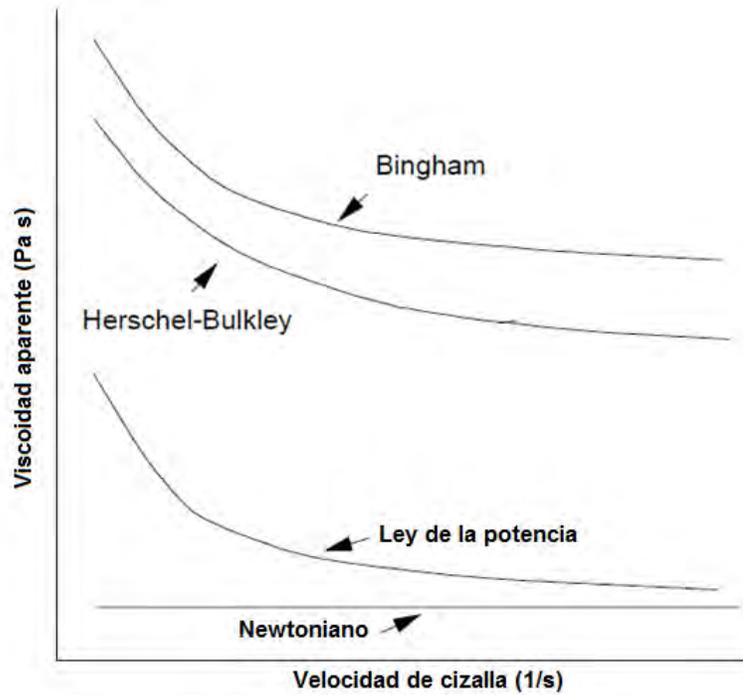


Figura 1.6 Curvas de la viscosidad en función de la velocidad de cizalla (Steffe, 1996).

Ostwald de Waele (potencia)

Para los fluidos Ostwald de Waele denominados fluidos de la potencia, la relación esfuerzo de cizalla-velocidad de cizalla esta descrita por la Ecuación 1.2.

$$\sigma = k\dot{\gamma}^n \quad (1.2)$$

Donde k es el índice de consistencia y cuyas unidades son: $Pa \cdot s^n$ y el exponente n es el índice de comportamiento al flujo, el cual es adimensional y refleja la cercanía a un flujo newtoniano. Para el caso de un fluido newtoniano ($n = 1$), el índice de consistencia es igual a la viscosidad del fluido (η). Cuando la magnitud de $n < 1$ el material es fluidificante a la cizalla y cuando $n > 1$ es espesante a la cizalla (Rao, 2014).

Bingham

Estos fluidos presentan un esfuerzo de cedencia (σ_0) y una vez que comienza a fluir su curva de flujo presenta una relación lineal igual a la de un fluido newtoniano la cual esta descrita por la Ecuación 1.3.

$$\sigma = \sigma_0 + \eta\dot{\gamma} \quad (1.3)$$

Herschel-Bulkley

Estos fluidos también presentan un esfuerzo de cedencia (σ_0), pero a diferencia de los fluidos plásticos de Bingham, la relación entre el esfuerzo de cizalla y la velocidad de cizalla no es lineal al igual que un fluido de la potencia. La Ecuación 1.4 describe este comportamiento.

$$\sigma = \sigma_0 + K\dot{\gamma}^n \quad (1.4)$$

Ellis

El modelo de Ellis se emplea cuando al utilizar el modelo de Ostwald de Waele (potencia) en curvas de viscosidad en función del esfuerzo de cizalla, se presentan desviaciones significativas de la viscosidad a esfuerzos de cizalla pequeños, este modelo consta de tres parámetros, los cuales se describen a continuación (Ec. 1.5).

$$\eta = \frac{\eta_0}{1 + \left(\frac{\sigma}{\sigma_{1/2}}\right)^{\alpha-1}} \quad (1.5)$$

Donde η_0 es la viscosidad a bajas velocidades de cizalla, σ es el esfuerzo de cizalla, $\sigma_{1/2}$ es el esfuerzo de cizalla en el que $\eta = \eta_0/2$ y α es una medida del grado de comportamiento fluidificante (cuanto mayor es el valor de α , mayor es el grado de acercamiento al modelo de Ostwald de Waele (potencia) (Chhabra y Richardson, 2008).

Carreau

El modelo de Carreau, al igual que el anterior, se emplea cuando hay desviaciones significativas en el modelo de la ley de Ostwald de Waele (potencia) a velocidades de cizalla muy altas y muy bajas, como se muestra en la Figura 1.7, por ello es necesario utilizar un modelo que tome en cuenta los valores límite de viscosidad η_0 y η_∞ como lo es el modelo de Carreau (Chhabra y Richardson, 2008), el cual lo describe la Ecuación 1.6

$$\eta_a = \frac{\eta_0}{[1 + (\lambda_c \dot{\gamma})^2]^{(1-n)/2}} \quad (1.6)$$

Donde η_0 es la viscosidad constante que se detecta en la zona a baja velocidad de cizalla, λ_c es el tiempo característico, el cual está relacionado con el tiempo de relajación y es recíproco de la velocidad de cizalla, calculada a partir de la intersección entre la región en donde la viscosidad desciende y la región de viscosidad constante en la curva de flujo (Martínez-Padilla *et al.*, 2004), n es el índice de comportamiento al flujo.

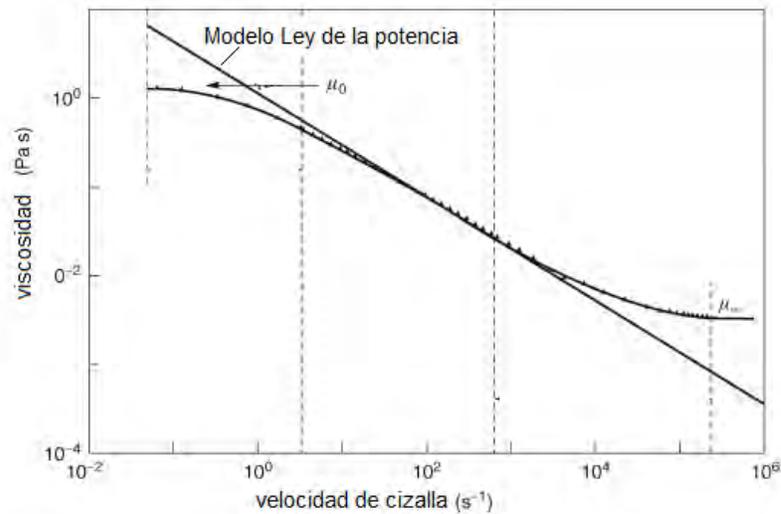


Figura 1.7 Ajuste al modelo de Carreau (Chhabra y Richardson, 2008).

1.1.4.1.3. Fluidos no-newtonianos dependientes al tiempo de cizallamiento

El comportamiento al flujo de muchos materiales no puede ser descrito por una reología simple, ya que la viscosidad puede depender no sólo de la velocidad de cizallamiento sino también del tiempo durante el cual el material ha sido sometido a este cizallamiento. Este comportamiento puede subdividirse en dos categorías: Tixotropía y Antitixotropía. La dependencia con el tiempo de cizallamiento ha sido atribuida a los cambios estructurales del material cizallado, que por lo general recupera su estado inicial cuando el cizallamiento cesa (Rao, 2014; Steffe, 1996).

El comportamiento más común observado en alimentos fluidos, es la tixotropía. Una curva de flujo típica, en donde se incrementa y disminuye la velocidad de cizalla progresivamente, muestra una diferencia entre las curvas de flujo registradas, denominado bucle de histéresis. Si la muestra se cizalla continuamente, se obtiene una curva de flujo que ya no depende del tiempo de cizallamiento, a esta curva se le denomina curva de flujo de equilibrio. Considerando que la cuantificación de la tixotropía es complicada, algunos investigadores la utilizan para hacer

comparaciones. Otros, utilizan la curva de ascenso de velocidad de cizalla, siempre y cuando se utilice el mismo programa de cizallamiento

1.1.4.2. Viscoelasticidad

El término viscoelasticidad significa que un material presenta simultáneamente propiedades elásticas de un sólido y propiedades viscosas de un fluido. Tanto las propiedades viscosas como las elásticas de un material se pueden observar bajo condiciones particulares, involucrando el tipo de deformación y el tiempo de observación; dependiendo de estas condiciones un mismo material puede mostrar diferentes comportamientos, por ejemplo: durante un corto periodo de tiempo un material viscoelástico parece ser principalmente elástico, mientras que durante un largo periodo de tiempo parece ser principalmente viscoso (Bourne, 2002; Barnes *et al.*, 1989; Steffe, 1996; Rao, 2014)

Para la determinación de las propiedades viscoelásticas, se pueden realizar dos tipos de estudios reológicos: ensayos o pruebas en condiciones de viscoelasticidad lineal y viscoelasticidad no lineal.

En las pruebas en condiciones de viscoelasticidad lineal, los datos se obtienen aplicando pequeñas deformaciones, las cuales no cambian la microestructura del material; una de las características de estas pruebas, es que las propiedades reológicas evaluadas solamente dependen del tiempo y no de la magnitud de la deformación o el esfuerzo aplicado y la relación esfuerzo-deformación y su derivada con el tiempo es lineal (Barnes *et al.*, 1989; Steffe, 1996). Por otra parte, las pruebas en condiciones de viscoelasticidad no lineal han sido menos estudiadas, ya que en ésta las propiedades viscoelásticas están en función tanto del tiempo como de la magnitud de la deformación o el esfuerzo aplicado (destrucción de la estructura durante la prueba).

- **Pruebas de cizalla oscilatoria de baja amplitud**

Las pruebas de cizalla oscilatoria de baja amplitud o pruebas dinámicas se han utilizado comúnmente para caracterizar el comportamiento viscoelástico de los alimentos en la región de viscoelasticidad lineal (Ahmed y Ramaswamy, 2006). Estas pruebas se realizan aplicando pequeñas deformaciones de cizalla sinusoidales en función del tiempo (t) y la frecuencia (ω), midiendo su respectivo esfuerzo de cizalla sinusoidal, las deformaciones de cizalla aplicadas pueden ser desde 0.01 hasta 5%, esto es para asegurar que la respuesta del alimento se encuentra en la zona de viscoelasticidad lineal (Gunasekaran y Mehmet, 2000).

El esfuerzo sinusoidal en respuesta a la aplicación de una deformación sinusoidal de una amplitud determinada (γ_0) a un material se describe en la Ecuación 1.7.

$$\sigma(t) = \gamma_0 G'(\omega) \sin(\omega t) + \gamma_0 G''(\omega) \cos(\omega t) \quad (1.7)$$

Donde se relacionan el módulo elástico o de almacenamiento (G') y el módulo viscoso o de pérdida (G''). El módulo de elástico es una medida de la energía de deformación almacenada en la muestra durante el proceso de cizalla, mientras que el módulo viscoso es una medida de la energía de deformación disipada en forma de calor. Otra propiedad viscoelástica dinámica es la $\tan \delta$ (δ , ángulo de desfase) conocida también como factor de amortiguamiento “damping factor” ($\tan \delta = G''/G'$), esta propiedad adimensional es una relación entre la energía disipada y la energía almacenada en cada ciclo de deformación. Su valor indica la tendencia del comportamiento del material, si $\delta = 0^\circ$ o $\tan \delta = 0$ corresponde a un material con comportamiento elástico y si $\delta = 90^\circ$ o $\tan \delta = \infty$, el material presenta un comportamiento viscoso, sin embargo, si el ángulo de desfase se encuentra dentro de los límites $0^\circ < \delta < 90^\circ$, el material presenta un comportamiento viscoelástico (Figura 1.8) (Steffe, 1996; Gunasekaran y Mehmet, 2000).

En una prueba de cizalla oscilatoria de baja amplitud, si G' es mucho mayor que G'' , el material se comportará más como un sólido; es decir, las deformaciones serán esencialmente elásticas o recuperables. Sin embargo, si G'' es mucho mayor que G' , la energía utilizada para deformar el material se disipa y el comportamiento del material es de tipo líquido (Rao, 2014).

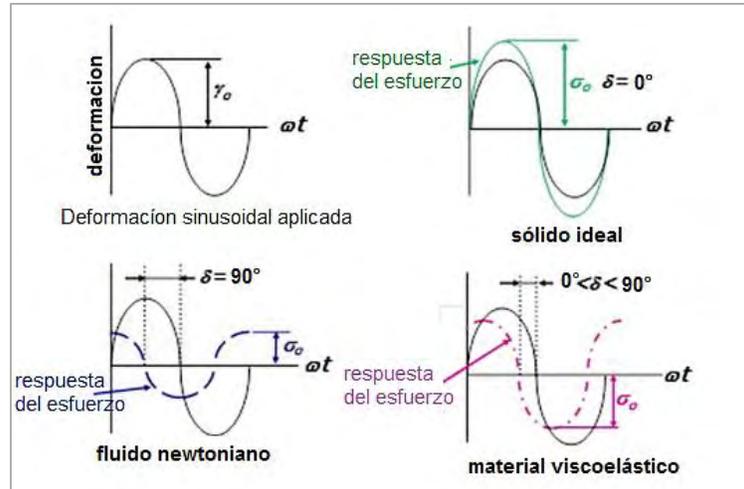


Figura 1.8 Respuesta del esfuerzo de diferentes materiales a una deformación sinusoidal (Zhong y Daubert, 2013).

En el caso de las propiedades reológicas de las dispersiones de almidón gelatinizado, Lagarrigue y Álvarez (2001) reportaron que éstas tienen un comportamiento no newtoniano dependiente del tiempo de cizallamiento y viscoelástico además que sus propiedades reológicas dependen en gran medida del procedimiento de gelatinización, dichas dispersiones se representan generalmente por el modelo de Ostwald de Waele (potencia) o de Herschel-Bulkley en el intervalo $1-1500 \text{ s}^{-1}$. El índice de consistencia, K , y el índice de comportamiento de flujo, n , dependen del tipo de almidón, concentración de almidón y la temperatura de medida.

1.2. Almidón de papa

La papa (*Solanum tuberosum L.*) es un tubérculo crecido en todo el mundo bajo una amplia gama de condiciones climáticas y del suelo. El almidón es un componente importante de la papa; hasta $85 \pm 87\%$ de la materia seca se compone de este polisacárido. Este almidón es único en comparación con los almidones de cereales, debido a su estructura molecular, composición, morfología del gránulo, ya que poseen gránulos de mayor tamaño y alto contenido de monoéster de fosfato (Zhou *et al.*, 2016). Se prefiere en la industria de los alimentos debido a que desarrolla alta viscosidad por el poder de hinchamiento de sus gránulos, presenta una baja temperatura de gelatinización (relacionada con las cargas negativas de sus grupos fosfato, ya que al repelerse desestabilizan la estructura de doble hélice de la amilopectina), alta transparencia (pequeña cantidad de lípidos y proteínas) y un sabor neutro (Ai y Ja., 2016; Gommers y Van der Krogt, 2009; Hoover, 2001).

Este almidón se emplea en aplicaciones industriales de alimentos, como espesante, estabilizador coloidal, agente gelificante y como agente de carga, sin embargo, tiene algunas limitaciones tales como baja resistencia a la cizalla y baja resistencia térmica, que son condiciones críticas de procesamiento de alimentos (pasteurización, refrigeración, congelación); así como una alta tendencia a la retrogradación lo que restringe su uso (Singh *et al.*, 2016). Las propiedades indicadas dependen en gran medida de la base genética de las papas a partir de las cual se ha extraído el almidón, incluso cuando el genotipo determina las propiedades básicas de almidón de papa, las condiciones de crecimiento como la fertilización y las condiciones ambientales también, además del tamaño del tubérculo y la cosecha (madurez del tubérculo) y tecnologías seleccionadas en el procesamiento contribuyen a la formación de muchos aspectos del perfil de propiedades (Bergthaller, 2004).

1.2.1. Composición y estructura

El almidón de papa se encuentra en forma de gránulos lenticulares (Figura 1.9), que tienen un tamaño de aproximadamente 10-100 μm de diámetro (Hoover, 2001). La

amilopectina es el componente principal de los almidones y en el almidón de papa normalmente constituye el 70 a 80% de su peso, independientemente del tamaño de sus gránulos.

Además de estar constituido por amilosa y amilopectina, el almidón de papa consiste en cantidades muy bajas de material de naturaleza no-carbohidrato; menos de 0.5% de los gránulos son proteínas, aparentemente la mayoría está involucrada con la síntesis del almidón, mientras que los lípidos son prácticamente ausentes, al igual que en algunos otros almidones de tubérculos y raíces, pero en contraste con muchos otros almidones, especialmente de cereales, el almidón de papa también contiene fósforo en forma de monoéster fosfato unido covalentemente a la amilopectina, los cuales se consideran un factor importante que contribuye a sus propiedades funcionales.

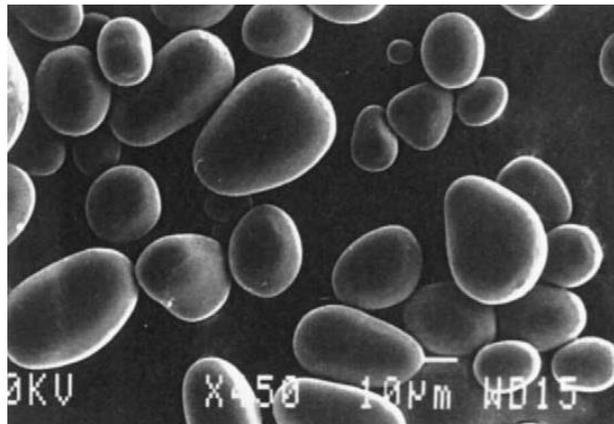


Figura 1.9 Micrografía electrónica de barrido del almidón de papa (Singh *et al.*, 2003).

Cantidades pequeñas de diferentes cationes, sobre todo de potasio, también se encuentran en menor cantidad en los gránulos de almidón de papa, aparentemente coordinados a los grupos fosfato (Yusuph *et al.*, 2003; Bertoft y Blennow, 2016).

El monoéster fosfato se encuentra unido cada 317 unidades de D-glucosa, lo cual equivale a un grupo por cada 13 cadenas ramificadas. Diversos estudios han

indicado que aproximadamente el 68% de estos grupos se encuentran en el C6, el 38% en el C3 y posiblemente el 1% en el C2 de las unidades de D-glucosa y que los gránulos pequeños de almidón contienen una mayor cantidad de monoéster fosfato que los gránulos de mayor tamaño. El fósforo es también un componente en almidones de cereales, pero se encuentra en forma de fosfolípidos, los cuales forman complejos no covalentes con la amilosa (Grommers y Van der Krogt, 2009).

1.2.2. Gelatinización del almidón de papa

El almidón de papa (12.5% p/p) presenta una viscosidad máxima (pico de viscosidad) alta, la cual es de aproximadamente 5.52 Pa·s \pm 8, así como una temperatura de gelatinización baja (65.6 °C \pm 0.1), con una viscosidad final moderada (2.35 Pa·s \pm 19) y una inestabilidad (breakdown) y reorganización (setback) de 3.55 Pa·s y 0.48 Pa·s respectivamente. Esto indica que el almidón de papa gelatiniza con bastante facilidad en comparación con otros almidones, produciendo pastas más viscosas, pero con poca estabilidad (Figura 1.10) (Lui *et al.* 2009).

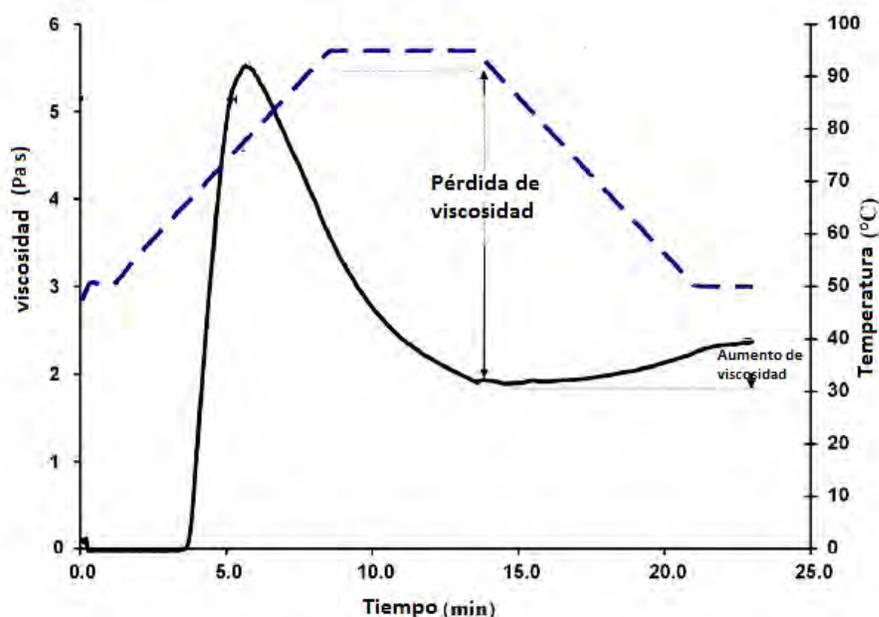


Figura 1.10 Amilograma de almidón de papa nativo al 12.5% p/p (Lui *et al.*, 2009).

1.2.3. Reología de pastas y geles de almidón de papa

El almidón de papa es bien conocido por proporcionar alta viscosidad y la formación de pastas y geles de gran consistencia, este comportamiento se combina con una alta transparencia (Bergthaller, 2004). Las dispersiones de almidón presentan un comportamiento dependiente del tiempo de cizallamiento, no-newtoniano fluidificante a la cizalla. Sikora *et al.* (2015) reportaron el comportamiento al flujo de dispersiones de almidón de papa nativo (APN) a diferentes concentraciones y temperaturas (Figura 1.11). En cada temperatura de prueba, el esfuerzo de cizalla aumentó con la concentración, mientras que a una concentración dada el esfuerzo de cizalla tendió a disminuir con el aumento de temperatura, concluyendo que esto se debe a la disminución de la viscosidad provocada por la hidrólisis tanto de la amilosa como de la amilopectina, lo cual se demostró con un análisis de cromatografía por permeación de gel, tanto del almidón como de las pastas, donde se observó una disminución de casi la mitad del peso molecular promedio en las pastas, mientras que el grado de daño de los gránulos aumentó con el incremento de la temperatura.

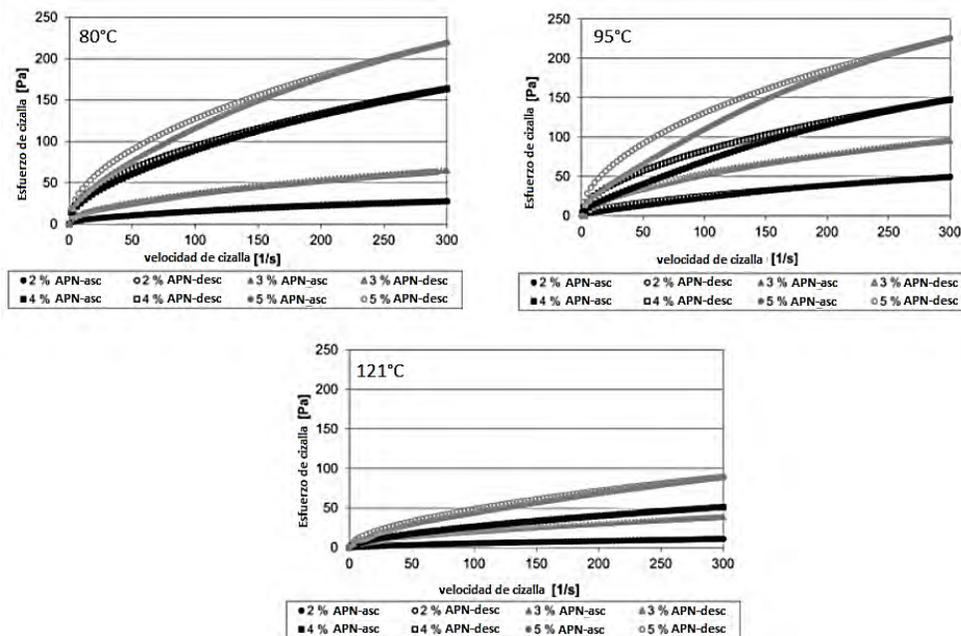


Figura 1.11 Curvas de flujo a diferentes temperaturas de almidón de papa gelatinizado (Sikora *et al.*, 2015).

También observaron tixotropía en las pastas, con una tendencia a incrementar las áreas totales de los bucles de histéresis conforme aumentaba la concentración, las pastas preparadas a 121 °C mostraron áreas más pequeñas de bucles de histéresis mientras que las pastas preparadas a 95 °C mostraron áreas mayores por lo que se concluyó que éstas tenían una menor estabilidad reológica, ya que la tixotropía generalmente es una media de inestabilidad de un material, debido a la formación y destrucción de su estructura interna, que depende del tiempo y velocidad de cizallamiento, así como de los fenómenos que ocurren dentro del material.

Krystyjan *et al.* (2015) estudiaron el comportamiento viscoelástico de geles de almidón de papa a diferentes concentraciones (4, 5 y 6% p/p), las mediciones las realizaron a 25 °C, a una deformación de 1%, dentro de la zona viscoelástica lineal, y un barrido de frecuencia de 0.1-10 Hz. Reportaron que el módulo elástico (G') excedió al módulo viscoso (G'') en toda la gama de frecuencias, predominando el carácter sólido del material. Las diferencias entre los geles de almidón al 4 y 5% fueron insignificantes (Figura 1.12), mientras que con la mayor concentración de almidón se observó el crecimiento rápido de los dos módulos. La magnitud de los módulos y la ligera dependencia de ambos con la frecuencia indican una estructura del gel débil.

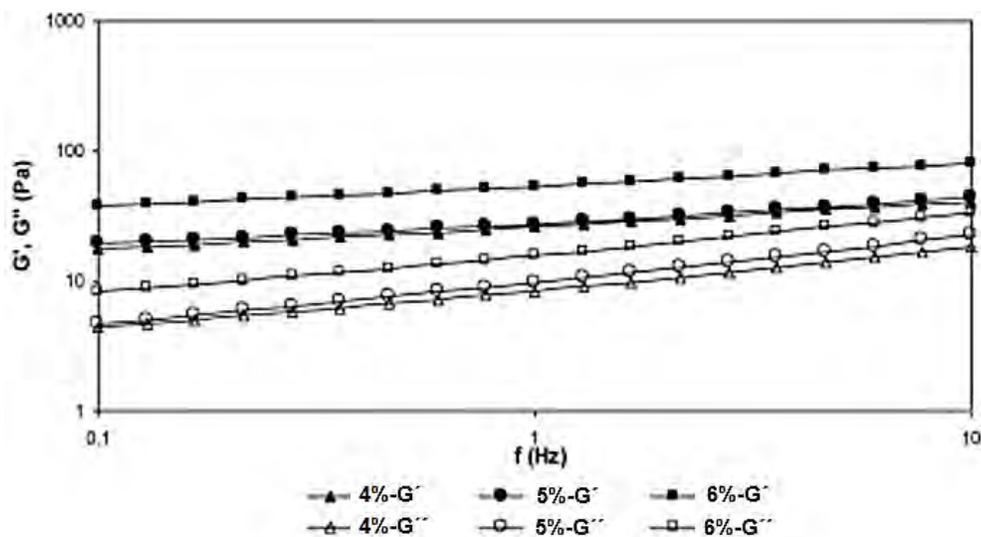


Figura 1. 12 Espectro mecánico de geles de almidón de papa al 4-6% de concentración (Krystyjan *et al.*, 2015).

1.3. Glucomanano de konjac

El glucomanano de konjac (KGM) es un polisacárido soluble en agua, aislado de los tubérculos de la planta *Amorphophallus konjac* K. Koch, perteneciente a la familia Araceae, conocida comúnmente como Konjac (Figura 1.13). Esta planta se ha cultivado durante siglos en países asiáticos como una fuente de alimento y como un ingrediente para la medicina tradicional china. Los productos del konjac son considerados como uno de los "10 principales alimentos para la salud" de la Organización Mundial de la Salud (Behera y Ray, 2016).



Figura 1.13 Tubérculos de *Amorphophallus konjac* (Parry, 2010).

Este polisacárido se ha utilizado ampliamente en la industria de los alimentos como un agente espesante y por su capacidad de formar geles termoirreversible en presencia de álcali (Jian *et al.*, 2015), además de mostrar fuertes efectos sinérgicos en la viscosidad, resistencia de gel y elasticidad con otros polisacáridos (Parry, 2010).

El glucomanano de konjac es una fibra dietética soluble en agua, es una de las fibras más viscosas conocidas debido a su capacidad efectiva de absorción de agua. La viscosidad de la harina de konjac es mayor que la de la goma guar, que se conoce como una de las fibras dietéticas más viscosas. En comparación con otras fibras dietéticas tales como carboximetilcelulosa y pectina, la viscosidad

relativa de glucomanano konjac aumenta significativamente con el aumento de su concentración en agua (Shah *et al.*, 2015).

1.3.1. Obtención

El principal componente de los tubérculos del konjac es el glucomanano, que varía entre el 8-10% de los tubérculos crudos, los cuales también contienen almidón, proteínas y minerales. El GMK se almacena en las células con paredes celulares de aspecto escamoso, que se encuentran dentro del parénquima del tubérculo; el tamaño y número de estas células aumenta a medida que se avanza hacia el centro del tubérculo (Takigami, 2009). Para el proceso de obtención de este polisacárido son necesarios tubérculos que han alcanzado aproximadamente 3 años de edad, con un peso de 300 g a 1.5 kg, debido a que éstos contienen una mayor concentración de dicho polisacárido (Parry, 2010); el proceso inicia con el corte de los tubérculos seguido de un secado, pulverización y separación de las partículas que no contienen GMK. Posteriormente lo obtenido se somete a un lavado para eliminar las impurezas, un secado y una pulverización (Figura 1.14) (Álvarez-Manceñido, 2007).

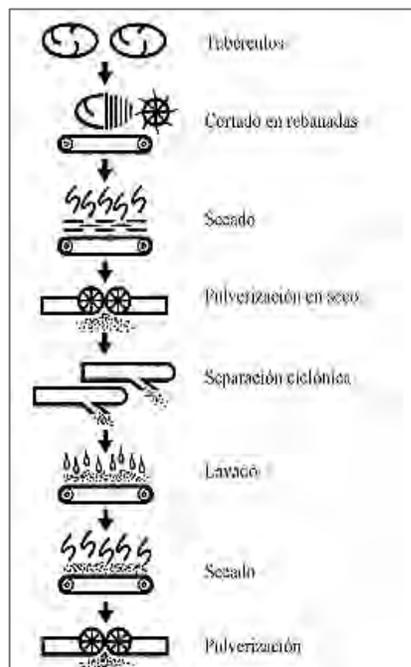


Figura 1.14 Proceso de obtención del glucomanano de konjac (Álvarez-Manceñido, 2007).

1.3.2. Estructura y composición

El glucomanano de konjac es un polisacárido de alto peso molecular, entre 2×10^5 y 2×10^6 Da, esencialmente lineal con pequeñas ramificaciones, compuesto de bloques de unidades de D-manosa y D-glucosa unidas por enlaces $\beta(1-4)$ con una relación molar de 1.6 a 1 (esta relación puede variar dependiendo de la fuente de origen); con aproximadamente 5-10% de acetilación, los grupos acetilo se encuentran distribuidos cada 10-19 unidades en los carbonos C2, C3 o C6 de las unidades de monosacáridos, lo cual se cree que es importante para su solubilidad y sus propiedades de gelificación. Las pequeñas ramificaciones se encuentran en el C3 de las unidades de D-manosa y están unidas por enlaces $\beta(1-6)$ (Behera y Ray, 2016; Schwartz *et al.*, 2014; Parry, 2010). En la Figura 1.15 se muestra la estructura del glucomanano de konjac.

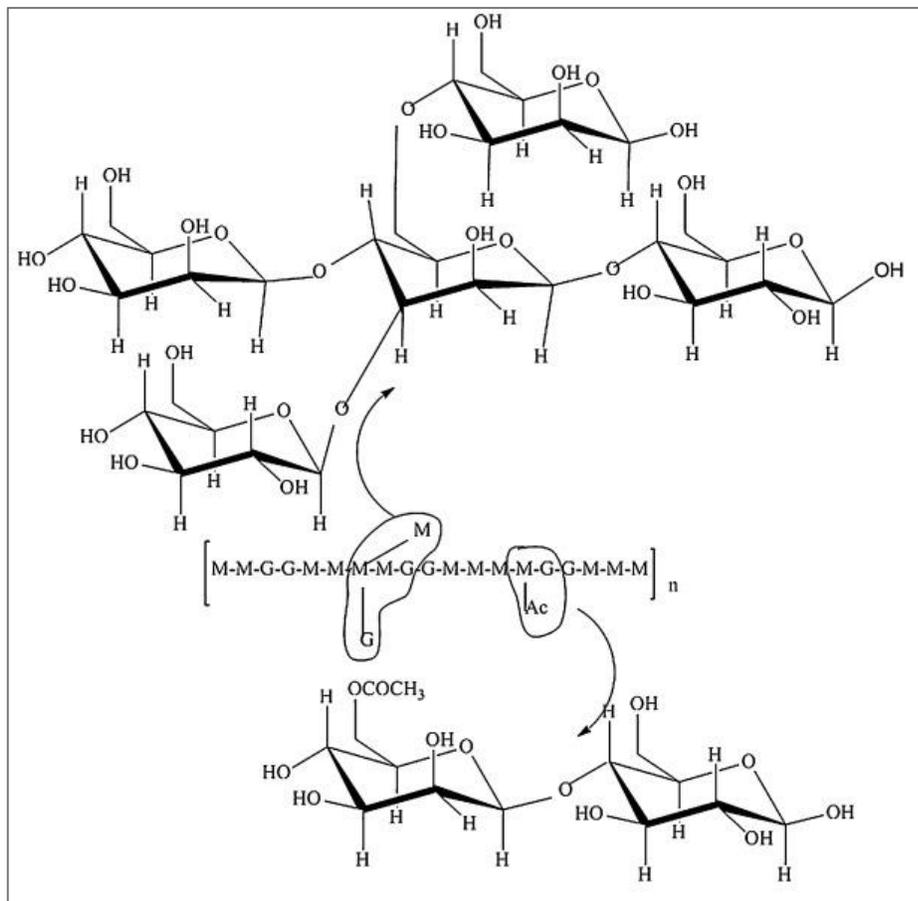


Figura 1.15 Estructura del glucomanano de konjac (Behera y Ray, 2016).

1.3.3. Reología del glucomanano de konjac

Las disoluciones de glucomanano de konjac a concentraciones menores al 0.1% presentan un comportamiento newtoniano, mientras que, en concentraciones mayores, los sistemas acuosos de GMK presentan un comportamiento no newtoniano fluidificante a la cizalla, como la mayoría de polisacáridos de alto peso molecular. Sin embargo, a diferencia de otros polisacáridos, muestra una viscosidad constante, denominada η_0 , en un amplio intervalo de bajas velocidades de cizalla ($0.001-1 \text{ s}^{-1}$, dependiendo de la concentración), dicha viscosidad depende de la pureza, grado de acetilación, peso molecular, así como del proceso de extracción del GMK. Cuando se alcanza una velocidad de cizalla suficiente para modificar su estructura, el GMK es altamente fluidificante (Martínez-Padilla y Casas-Alencáster, 2016).

Wang *et al.* (2012) reportaron el comportamiento reológico de disoluciones de glucomanano de konjac a diferentes concentraciones, las cuales se comportaron como un fluido no-newtoniano fluidificante a la cizalla, la viscosidad de éste disminuyó significativamente al aumentar la velocidad de cizalla, lo cual se observa a una temperatura de $25 \text{ }^\circ\text{C}$ y a altas concentraciones, mientras que a bajas concentraciones su viscosidad no se ve afectada por la velocidad de cizalla, presentando un comportamiento casi newtoniano, esto se observa en la Figura 1.16.

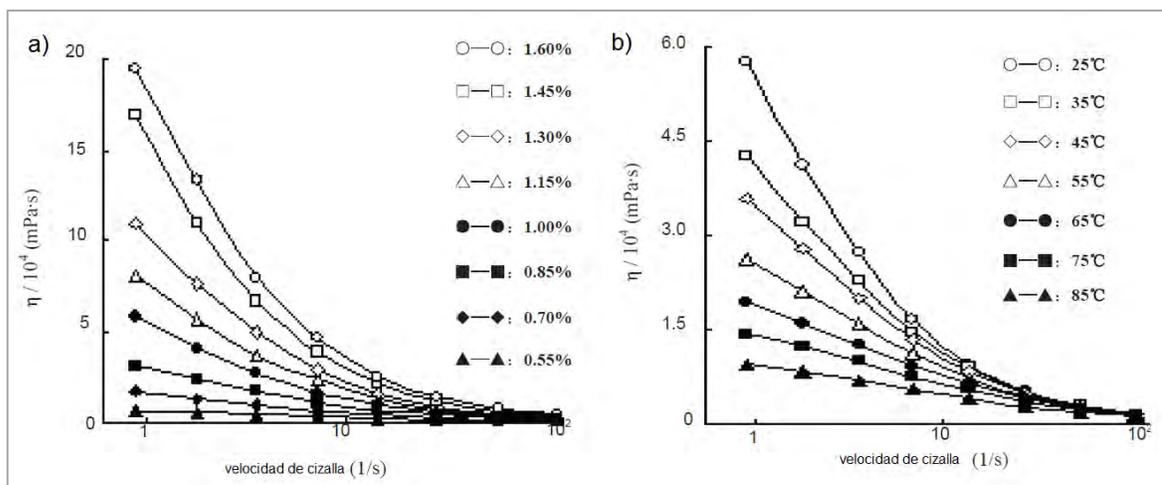


Figura 1.16 a) efecto de la velocidad de cizalla en la viscosidad de diferentes concentraciones de GMK. b) efecto de la velocidad de cizalla y la temperatura en la viscosidad del GMK al 1% (Wang *et al.*, 2012).

En pruebas bajo cizalla oscilatoria dentro de la zona de viscoelasticidad lineal, el GMK presenta un espectro característico de un material fluido; a velocidades angulares bajas, el módulo viscoso (G'') predomina sobre el módulo elástico (G'), mientras que a velocidades angulares altas presenta un punto de cruce entre los módulos donde se invierte este comportamiento, dicho cruce se desplaza a frecuencias más bajas con el aumento de la concentración de GMK, como se puede observar en la Figura 1.17. Al igual que la η_0 , la magnitud de los módulos y el punto de cruce dependen de la pureza, grado de acetilación, peso molecular y al proceso de extracción (Martínez-Padilla y Casas-Alencáster, 2016). Nishinari *et al.* (2000) reportaron la evolución de los valores del módulo elástico (G') y del módulo viscoso (G'') de los sistemas acuosos de GMK a diferentes concentraciones respecto a la frecuencia, concluyendo que, a frecuencias bajas, las moléculas de GMK disponen de tiempo suficiente para fluir durante un ciclo de oscilación por lo que los valores de G'' son mayores que los de G' , mientras que a frecuencias elevadas no es posible eliminar los entrecruzamientos moleculares que actúan como uniones temporales en consecuencia las valores de G' resultan mayores.

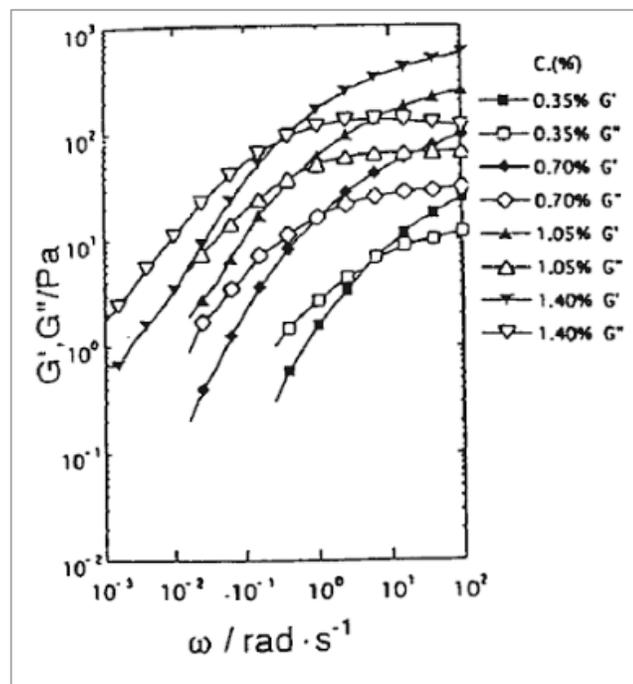


Figura 1.17 Espectros mecánicos de dispersiones de GMK a diferentes concentraciones. G' (símbolos vacíos), G'' (símbolos llenos) (Nishinari *et al.*, 2000).

1.4. Interacciones de almidón con otros polisacáridos

Los almidones tienen un amplio número de aplicaciones en la industria alimentaria y en otras áreas debido a su capacidad de adherencia, unión, formación de películas, como gelificante y espesante. Sin embargo, tienen aspectos negativos, tales como la sinéresis, la retrogradación y altas viscosidades debido al calentamiento de los gránulos con exceso de agua. Esto es a menudo no deseable, y puede ser controlado mediante modificaciones químicas o por mezcla con polisacáridos (Freitas *et al.*, 2003). Es por ello que almidones y otros polisacáridos se utilizan a menudo juntos en la industria de los alimentos para proporcionar la textura adecuada, controlar la movilidad del agua, mejorar la calidad y/o la estabilidad general del producto, reducir los costos y/o facilitar el procesamiento. Por lo tanto, es importante entender las interacciones entre los almidones y otros polisacáridos, que son críticos por las funcionalidades que imparten a los productos alimenticios, para esto se han realizado muchos estudios, con el objetivo de comprender por qué la adición de una pequeña cantidad de algún polisacárido influye en las propiedades de una pasta, gel, o un producto alimenticio a base de almidón.

En estos estudios se encuentran múltiples variables, incluyendo el uso de diferentes tipos de almidones y polisacáridos, así como diferentes métodos de preparación y evaluación de las pastas y los geles (BeMiller, 2011; Shi *et al.*, 2002). Comúnmente, una pasta o gel compuesto de almidón en mezcla con algún polisacárido tiene mayores viscosidades pico y final, así como retrogradación a corto plazo, además de disminución en la temperatura a la que inicia el aumento de la viscosidad, hinchamiento del gránulo, lixiviación de la molécula de almidón de los gránulos hinchados, y la retrogradación a largo plazo; pero también se han observado efectos opuestos en comparación con pasta o gel de almidón solo (BeMiller, 2011). En el Cuadro 1.6 se puede observar algunos de los estudios que se han realizado y los resultados obtenidos.

Cuadro 1.6 Resumen de los estudios sobre el efecto de polisacáridos en las propiedades de gelatinización de almidón y de las propiedades de la pasta y gel (BeMiller, 2011).

Referencia	Almidones	Polisacáridos	Algunos resultados y conclusiones
Bean y Yamazaki (1977)	Trigo	Carboximetilcelulosa	Se observó un aumento temprano de la viscosidad en la presencia de CMC.
Howling (1980)		Goma arábica	La precipitación de almidón se produjo en presencia de una alta concentración de goma arábica. Se cree que es debido a la no disponibilidad de agua.
Lii y Chen (1980)		Goma de hoja Hsin-tsao	Este polisacárido interactúa fuertemente con almidones no iónicos y de tipo no céreo formando geles elásticos
Sajjan (1986)	Trigo	Goma guar Goma algarrobo Xantana	Los polisacáridos inhibieron la sinéresis de los geles de almidón.
Yoshimura et al. (1988)	Maíz	Glucomanano de konjac	Promovió la retrogradación durante sus primeras etapas, y luego se retrasó ligeramente durante el almacenamiento a largo plazo reduciendo la sinéresis
Alloncle et al. (1989)	Maíz Trigo	Goma guar Goma algarrobo	Ambas gomas reducen la temperatura a la que se produjo el aumento de la viscosidad y el aumento del pico de viscosidad, la goma de guar tiene los mayores efectos
Alloncle y Doublier (1991)	Maíz	Goma algarrobo Goma guar Xantana	Los polisacáridos produjeron un aumento significativo de la viscosidad. Las propiedades viscoelásticas de las pastas y los geles calientes se vieron menos afectadas por los galactomananos que por xantana.
Yoo et al., (2005)	Arroz	Goma guar Goma algarrobo	Las pastas tienen un comportamiento fluidificante a la cizalla con un límite elástico. La goma algarrobo resultó ser la más eficaz. G' y G'' de las pastas compuestas aumentaron con el aumento de la frecuencia y la concentración de los polisacáridos.

CAPÍTULO II. METODOLOGÍA

2.1. OBJETIVOS

Objetivo general

Evaluar el efecto de diferentes concentraciones de glucomanano de konjac (0.15, 0.3 y 0.5%) en la gelatinización de almidones de papa (nativo y acetilado) al 4 y 2%, mediante el seguimiento de su viscosidad durante tratamiento térmico (calentamiento-enfriamiento), evaluando también su repercusión en las propiedades viscoelásticas y de flujo de las mezclas, promoviendo mezclas útiles para la industria de los alimentos.

Objetivo particular 1

Analizar el desarrollo de viscosidad durante el tratamiento térmico para la gelatinización de almidón de papa nativo y acetilado, a través de viscosimetría rotacional, así como de las mezclas almidón-glucomanano de konjac a diferentes concentraciones, determinando el desempeño del glucomanano de konjac en mezcla.

Objetivo particular 2

Medir las propiedades viscoelásticas y de flujo de las pastas de almidón y de las mezclas almidón-glucomanano de konjac gelatinizadas, determinando el desempeño del glucomanano de konjac en mezcla.

2.2. DESARROLLO EXPERIMENTAL

2.2.1. Materiales

Se utilizó almidón de papa nativo (Makimat, Lote L-00055101, México), almidón de papa acetilado (Gelamil 170, Fabpsa, México), glucomanano de konjac (Delgran Alfadelta) y agua purificada (E-PURA, México).

2.2.2. Métodos

Determinación de humedad de polvos

Como prueba preliminar se determinó la humedad de los almidones y del glucomanano de konjac con una termobalanza (OAHUS, modelo MB45, E.U). Para determinar la humedad fue necesario 1 gramo de muestra la cual fue calentada a

100°C, finalizando la desecación cuando la pérdida de peso fue menor a 1 mg/min (15 minutos aproximadamente), obteniéndose el porcentaje de humedad final de cada polisacárido, se realizaron tres repeticiones, estos valores se utilizaron para determinar la cantidad de polisacárido necesario para elaborar las dispersiones de almidón y de las mezclas almidón-glucomanano.

Preparación de las muestras

- Preparación para el seguimiento de la viscosidad durante la gelatinización y propiedades de flujo

Para el seguimiento de la viscosidad durante la gelatinización y las propiedades de flujo se prepararon 100 ml de muestra, dispersando los hidrocoloides por separado en un termoagitador (Barnstead Thermolyne), a una temperatura de 40 °C para los almidones y 25 °C para el glucomanano de konjac durante 20 minutos, después se mezclaron agitando la muestra durante 10 minutos.

- Preparación de las muestras para la medición de las propiedades viscoelásticas

Para determinar las propiedades viscoelásticas se prepararon 250 ml de muestra, dispersando primero los hidrocoloides por separado en el 50% del total de agua cada uno, en un termoagitador (Barnstead Thermolyne) a una temperatura de 40 °C para el caso de los almidones y a 25 °C para el glucomanano de konjac, después se mezclaron, continuando con la agitación, la mezcla se llevó a una temperatura de 50 °C, posteriormente se trasladó a un baño de control de temperatura (Brookfield EX200), manteniendo la muestra en continua agitación con un agitador de propelas a una velocidad de rotación constante de 330 rpm hasta alcanzar una temperatura de 80 °C (con una velocidad de calentamiento de 2°C/min aproximadamente), al alcanzar esta temperatura se enfrió a 25 °C a temperatura ambiente, las muestras se dejaron reposar 24 horas y se realizaron dichas pruebas.

Determinación de pH

Se determinó el pH de las dispersiones de almidón y de las mezclas almidón-glucomanano como medida de control con un potenciómetro (Conductronic pH 120). Esta prueba solamente se les realizó a las muestras para determinar las propiedades viscoelásticas.

Seguimiento del desarrollo de viscosidad durante la gelatinización

Para el seguimiento del desarrollo de viscosidad durante la gelatinización se obtuvieron amilogramas en un reómetro (Rheolab QC, Anton Paar, Austria) usando un mezclador de paletas (álabes) (ST24) y el contenedor cilíndrico de la geometría CC27. Se aplicó una rampa de calentamiento de 40 °C a 60 °C a una velocidad de rotación constante de 800 rpm y una velocidad de calentamiento de 5°C/min. La muestra se mantuvo a 60 °C por 5 minutos (350 rpm), después se llevó a una temperatura de 90 °C a una velocidad de rotación constante de 350 rpm y una velocidad de calentamiento de 2 °C/min. La muestra se mantuvo a temperatura constante de 90 °C por 5 min y por último se enfrió a 40 °C con una velocidad de rotación 350 rpm y una velocidad de enfriamiento de 2 °C/min. En esta prueba se obtuvo una medida aproximada de la viscosidad, ya que no se tiene la constante de proporcionalidad del mezclador de álabes, necesaria para convertir la velocidad rotacional a velocidad de cizalla, es por ello que se consideró a estas velocidades iguales y así obtener una constante de 1.

Propiedades de flujo

Las propiedades de flujo de los almidones y las mezclas se determinaron a partir de pruebas rotacionales con el reómetro (Rheolab QC, Anton Paar, Austria) haciendo uso de una geometría de cilindro (CC27), aplicando el mismo tratamiento térmico-mecánico que con el mezclador de álabes, seguido de un ciclo ascenso-descenso de velocidades de cizalla con un intervalo de 10-500 s⁻¹, a 40 y a 25 °C.

Principio de funcionamiento

Se transfiere cantidad de movimiento a la muestra contenida entre los dos cilindros, desde el cilindro que gira a una velocidad de rotación, hasta la pared que contiene la muestra en régimen laminar, midiendo el torque del motor, requerido para mover el cilindro y la velocidad de rotación, transformándolos en esfuerzo de cizalla y velocidad de cizalla con una constante específica respectivamente. La viscosidad se calcula a través del cociente del esfuerzo de cizalla entre la velocidad de cizalla (Martínez-Padilla, 2015a).

Propiedades viscoelásticas

Las propiedades viscoelásticas se determinaron con un reómetro (MCR301, Anton Paar, Austria) con una geométrica de placa (PP50) mediante cizalla oscilatoria, para estas pruebas fue necesario determinar primero la zona de viscoelasticidad lineal a partir de un barrido de deformación que generalmente va de 0.1 a 5% a una frecuencia constante de 10 rad/min, dicha zona se delimita en donde los módulos: elástico (G') y viscoso (G'') no son dependientes de la deformación aplicada. Una vez localizada la zona de viscoelasticidad lineal se realizó un barrido de frecuencia manteniendo una deformación constante (dentro de la zona lineal), obteniéndose así el valor de los módulos elástico (G'), viscoso (G'') y la viscosidad compleja (η^*). (Martínez-Padilla, 2015b).

CAPÍTULO III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1. Humedad de polvos

En el Cuadro 3.1 se muestra el promedio de la humedad (%), desviación estándar y coeficiente de variación del almidón nativo y acetilado, así como del glucomanano de konjac en polvo.

Cuadro 3.1 Humedad (%) de almidón nativo, acetilado y glucomanano de konjac.

	Humedad (%)	Desviación estándar	C.V. (%)
Almidón de papa nativo	16.41	0.37	2.3
Almidón de papa acetilado	12.16	0.29	2.4
Glucomanano de konjac	9.15	8.16×10^{-3}	0.09

Dicho promedio se empleó para realizar los balances de materia, con los cuales se obtuvo la masa de polisacárido necesaria para preparar las mezclas a las diferentes concentraciones de almidón y glucomanano de konjac.

3.2. pH de las mezclas almidón-glucomanano de konjac

En el Cuadro 3.2 se muestra el promedio de pH, desviación estándar y coeficiente de variación de las mezclas de almidón-glucomanano al 4% y 0.5% respectivamente, así como las dispersiones de almidón al 4%.

Cuadro 3.2 pH de las dispersiones de almidón nativo (AN) y acetilado (AA) al 4% con y sin glucomanano de konjac (GMK) al 0.5%.

	pH	Desviación estándar	C.V. (%)
Almidón de papa nativo 4%	6.22	0.1	1.6
Almidón de papa acetilado 4%	4.57	0.02	0.44
AN 4%-GMK 0.5%	5.85	0.04	0.68
AA 4%-GMK 0.5%	4.32	0.02	0.46

Esta prueba solamente se les realizó a las muestras que fueron preparadas para determinar las propiedades viscoelásticas. Se observa que el pH de las dispersiones de almidón con GMK es menor que el de las dispersiones sin éste.

3.3. Seguimiento del desarrollo de viscosidad durante la gelatinización

En la Figura 3.1 se muestra un amilograma típico, en el cual se grafica la viscosidad y la temperatura en función del tiempo. Del gráfico se obtienen parámetros como el pico de viscosidad, que es la máxima viscosidad que alcanza el almidón durante la gelatinización, la temperatura a la cual el almidón alcanza dicho pico, temperatura a la que inicia la gelatinización y la viscosidad al final de ésta, así como la pérdida y aumento de viscosidad.

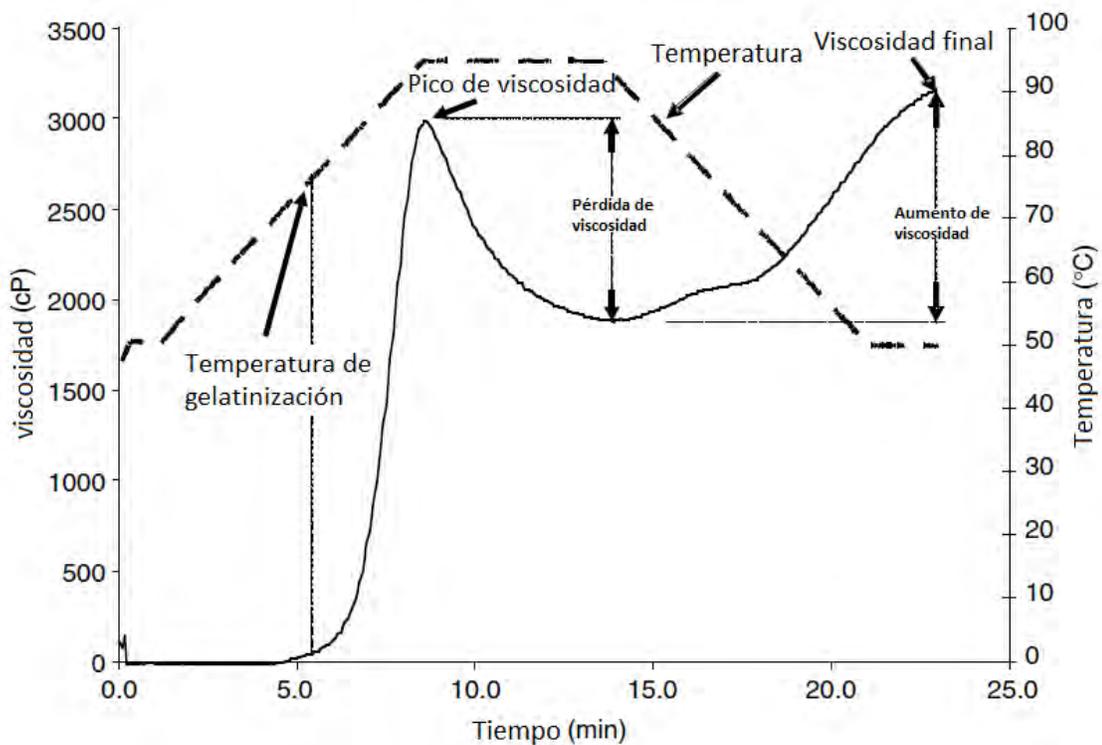


Figura 3.1 Amilograma de almidón de maíz nativo (Lui, 2005).

3.3.1. Almidón nativo y acetilado al 4 y 2%

En la Figura 3.2 se muestra los amilogramas obtenidos del almidón nativo y acetilado al 4 y 2%.

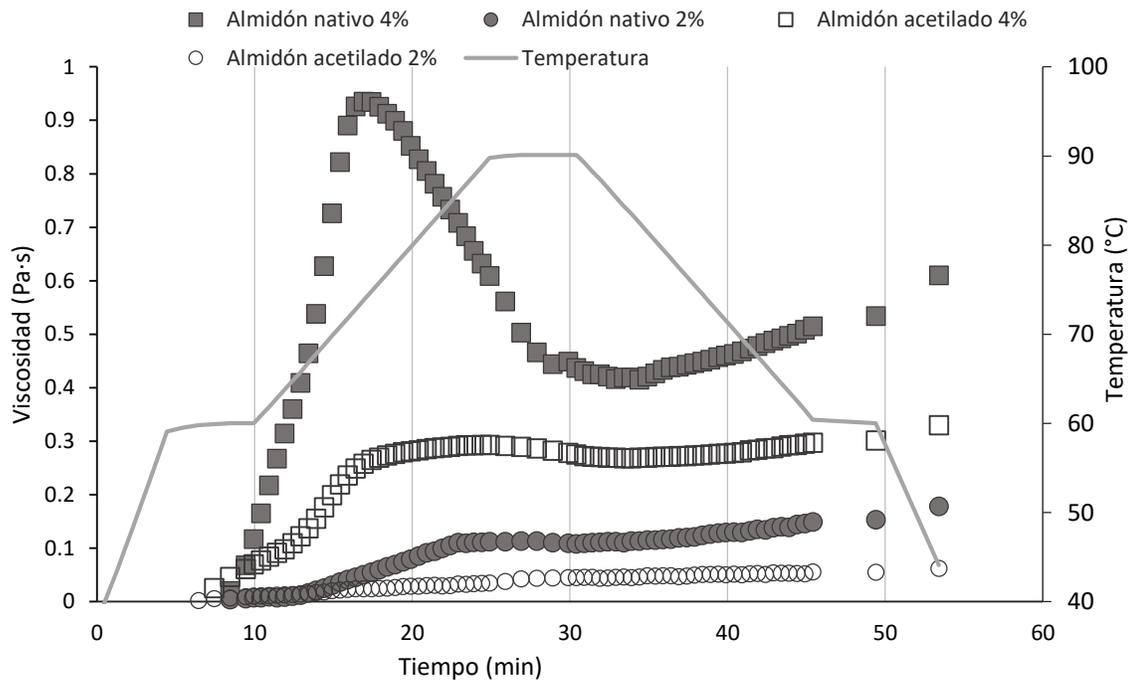


Figura 3.2 Amilograma del almidón nativo y acetilado al 2 y 4%.

Se observó que el almidón nativo desarrolló mayor viscosidad que el almidón acetilado, sin embargo, la viscosidad de éste no desciende drásticamente al alcanzar su punto máximo, sino que se mantiene constante en ese punto, lo cual indica que es más estable tanto al calentamiento como al cizallamiento, dicho descenso de la viscosidad, sólo es observable en las pastas de almidón al 4%, ya que al disminuir la concentración al 2% la viscosidad de ambos almidones nunca desciende. La reducción de la viscosidad de la pasta se le atribuye a la despolimerización de las cadenas de almidón durante la acetilación, lo cual sugiere que la viscosidad del almidón acetilado depende en gran medida del grado de sustitución, ya que esto influye en la despolimerización y consecuentemente en la viscosidad máxima de éste (Colussi *et al.*, 2015).

El promedio de algunos parámetros importantes de la gelatinización, como lo son, el pico de viscosidad (viscosidad máxima), la temperatura a la que inicia la gelatinización (temperatura de gelatinización) y a la que se alcanza el pico de viscosidad, la pérdida e incremento de viscosidad, las cuales son las etapas de inestabilidad del gel y de reestructuración durante la gelatinización respectivamente; así como la viscosidad final de las pastas de almidón se muestran en el Cuadro 3.3

Cuadro 3.3 Parámetros de gelatinización del almidón nativo y acetilado al 4 y 2%.

Muestra		Pico de viscosidad [Pa·s]	T [°C] (inicio gelatinización)	T [°C] (pico de viscosidad)	Pérdida de viscosidad [%]	Aumento de viscosidad [%]	Viscosidad final [Pa·s]
Almidón nativo 4%	\bar{x}	0.92	60.45	73.8	54.48	20.08	0.61
	σ	0.02	0.41	0	2.57	1.18	0.01
	C.V. (%)	1.8	1.1	0	2.9	5.4	1.1
Almidón acetilado 4%	\bar{x}	0.28	60	78.80	3.44	22.69	0.33
	σ	0.03	0	0	0.17	0.66	2.1×10^{-3}
	C.V. (%)	9.3	0	0	5.0	2.9	0.7
Almidón nativo 2%	\bar{x}	0.12	60.45	85.80	1.69	58.38	0.19
	σ	0.01	0.64	0	0.18	7.43	0.01
	C.V. (%)	10.7	1.1	0	10.7	12.73	6.1
Almidón acetilado 2%	\bar{x}	0.03	59.90	83.80	0.64	103.37	0.06
	σ	1.2×10^{-3}	0.28	1.41	0.03	6.08	7.1×10^{-4}
	C.V. (%)	3.9	0.5	1.7	4.8	5.9	1.1

El almidón nativo registró un pico de viscosidad mayor al almidón acetilado, de 0.92 y 0.12 Pa·s al 4 y 2% respectivamente, mientras el pico de viscosidad que registró el almidón acetilado fue de 0.28 y 0.03 Pa·s, sin embargo, éste presentó valores menores de inestabilidad y reestructuración, lo que indica que es más estable al calentamiento y al cizallamiento, así como al enfriamiento y por lo tanto más estable al almacenamiento, esto último debido a que presentó menores porcentajes de aumento de viscosidad (reestructuración), el cual está relacionado a la reasociación de amilosa y amilopectina, así como de los fragmentos granulares insolubles, durante la fase de enfriamiento y se asocia a la retrogradación (Lucas-Aguirre y Quintero-Castaño, 2016).

En cuanto a la temperatura a la que se alcanza el pico de viscosidad, se observó un aumento al disminuir la concentración de ambos almidones; presentando menor temperatura el almidón nativo al 4% (73.8°C), sin embargo, diversos autores reportan que la acetilación provoca una disminución de dicha temperatura debido a la introducción de los grupos acetilo en las moléculas de almidón, especialmente en la región amorfa, lo que provoca que la integridad de los enlaces entre moléculas se reduzca ya que dichos grupos obstruyen la formación de puentes de hidrógeno, por lo que el hinchamiento de los gránulos es más fácil (Singh *et al.*, 2004; Saartrat *et al.*, 2005; Rivas-González *et al.*, 2009; Mbougoueng *et al.*, 2012).

3.3.2. Mezclas de almidón nativo-glucomanano de konjac

En las Figuras 3.3 y 3.4 se muestran los amilogramas obtenidos del almidón nativo (AN) al 4 y 2% con y sin glucomanano de konjac (GMK), se observó que el GMK aumentó la viscosidad de las pastas de almidón, siendo las mezclas al 0.5% de GMK las que desarrollaron mayor viscosidad.

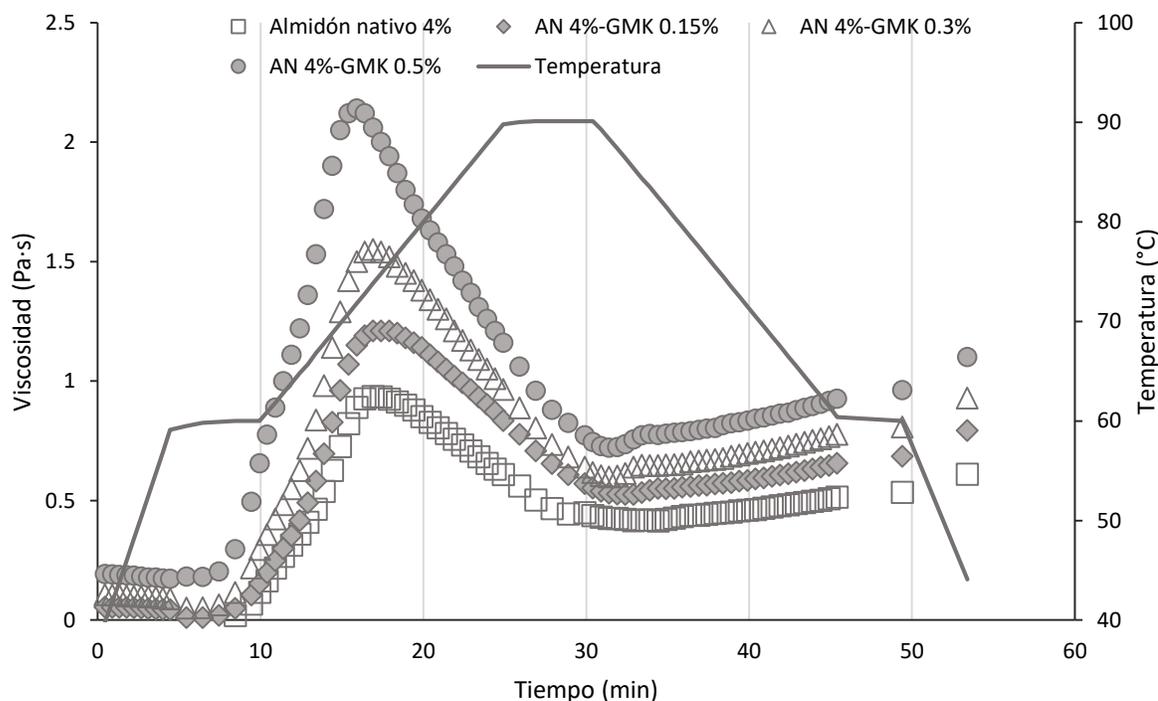


Figura 3.3 Amilogramas del almidón nativo al 4% con y sin glucomanano de konjac al 0.15, 0.3 y 0.5%.

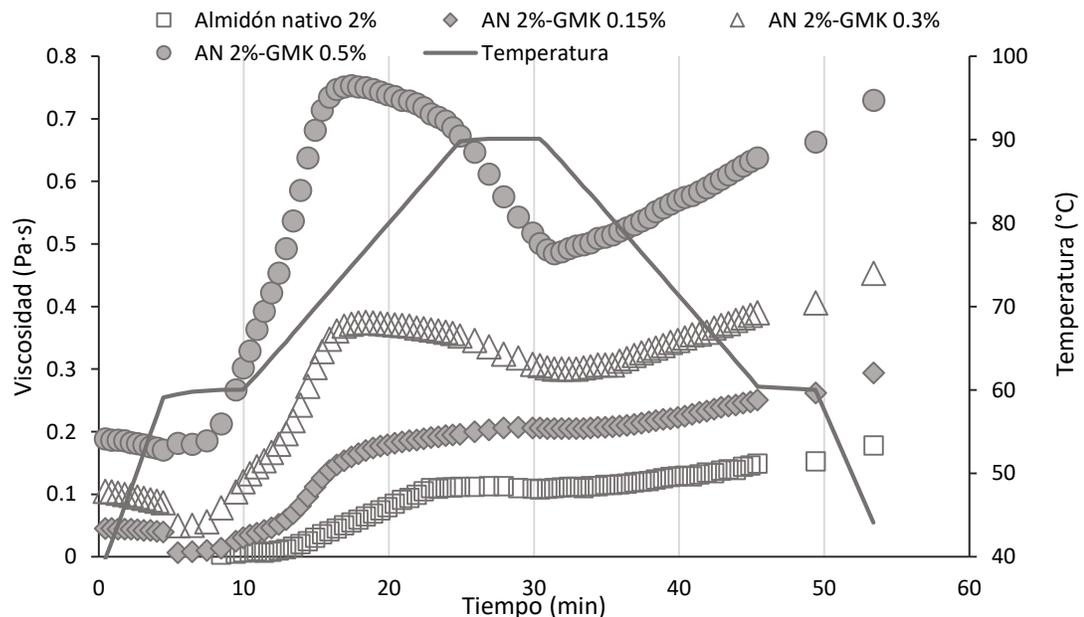


Figura 3.4 Amilogramas del almidón nativo al 2% con y sin glucomanano de konjac al 0.15, 0.3 y 0.5%.

En las mezclas de almidón nativo al 4% se observó que la viscosidad disminuye drásticamente después de alcanzar el pico de viscosidad durante el proceso de calentamiento, sin embargo, en las mezclas de almidón al 2%, esto sólo se observó en la pasta con la concentración más alta de GMK, mientras que en la mezcla con 0.3% de GMK la caída de viscosidad es mucho menor y en la mezcla con 0.15% de éste, dicha caída no se presentó. También se observó que, durante el proceso de enfriamiento, la viscosidad aumentó en mayor proporción en las mezclas con 4% de almidón.

En los Cuadros 3.4 y 3.5 se muestra el promedio de los parámetros de gelatinización (pico de viscosidad, temperatura a la que se alcanza dicho pico, temperatura de gelatinización, pérdida y aumento de viscosidad) de las pastas de almidón nativo al 4 y 2% con y sin glucomanano de konjac, así como la desviación estándar y coeficiente de variación. El pico de viscosidad de las pastas con GMK fue mayor que el de las pastas sin éste, dicho pico aumentó conforme se incrementaba la concentración de GMK.

Cuadro 3.4 Parámetros de gelatinización del almidón nativo al 4% con y sin glucomanano de konjac al 0.15, 0.3 y 0.5%.

Muestra		Pico de viscosidad [Pa·s]	T [°C] (inicio gelatinización)	T [°C] (pico de viscosidad)	Pérdida de viscosidad [%]	Aumento de viscosidad [%]	Viscosidad final [Pa·s]
Almidón nativo 4%	\bar{x}	0.92	60.45	73.8	54.48	20.08	0.61
	σ	0.02	0.63	0	1.60	1.09	0.01
	C.V. (%)	1.8	1.1	0	2.9	5.4	1.1
AN 4%-GMK 0.15%	\bar{x}	1.21	60	73.7	56.98	23.06	0.80
	σ	0	0	0	0.53	1.29	9.2X10 ⁻³
	C.V. (%)	0	0	0	0.92	5.58	1.2
AN 4%-GMK 0.3%	\bar{x}	1.57	59.75	73.7	61.84	21.65	0.94
	σ	0.03	0.07	0	0.69	0.51	0.01
	C.V. (%)	1.8	0.1	0	1.1	2.4	1.5
AN 4%-GMK 0.5%	\bar{x}	2.20	59.30	71.7	66.52	17.66	1.13
	σ	0.08	0.28	0	0.29	0.07	0.04
	C.V. (%)	3.9	0.5	0	0.4	0.4	3.1

Cuadro 3.5 Parámetros de gelatinización del almidón nativo al 2% sin y con glucomanano de konjac al 0.15, 0.3 y 0.5%.

Muestra		Pico de viscosidad [Pa·s]	T [°C] (inicio gelatinización)	T [°C] (pico de viscosidad)	Pérdida de viscosidad [%]	Aumento de viscosidad [%]	Viscosidad final [Pa·s]
Almidón nativo 2%	\bar{x}	0.12	60.45	85.80	1.69	58.38	0.19
	σ	0.01	0.64	0	0.18	7.43	0.01
	C.V. (%)	10.7	1.1	0	10.7	12.73	6.1
AN 2%-GMK 0.15%	\bar{x}	0.19	59.65	76.70	1.70	53.75	0.31
	σ	0.02	0.21	0	0.34	12.55	2.6x10 ⁻²
	C.V. (%)	11.5	0.4	0	19.9	23.34	8.4
AN 2%-GMK 0.3%	\bar{x}	0.38	59.50	76.70	20.13	41.57	0.46
	σ	7.1x10 ⁻³	0	0	0.18	1.09	1.2x10 ⁻²
	C.V. (%)	1.9	0	0	0.9	2.6	2.6
AN 2%-GMK 0.5%	\bar{x}	0.77	59.05	74.75	36.02	31.23	0.73
	σ	0.02	0.07	0.07	0.60	1.85	7.1x10 ⁻⁴
	C.V. (%)	2.7	0.1	0.1	1.7	5.9	0.1

Funami *et al.* (2005) observaron este aumento del pico de viscosidad en pastas de almidón de trigo en mezcla con diferentes polisacáridos no-iónicos, entre ellos el glucomanano de konjac, dicho aumento, lo atribuyen al efecto espesante de los polisacáridos alternativamente con las interacciones entre éstos y los gránulos del almidón. Efecto contrario se observó en la temperatura a la que se alcanzó el pico de viscosidad y en la temperatura de gelatinización, ya que las pastas con GMK presentaron valores menores en comparación con las pastas que solamente contenían almidón, esto se debe al aumento de la concentración del almidón en la fase continua, lo cual mejora la interacción entre los gránulos, lo que produce temperaturas de gelatinización más bajas. Dicho aumento de concentración es provocado por la incompatibilidad termodinámica entre el almidón y el glucomanano de konjac, que conduce a la exclusión mutua de cada polisacárido (Funami *et al.*, 2005; Shi y BeMiller, 2002).

En cuanto a la pérdida de viscosidad se observó que las mezclas que contenían 2% de almidón presentaron porcentajes bajos, aumentando conforme incrementaba la concentración de GMK, lo cual sugiere que, a bajas concentraciones de estos polisacáridos, existe una mayor interacción entre ellos, lo que provoca un aumento importante de la estabilidad de los gránulos al cizallamiento y al tratamiento térmico; mientras que las mezclas que contenían 4% de almidón registraron altos porcentajes, de acuerdo a Funami *et al.* (2005), este efecto sugiere la posible existencia de cambios morfológicos en los gránulos del almidón, los cuales son inducidos por el GMK, lo que implica una expansión radial de éstos hasta su ruptura.

Por otra parte, se observó que el porcentaje del aumento de viscosidad disminuyó conforme aumentaba la concentración de GMK, lo que indica un bajo grado de reorganización durante el enfriamiento de las pastas, lo que sugiere que el GMK retarda la retrogradación del almidón, esto debido a que actúa como una barrera física para prevenir la reorganización entre las moléculas de almidón (Schwartz *et al.*, 2014).

3.3.3. Mezclas de almidón acetilado-glucomanano de konjac

En las Figuras 3.5 y 3.6 se muestran los amilogramas obtenidos del almidón acetilado (AA) al 4 y 2%, con y sin glucomanano de konjac (GMK), se observó que de igual manera que en las pastas de almidón nativo, el GMK aumentó la viscosidad de las pastas, siendo las mezclas al 0.5% de GMK las que desarrollaron mayor viscosidad. También se observó que la caída de viscosidad de las mezclas que contenían la mayor concentración de almidón, la cual se origina después de alcanzar la viscosidad máxima (pico de viscosidad), se redujo al disminuir la concentración del GMK, dicha caída fue inexistente en la pasta que únicamente contenía almidón, lo cual indica que el GMK tiene un efecto sobre la resistencia de los gránulos del almidón acetilado, provocando que estos almidones sean menos resistentes tanto al cizallamiento como al tratamiento térmico.

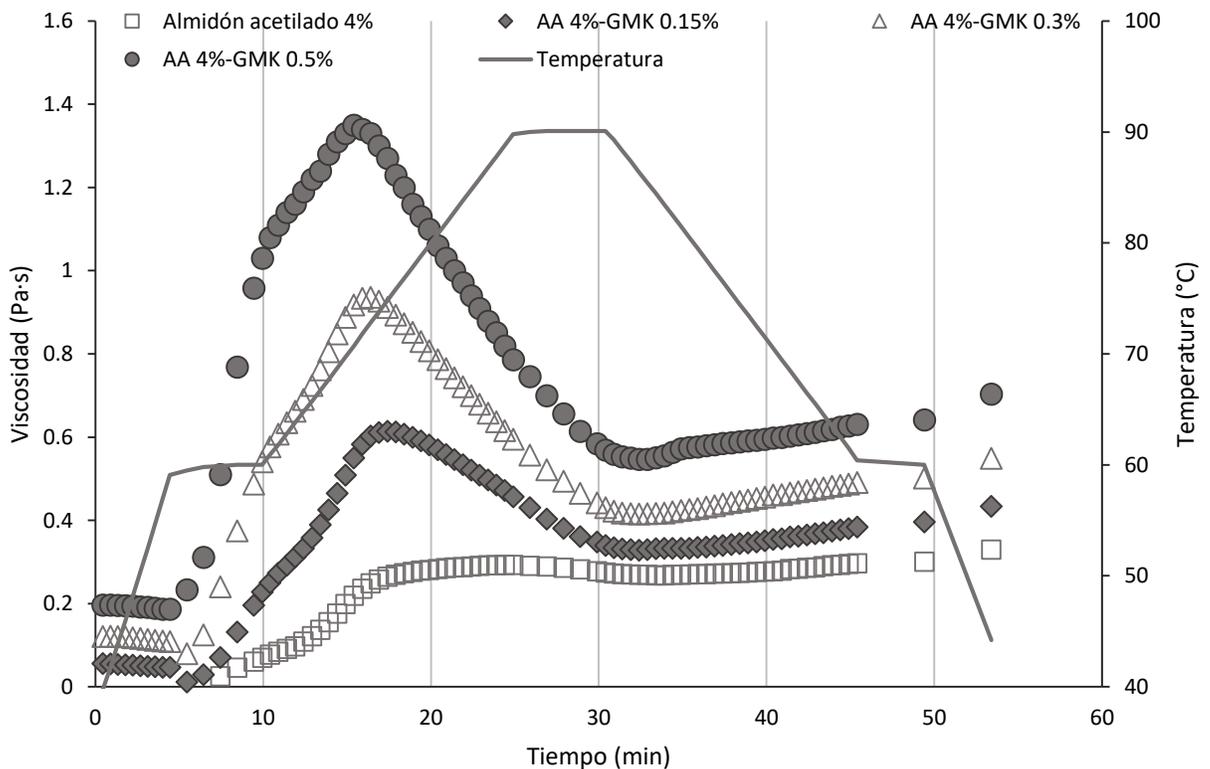


Figura 3.5 Amilogramas del almidón acetilado al 4% con y sin glucomanano de konjac al 0.15, 0.3 y 0.5%.

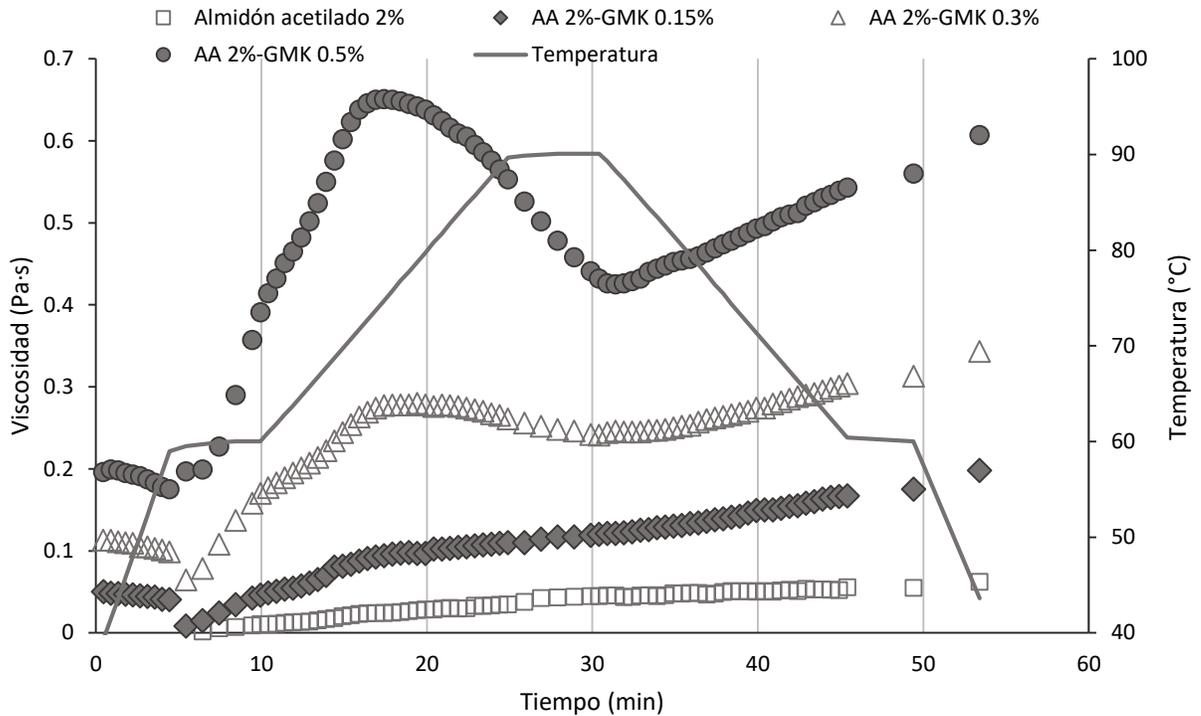


Figura 3.6 Amilogramas del almidón acetilado al 2% con y sin glucomanano de konjac al 0.15, 0.3 y 0.5%.

En cuanto a las mezclas con 2% de almidón, se observó que la caída de viscosidad es mucho menor que en las pastas que contenían 4% de dicho polisacárido, sin embargo, durante el enfriamiento, la viscosidad de las pastas con 0.5 y 0.3% de GMK, aumentó en mayor proporción, lo que indica que, a bajas concentraciones de almidón, las pastas de estas mezclas son más susceptibles a la retrogradación, debido a su alta reorganización.

En los Cuadros 3.6 y 3.7 se muestra el promedio de los parámetros de gelatinización de las pastas de almidón acetilado al 4 y 2%, con y sin glucomanano de konjac, así como la desviación estándar y coeficiente de variación. De igual manera, que en las mezclas que contenían almidón nativo, el pico de viscosidad de las pastas con GMK fue mayor que el de las pastas sin éste, el cual aumentó conforme se incrementaba la concentración de GMK, lo mismo ocurrió con el porcentaje de pérdida de viscosidad, mientras que el porcentaje del aumento de viscosidad disminuyó considerablemente en las mezclas que contenían 2% de almidón.

Cuadro 3.6 Parámetros de gelatinización del almidón acetilado al 4% sin y con glucomanano de konjac al 0.15, 0.3 y 0.5%.

Muestra		Pico de viscosidad [Pa·s]	T [°C] (inicio gelatinización)	T [°C] (pico de viscosidad)	Pérdida de viscosidad [%]	Aumento de viscosidad [%]	Viscosidad final [Pa·s]
Almidón acetilado 4%	\bar{x}	0.28	60	78.80	3.44	22.69	0.33
	σ	0.03	0	0	0.71	0.66	2.1×10^{-3}
	C.V. (%)	9.3	0	0	20.6	2.9	0.7
AA 4%-GMK 0.15%	\bar{x}	0.61	59.45	74.70	46.08	16.88	0.43
	σ	1.4×10^{-3}	0.07	0	0.70	0.54	0
	C.V. (%)	0.2	0.1	0	1.5	3.2	0
AA 4%-GMK 0.3%	\bar{x}	0.97	59.5	72.70	56.54	13.74	0.56
	σ	5.2×10^{-2}	0	0	1.25	0.81	9.9×10^{-3}
	C.V. (%)	5.4	0	0	2.2	5.9	1.8
AA 4%-GMK 0.5%	\bar{x}	1.35	59.1	70.70	61.20	12.23	0.69
	σ	7.1×10^{-3}	0.07	0	2.42	0.85	2.5×10^{-2}
	C.V. (%)	0.5	0.12	0	3.9	6.9	3.6

Cuadro 3.7 Parámetros de gelatinización del almidón acetilado al 2% sin y con glucomanano de konjac al 0.15, 0.3 y 0.5%.

Muestra		Pico de viscosidad [Pa·s]	T [°C] (inicio gelatinización)	T [°C] (pico de viscosidad)	Pérdida de viscosidad [%]	Aumento de viscosidad [%]	Viscosidad final [Pa·s]
Almidón acetilado 2%	\bar{x}	0.03	59.90	83.80	0.64	103.37	0.06
	σ	1.2×10^{-3}	0.28	1.41	0.03	6.08	7.1×10^{-4}
	C.V. (%)	3.9	0.5	1.7	4.8	5.9	1.1
AA 2%-GMK 0.15%	\bar{x}	0.09	59.20	78.25	0.88	101.90	0.19
	σ	8.5×10^{-4}	0.28	0.78	0.24	2.09	7.1×10^{-3}
	C.V. (%)	1.0	0.5	1.0	27.3	2.1	3.7
AA 2%-GMK 0.3%	\bar{x}	0.28	59.50	74.70	14.33	35.41	0.34
	σ	3.5×10^{-3}	0	0.00	0.57	1.44	1.4×10^{-3}
	C.V. (%)	1.3	0	0.0	3.9	4.1	0.4
AA 2%-GMK 0.5%	\bar{x}	0.64	59.40	73.20	33.99	27.40	0.59
	σ	2.1×10^{-2}	0.42	0.71	1.01	0.78	1.8×10^{-2}
	C.V. (%)	3.2	0.7	1.0	2.9	2.9	3.0

3.4. Propiedades de flujo

3.4.1. Mezclas de almidón nativo-glucomanano de konjac

En la Figura 3.7 se muestra las curvas de ascenso-descenso de velocidad de cizalla del almidón nativo al 4% con y sin GMK al 0.15, 0.3 y 0.5% a 25 °C, las cuales fueron las únicas muestras que presentaron tixotropía, lo cual indica, de acuerdo a Sikora et al. (2015), una menor estabilidad reológica, ya que ésta es resultado de la formación y destrucción de la estructura interna, provocada por el cizallamiento aplicado; esta dependencia al tiempo de cizallamiento se ha observado en pastas de almidón de trigo a bajas temperaturas (≤ 25 °C), pero no a temperaturas mayores, dicho comportamiento se le atribuye a la estructura formada por la amilosa lixiviada en la matriz de la suspensión al enfriarse (Rao, 2014). Asimismo, se observa que al aumentar la concentración de GMK, el bucle de histéresis disminuye.

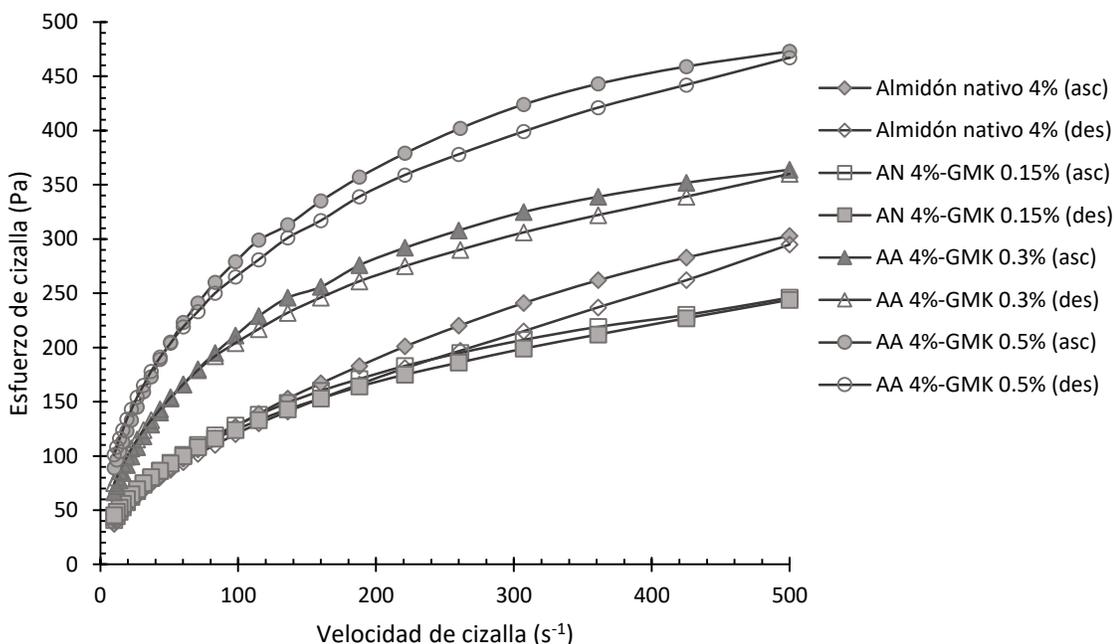


Figura 3.7 Curvas de flujo del almidón nativo al 4% con y sin GMK a 25 °C.

En la Figura 3.8 se muestra el comportamiento de las curvas de ascenso de velocidad de cizalla de las pastas de almidón nativo al 4% con y sin glucomanano de konjac a una temperatura de 40 °C, así como las curvas de almidón al 4% a 25 °C y almidón al 2% a 40 y 25 °C. En esta figura se observa que el esfuerzo de cizalla

incrementa de manera no lineal con el incremento de la velocidad de cizalla, indicando, por la forma de la curva, un comportamiento característico de un material no-newtoniano, fluidificante a la cizalla. De igual manera, se observa que al aumentar la concentración de GMK incrementan los valores de esfuerzo de cizalla, así mismo, los valores de éste también aumentan al disminuir la temperatura como se aprecia en las curvas de las pastas que sólo contenían almidón.

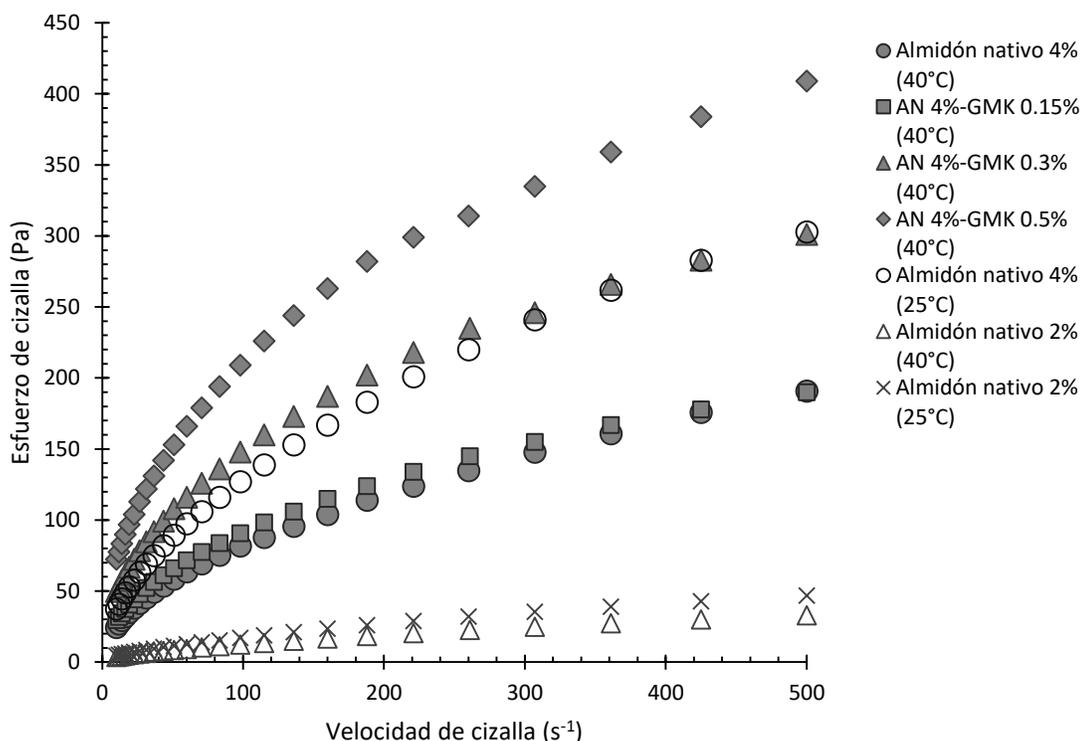


Figura 3.8 Curvas de flujo (ascenso) de las pastas de almidón nativo al 2 y 4% a 40 y 25 °C y de las mezclas almidón nativo 4%-GMK a 40 °C.

Para el análisis de datos, el ajuste a modelos reológicos se realizó a las curvas de ascenso de velocidad de cizalla. Tanto las curvas de las pastas de almidón nativo al 4% con y sin glucomanano de konjac a una temperatura de 40 °C, como las curvas de las pastas de almidón al 4% a 25 °C y almidón al 2% a 40 °C y 25 °C se ajustaron al modelo de Ostwald de Waele o modelo de la potencia. En el Cuadro 3.8 se muestra el promedio, desviación estándar y coeficiente de variación de los

parámetros reológicos: índice de consistencia (k) e índice de comportamiento al flujo (n), así como del coeficiente de determinación (R^2).

Cuadro 3.8 Parámetros reológicos del modelo de la potencia del almidón nativo al 4% con y sin GMK a 40 y 25 °C.

Muestra		40°C			25°C		
		k (Pa·s ⁿ)	n	R^2	k (Pa·s ⁿ)	n	R^2
Almidón nativo 4%	Promedio	7.70	0.52	0.999	10.30	0.54	0.999
	Desviación estándar	0.27	2.12x10 ⁻³	0	0.35	7.1x10 ⁻⁵	0
	C.V. (%)	3.56	0.41	0	3.37	0.01	0
AN 4%-GMK 0.15%	Promedio	10.17	0.48	0.999			
	Desviación estándar	0.42	1.41x10 ⁻³	0			
	C.V. (%)	4.12	0.29	0			
AN 4%-GMK 0.3%	Promedio	17.32	0.47	0.999			
	Desviación estándar	0.71	1.41x10 ⁻³	0			
	C.V. (%)	4.10	0.30	0			
AN 4%-GMK 0.5%	Promedio	25.64	0.45	0.999			
	Desviación estándar	0.27	4.2x10 ⁻⁴	0			
	C.V. (%)	1.06	0.09	0			
Almidón nativo 2%	Promedio	0.95	0.57	0.998	1.16	0.60	0.998
	Desviación estándar	0.07	7.2x10 ⁻³	0	0.02	3.5x10 ⁻⁴	0
	C.V. (%)	7.03	1.26	0	1.65	0.06	0

Se observa un aumento del índice de consistencia (k), tanto de las pastas que sólo contenían almidón, como en las mezclas al aumentar la concentración, de igual manera dicho índice es mayor en las pastas a 25 °C que en las pastas a 40 °C, mientras que el índice de comportamiento al flujo (n), disminuyó conforme aumentó la concentración del GMK, alejándose de un comportamiento newtoniano, ya que de acuerdo al modelo de Ostwald de Waele, si su valor es 1 es de tipo newtoniano pero si su valor es menor de 1, el sistema es fluidificante a la cizalla (Steffe, 1996); así mismo, dicho índice fue mayor en las pastas de almidón a una temperatura de 40 °C.

En la Figura 3.9 se muestran las curvas viscosidad en función de la velocidad de cizalla de las mezclas de almidón nativo al 4% con glucomanano de konjac a 25 °C, asimismo, se muestran las curvas de las mezclas de este almidón al 2% con dicho polisacárido a 40 y 25 °C. Se observa que, al aumentar la concentración tanto de almidón como de GMK en las pastas hay un aumento en el valor de la viscosidad, de igual manera los valores de ésta aumentan al disminuir la temperatura como se aprecia en las curvas de las pastas de las mezclas almidón nativo al 2% con GMK.

También se observa una disminución de la viscosidad al incrementar la velocidad de cizalla, el cual es el comportamiento típico de los materiales fluidificantes a la cizalla, sin embargo, se observa que el modelo reológico es más complejo que el de la potencia esto debido a que no se muestra una relación totalmente lineal en la escala logarítmica.

Dicho comportamiento se ha observado en disoluciones de GMK a diferentes concentraciones, debido que éste a diferencia de muchos polisacáridos fluidificantes, muestra una viscosidad constante en un amplio intervalo de bajas velocidades de cizalla y una vez que se alcanza una velocidad de cizalla suficiente para modificar su estructura por cizallamiento, éste es altamente fluidificante (Martínez-Padilla y Casas-Alencáster, 2016) como se observa en la Figura 3.10, en donde se muestran las curvas de viscosidad en función de la velocidad de cizalla de disoluciones de GMK a 0.15, 0.3 y 0.5% a una temperatura de 25 °C, las cuales se realizaron en un intervalo de velocidad de cizalla de 5 a 1000 s⁻¹.

Se observa que el comportamiento fluidificante del GMK es más notable al aumentar su concentración y que éste se muestra a intervalos altos de velocidad de cizalla.

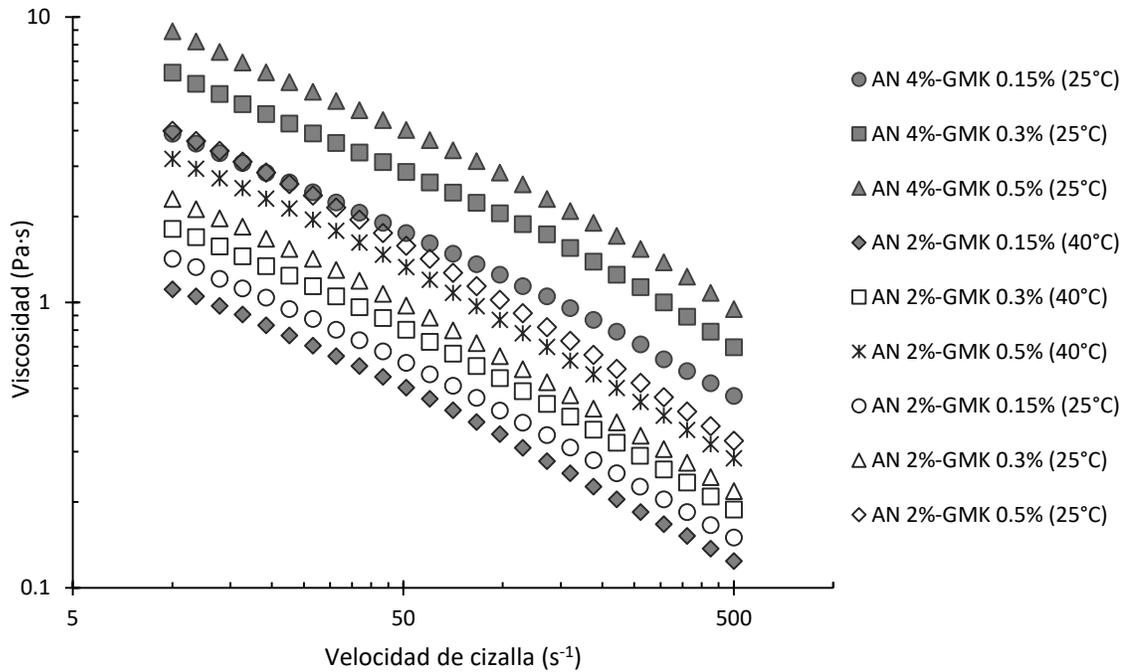


Figura 3.9 Curvas de viscosidad en función de la velocidad de cizalla (ascenso) de las mezclas almidón-glucomanano de konjac a 25 y 40 °C.

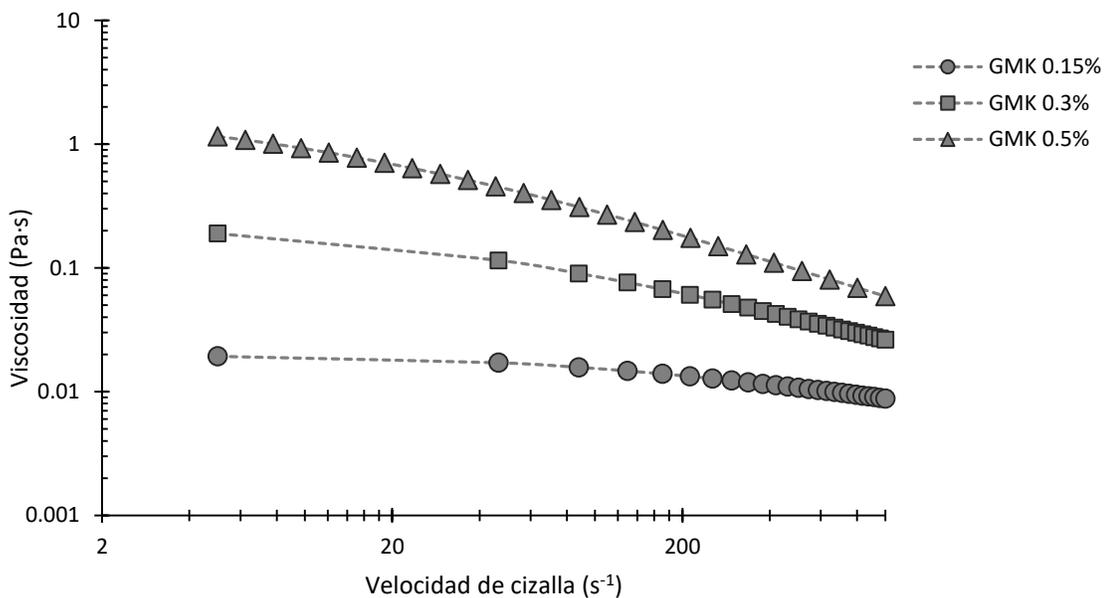


Figura 3.10 Curvas de viscosidad en función de la velocidad de cizalla (ascenso) del glucomanano de konjac.

Tanto las curvas de las mezclas de almidón nativo al 4% con GMK a 25 °C, como las curvas de las mezclas con 2% de almidón a 25 y 40 °C, así como las disoluciones de GMK se ajustaron al modelo de Carreau. En el Cuadro 3.9 se muestra el promedio, desviación estándar y coeficiente de variación de los parámetros reológicos del modelo de Carreau: viscosidad constante a velocidad de cizalla baja (η_0), tiempo característico (λ_c) e índice de comportamiento al flujo (n), así como del coeficiente de determinación (R^2) de las disoluciones de GMK, donde se observa que η_0 presentó un incremento al aumentar la concentración de polisacárido, así mismo se observa un incremento del tiempo característico, el cual es el tiempo necesario que el sistema requiere para adaptarse a una nueva estructura producida por un cambio de velocidad de cizalla (Zhang *et al*, 2001), lo que indica que a mayor concentración se requiere mayor tiempo para que el sistema se adapte a su nueva estructura producida por el cizallamiento, en cuanto al índice del comportamiento al flujo, se observa una disminución, alejándose de un comportamiento newtoniano conforme se incrementaba la concentración de GMK.

Cuadro 3.9 Parámetros reológicos del modelo de Carreau de las disoluciones de glucomanano de konjac.

GMK		25°C			
		η_0 (Pa·s)	λ_c (s)	n	R^2
0.15%	Promedio	0.019	0.020	0.75	0.996
	Desviación estándar	0	0	0	0
	C.V. (%)	0	0	0	0
0.3%	Promedio	0.187	0.053	0.51	0.998
	Desviación estándar	7.07x10 ⁻⁴	0	0	0
	C.V. (%)	3.78	0	0	0
0.5%	Promedio	1.249	0.131	0.42	0.998
	Desviación estándar	9.90x10 ⁻³	7.07x10 ⁻⁴	0	0
	C.V. (%)	0.79	0.54	0	0

En el Cuadro 3.10 y 3.11 se muestran los parámetros reológicos del modelo de Carreau de las mezclas de almidón nativo al 4% con GMK a 25 °C, como de las mezclas con 2% de almidón a 25 y 40 °C respectivamente. De igual manera que en las disoluciones de GMK, η_o presentó un incremento al aumentar tanto la concentración de almidón como la de GMK, así mismo los valores de éste incrementaron al disminuir la temperatura, en cuanto al tiempo característico, éste presentó una disminución y un aumento al incrementar la concentración de 0.15 a 0.3% y de 0.3 a 0.5% de GMK respectivamente, esto sólo se observa en las mezclas a 25 °C ya que a una temperatura de 40 °C este parámetro disminuyó al aumentar la concentración de glucomanano de konjac, lo que indica que al aumentar la concentración de glucomanano en las mezclas a una temperatura de 25 °C se requiere mayor tiempo para que el sistema almidón-glucomanano de konjac se adapte a la nueva estructura producida por el cizallamiento, mientras que a 40 °C, la temperatura puede ser un factor que ayude a que dicho sistema se adapte de manera más rápida a la nueva estructura, por el movimiento browniano.

Cuadro 3.10 Parámetros reológicos del modelo de Carreau de las mezclas de almidón al 4% con GMK a 25 °C.

Muestra		25°C			
		η_o (Pa·s)	λ_c (s)	n	R^2
AN 4%- GMK 0.15%	Promedio	5.93	0.18	0.46	0.999
	Desviación estándar	0.19	7.07×10^{-4}	0	0
	C.V. (%)	3.34	0.38	0	0
AN 4%- GMK 0.3%	Promedio	10	0.21	0.46	0.998
	Desviación estándar	0.46	7.78×10^{-3}	2.12×10^{-3}	0
	C.V. (%)	4.67	3.77	0.45	0
AN 4%- GMK 0.5%	Promedio	12.89	0.17	0.45	0.998
	Desviación estándar	0.03	0	4.24×10^{-3}	0
	C.V. (%)	0.27	0	0.93	0

Cuadro 3.11 Parámetros reológicos del modelo de Carreau de las mezclas de almidón nativo al 2% con GMK a 25 y 40 °C.

Muestra		40 °C				25 °C			
		η_0 (Pa·s)	λ_c (s)	n	R^2	η_0 (Pa·s)	λ_c (s)	n	R^2
AN 2%- GMK 0.15%	Promedio	1.43	0.117	0.41	0.999	1.94	0.144	0.42	0.999
	Desviación estándar	7.07x10 ⁻⁴	0	7.07x10 ⁻⁴	0	0.04	7.07x10 ⁻⁴	5.66x10 ⁻³	0
	C.V. (%)	0.49	0	0.17	0	2.19	0.49	1.36	0
AN 2%- GMK 0.3%	Promedio	2.31	0.115	0.39	0.999	3.04	0.119	0.37	0.999
	Desviación estándar	0.02	7.07x10 ⁻⁴	3.54x10 ⁻³	0	0.08	3.54x10 ⁻³	2.83x10 ⁻³	0
	C.V. (%)	0.92	0.61	0.90	0	2.79	2.96	0.76	0
AN 2%- GMK 0.5%	Promedio	4.20	0.113	0.35	0.999	5.42	0.122	0.33	0.999
	Desviación estándar	0.13	0	7.07x10 ⁻⁴	0	0.02	4.24x10 ⁻³	3.54x10 ⁻³	0
	C.V. (%)	3.03	0	0.20	0	0.39	3.48	1.07	0

3.4.2. Mezclas de almidón acetilado-glucomanano de konjac

En la Figura 3.11 se muestran las curvas de ascenso tanto de las mezclas almidón acetilado al 4% con y sin GMK, a 40 y 25 °C como de las mezclas de este almidón al 2% con y sin GMK al 0.15%, a 40 y 25 °C. Se observa un incremento no lineal del esfuerzo de cizalla con respecto a la velocidad de cizalla, lo cual indica, por la forma de las curvas, que estos sistemas presentan un comportamiento fluidificante a la cizalla. Asimismo, se observa que los valores de esfuerzo de cizalla incrementan al aumentar las concentraciones de ambos polisacáridos, como se observó en las mezclas que contenían almidón nativo que presentaron este comportamiento. También se observa que los valores del esfuerzo de cizalla disminuyen al aumentar la temperatura, ya que las mezclas a 25 °C obtuvieron mayores valores de éste.

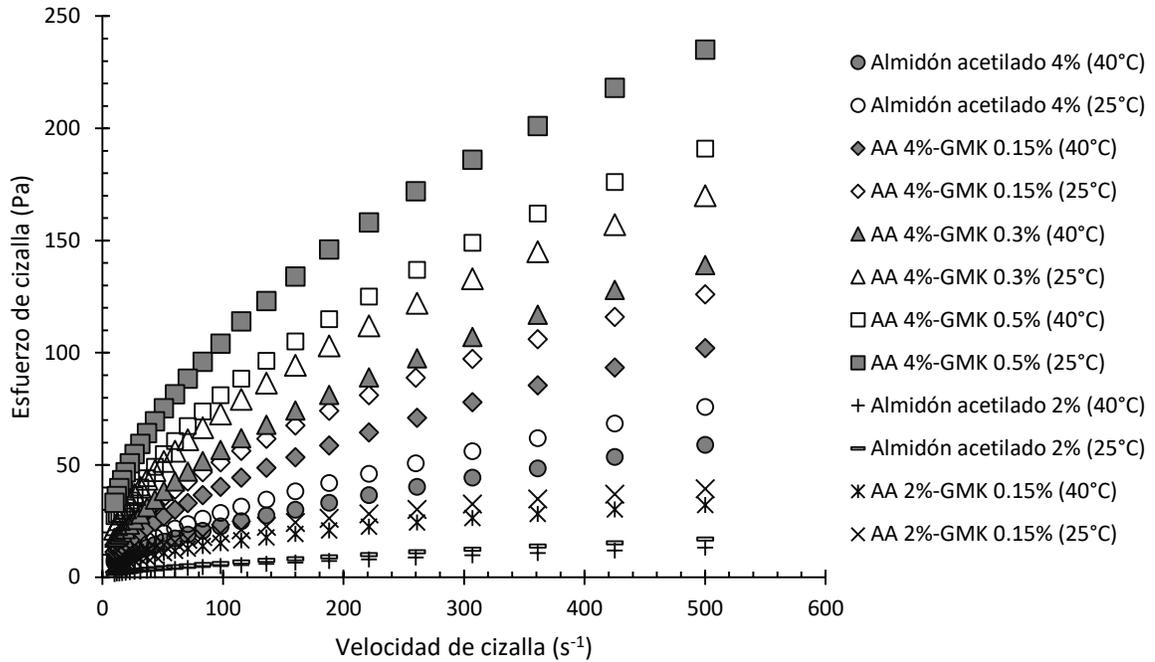


Figura 3.11 Curvas de flujo (ascenso) del almidón acetilado al 4 y 2% con y sin GMK, a 40 y 25 °C.

En el Cuadro 3.12 se muestra el promedio, desviación estándar y coeficiente de variación de los parámetros reológicos y del coeficiente de determinación de las curvas de almidón acetilado al 4% con y sin glucomanano de konjac, a una temperatura de 40 y 25 °C, así como de las curvas de dicho almidón al 2% con y sin glucomanano de konjac al 0.15%, a las mismas temperaturas, las cuales se ajustaron al modelo reológico de Ostwald de Waele o modelo de la potencia. Se observa que los valores del índice de consistencia (k) aumentan con la concentración de ambos polisacáridos, así mismo este índice aumenta al disminuir la temperatura. En cuanto al índice de comportamiento al flujo (n), se observa que en las mezclas que contenían almidón al 4% a una temperatura de 40°C, el valor de éste aumenta y posteriormente disminuye al aumentar la concentración de GMK, mientras que, en las demás mezclas a 40 y 25 °C, el valor de este parámetro sólo disminuye.

Cuadro 3.12 Parámetros reológicos del modelo de la potencia del almidón acetilado al 4 y 2% con y sin GMK, a 40 y 25 °C.

Muestra		40°C			25°C		
		k (Pa·s ⁿ)	n	R^2	k (Pa·s ⁿ)	n	R^2
Almidón acetilado 4%	Promedio	1.78	0.56	0.999	2.09	0.58	0.999
	Desviación estándar	0.01	5x10 ⁻³	0	0.11	3.11x10 ⁻³	0
	C.V. (%)	0.63	0.89	0	5.33	0.54	0
AA 4%-GMK 0.15%	Promedio	2.86	0.58	0.999	4.15	0.55	0.999
	Desviación estándar	0.07	1.34x10 ⁻³	0	0.14	4.24x10 ⁻⁴	0
	C.V. (%)	2.53	0.23	0	3.40	0.08	0
AA 4%-GMK 0.3%	Promedio	4.21	0.56	0.997	6.37	0.52	0.999
	Desviación estándar	0.07	2.83x10 ⁻⁴	0	0.08	1.56x10 ⁻³	0
	C.V. (%)	1.75	0.05	0	1.39	0.29	0
AA 4%-GMK 0.5%	Promedio	6.63	0.54	0.994	10.41	0.50	0.999
	Desviación estándar	0.13	2.12x10 ⁻³	0	0.24	4.24x10 ⁻⁴	0
	C.V. (%)	2.02	0.39	0	2.32	0.08	0
Almidón acetilado 2%	Promedio	0.35	0.57	0.999	0.40	0.62	0.999
	Desviación estándar	0.04	6.7x10 ⁻³	0	0.02	0.03	0
	C.V. (%)	10.99	1.16	0	5.0	4.69	0
AA %-GMK 0.15%	Promedio	1.18	0.54	0.994	1.79	0.51	0.994
	Desviación estándar	0.04	9.33x10 ⁻³	0	0.07	4.03x10 ⁻³	0
	C.V. (%)	3.60	1.71	0	4.31	0.79	0

En la Figura 3.12 se muestra las curvas de viscosidad en función de la velocidad de cizalla de las mezclas de almidón acetilado al 2% con glucomanano de konjac al 0.3 y 0.5% a una temperatura de 40 y 25 °C. Se observa una disminución de la viscosidad al aumentar la velocidad de cizalla, lo cual es comportamiento típico de un material fluidificante a la cizalla, sin embargo, como ocurrió en algunas de las mezclas que contenían almidón nativo, no se muestra una relación totalmente lineal entre estas propiedades, lo que indica que el modelo reológico al que se ajusta es más complejo que el modelo de la potencia y de igual forma, indica que a menor concentración de almidón, el glucomanano de konjac afecta el comportamiento

reológico del almidón, debido a que dicho comportamiento se observa en disoluciones de este polisacárido.

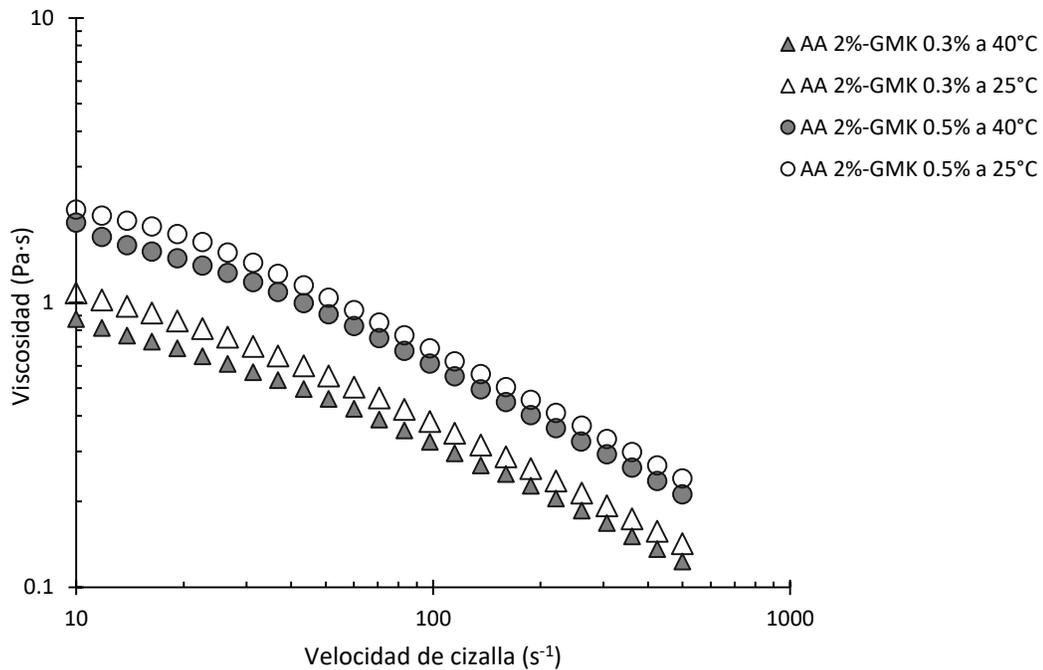


Figura 3.12 Curvas de viscosidad en función de la velocidad de cizalla (ascenso) de las mezclas almidón acetilado al 2%-GMK al 0.3 y 0.5% a 25 y 40 °C.

Las curvas de las mezclas de almidón acetilado al 2% con glucomanano de konjac al 0.3% y 0.5 a una temperatura de 40 y 25 °C se ajustaron al modelo de Carreau al igual que la mayoría de las curvas de las mezclas que contenían almidón nativo. En el cuadro 3.13 se muestra el promedio, desviación estándar y coeficiente de variación de los parámetros reológicos. Se observa que la viscosidad constante a velocidad de cizalla baja (η_0) aumenta con la concentración del GMK y al disminuir la temperatura, mientras que el tiempo característico se mantiene constante al aumentar la concentración de GMK en las mezclas a una temperatura de 40 °C, lo que indica que a esta temperatura, el aumentar la concentración de GMK no afecta el tiempo en el que el sistema se tarda en adaptarse a la nueva estructura producida

por el cambio de velocidad de cizalla, sin embargo a una temperatura de 25 °C este tiempo disminuye.

Cuadro 3.13 Parámetros reológicos del modelo de Carreau de las mezclas de almidón acetilado al 2% con GMK al 0.3 y 0.5%, a 40°C y 25°C

Muestra		40°C				25°C			
		η_0 (Pa·s)	λ_c (s)	n	R^2	η_0 (Pa·s)	λ_c (s)	n	R^2
AA 2%- GMK 0.3%	Promedio	1.01	0.079	0.45	0.998	1.27	0.079	0.42	0.999
	Desviación estándar	0.04	2.90x10 ⁻³	7.07x10 ⁻³	0	0.08	3.54x10 ⁻³	1.41x10 ⁻³	0
	C.V. (%)	3.87	3.67	1.55	0	6.54	4.45	0.33	0
AA 2%- GMK 0.5%	Promedio	2.08	0.079	0.40	0.996	2.39	0.067	0.34	0.999
	Desviación estándar	0.03	1.20x10 ⁻³	3.54x10 ⁻³	0	0.03	2.12x10 ⁻³	3.54x10 ⁻³	0
	C.V. (%)	1.53	1.52	0.88	0	1.36	3.17	1.03	0

3.5. Propiedades viscoelásticas

Las propiedades viscoelásticas sólo se les determinó a los geles de almidón al 4% y a las mezclas que contenían 0.5% de GMK, así como a la disolución de GMK al 0.5%, debido a que esta concentración de dicho polisacárido presentó un mayor efecto en la viscosidad, al igual que en la temperatura a la que se alcanzó el pico de viscosidad (viscosidad máxima) y a la que inicia la gelatinización.

3.5.1. Determinación de la zona viscoelástica lineal

En Figura 3.13 se muestra la zona viscoelástica lineal de las pastas de almidón al 4% y de las mezclas con GMK al 0.5%. Para determinar esta zona se aplicó un barrido de deformación de 0.001 a 0.01% a una velocidad angular constante de 10 s⁻¹, mientras que en la Figura 3.14 se muestra la zona viscoelástica lineal de la disolución de glucomanano de konjac, la cual se determinó aplicando un barrido de deformación superior, de 1 a 5% a la misma velocidad angular. Se observa que tanto el módulo elástico (G') como el viscoso (G'') son independientes de la deformación aplicada y por lo tanto las muestras se encuentran dentro de la zona viscoelástica lineal.

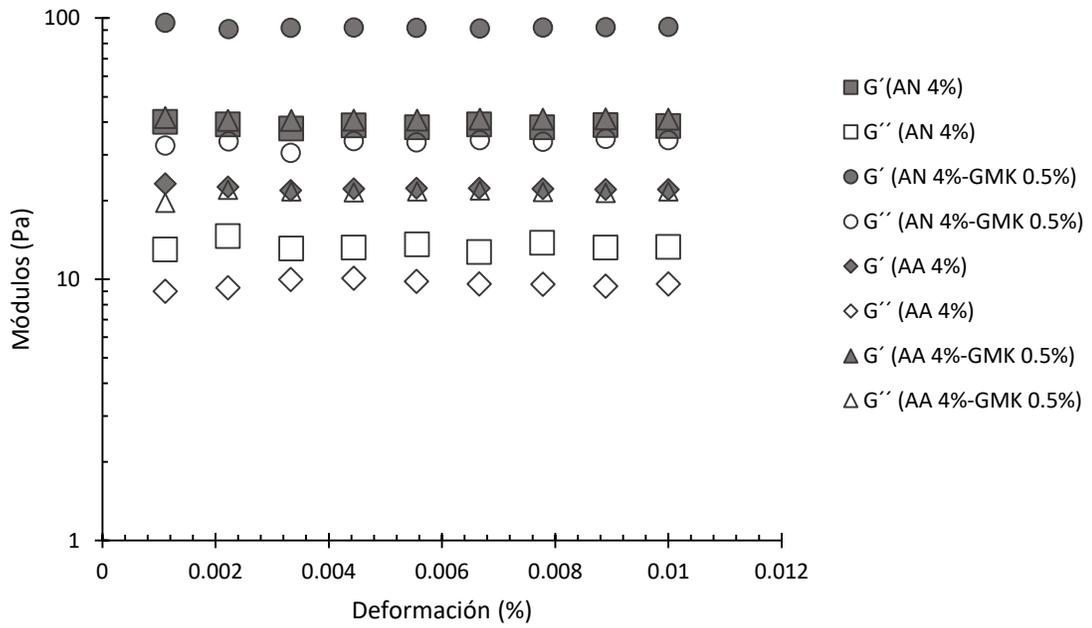


Figura 3.13 Zona viscoelástica lineal del almidón nativo y acetilado al 4% con y sin glucomanano de konjac al 0.5%.

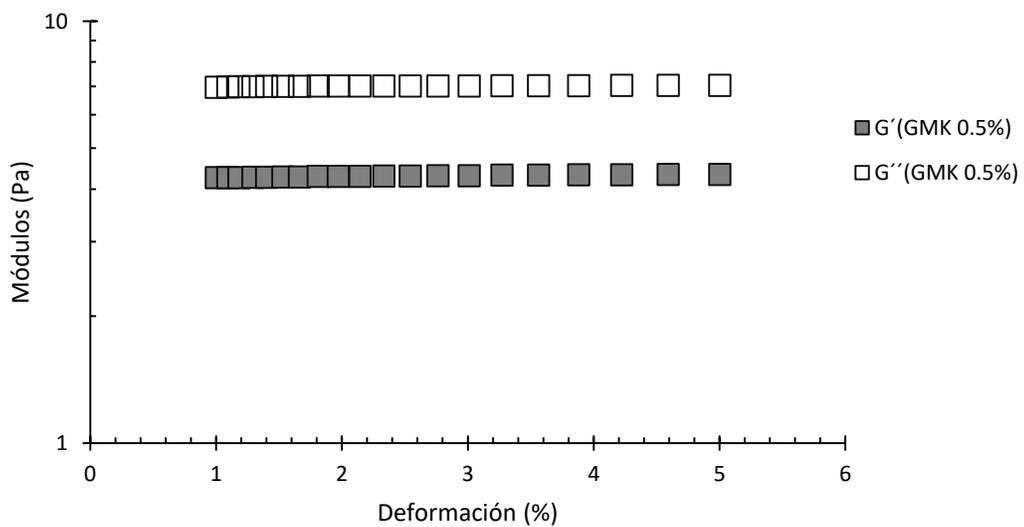


Figura 3.14 Zona viscoelástica lineal del glucomanano de konjac al 0.5%.

3.5.2. Barrido de velocidad angular

En la Figura 3.15 se muestra el espectro mecánico de las pastas de almidón nativo y acetilado al 4%, así como sus mezclas con glucomanano de konjac al 0.5% y del glucomanano solo. Se realizó un barrido de velocidad angular de 0.5 a 100 s⁻¹, aplicando una deformación de 0.005% en el caso de los almidones y sus mezclas con GMK mientras que para la disolución de dicho polisacárido se aplicó una deformación de 2%, las cuales están dentro de la zona viscoelástica lineal. Se observa que tanto en las pastas que solo contenían almidón como en las mezclas, el módulo elástico es superior al módulo viscoso, además de que no existe un cruce entre ambos módulos a lo largo del barrido de velocidad angular, lo que indica que en éstas predomina un comportamiento sólido viscoelástico, mientras que en el glucomanano de konjac se observa que el módulo viscoso es superior al módulo elástico, predominando un comportamiento fluido, además de observarse que a medida que incrementa la velocidad angular, los módulos se acercan, tal y como ocurre en una disolución diluida, en donde los módulos son considerablemente sensibles a la deformación y el módulo elástico es mayor que el módulo viscoso sobre un rango de velocidad angular, pero a altas frecuencias éstos tienden a acercarse (Steffe, 1996).

La adición del GMK aumentó los valores tanto del módulo elástico (G') como el viscoso (G''), este mismo comportamiento fue observado por Yoshimura et al. (1988) en pastas de almidón de maíz en mezcla con GMK. Los valores de G' de las pastas de almidón nativo con y sin GMK fueron ligeramente mayores que las preparadas a partir de almidón acetilado, así mismo su dependencia a la velocidad angular fue menor, lo cual indica que la estructura de red de gel del almidón nativo y su mezcla con GMK es más fuerte (Chaisawang y Suphantharika, 2005). De acuerdo con Yoshimura et al. (1988), tanto las pastas de almidón nativo y acetilado como sus mezclas con GMK presentan el comportamiento de un gel débil.

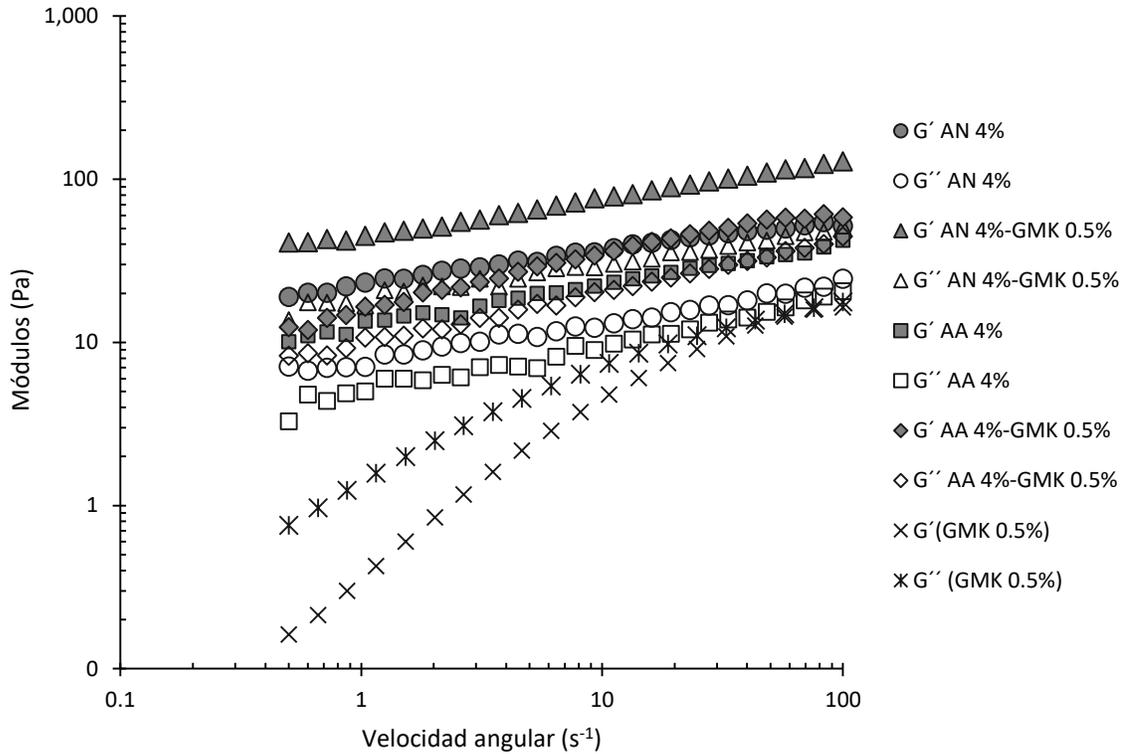


Figura 3.15 Espectro mecánico del glucomanano de konjac al 0.5% y del almidón nativo y acetilado al 4% con y sin glucomanano.

En la Figura 3.16 y 3.17 se muestra la $\tan(\delta)$ de las pastas de ambos almidones, así como sus mezclas con GMK y del GMK solo, en función de la velocidad angular, se observa, como se mencionó anteriormente, que tanto las pastas que solo contenían almidón como las mezclas con GMK, muestran un comportamiento sólido viscoelástico, ya que los valores de la $\tan(\delta)$ son menores de la unidad, así mismo se observa que el GMK provoca una disminución de la tangente, mientras que el glucomanano de konjac presentó valores de $\tan(\delta)$ mayores a la unidad mostrando, como se mencionó anteriormente, un comportamiento fluido.

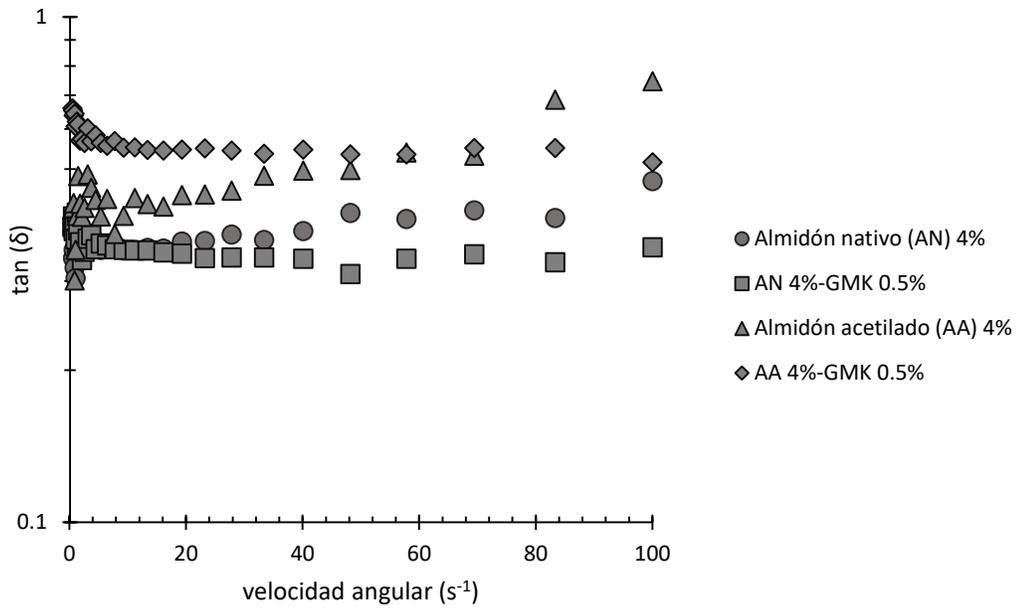


Figura 3.16 Variación de la $\tan \delta$ en función de la velocidad angular de las pastas de almidón nativo y acetilado con y sin glucomanano de konjac.

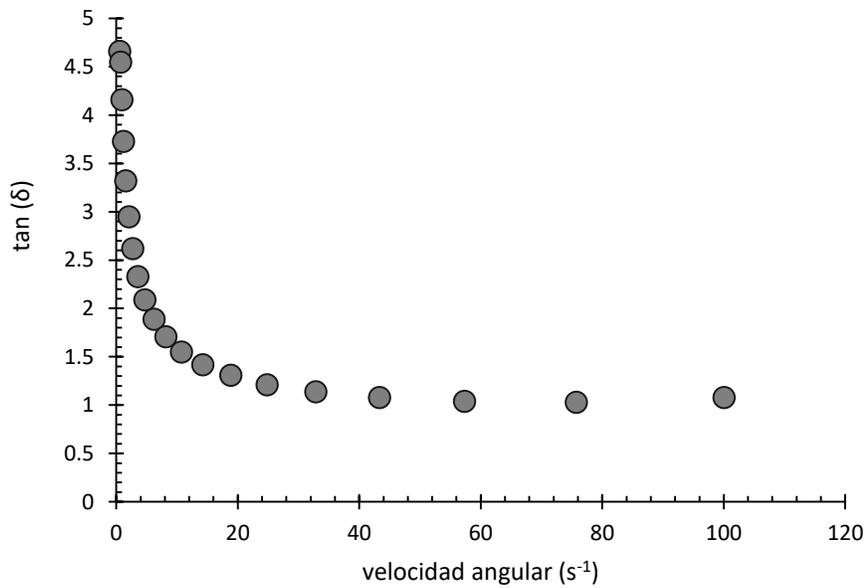


Figura 3.17 Variación de la $\tan \delta$ en función de la velocidad angular del glucomanano de konjac a 0.5%.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

El glucomanano de konjac (GMK) aumentó la viscosidad de los almidones durante y al final de la gelatinización, disminuyendo la temperatura a la que alcanzan la máxima viscosidad, además de cambiar el perfil de viscosidad durante el calentamiento y enfriamiento.

El GMK aumentó la estabilidad de los almidones durante el enfriamiento ya que el porcentaje de aumento de viscosidad durante dicho proceso disminuyó, lo que implicaría que el GMK retarda la retrogradación de los almidones, sin embargo, éste disminuyó la estabilidad de los almidones tanto al calentamiento como al cizallamiento debido a que los valores del porcentaje de pérdida de viscosidad durante el calentamiento aumentaron.

En cuanto a las propiedades de flujo, el GMK tuvo un mayor efecto en las mezclas con almidón nativo, ya que sus curvas de flujo de ascenso de velocidad de cizalla se ajustaron en su mayoría al modelo de Carreau, el cual describe el comportamiento de las disoluciones de GMK, asimismo las mezclas que contenían este almidón al 4% a 25° C fueron las únicas que presentaron tixotropía. En cuanto a las curvas de flujo de ascenso de velocidad de cizalla de las mezclas que contenían almidón acetilado se ajustaron mayormente al modelo de la potencia, lo que indica que el GMK no tuvo gran efecto en las propiedades de flujo de este almidón.

En ambos almidones, así como en las mezclas almidón-glucomanano de konjac predominó un comportamiento sólido viscoelástico de un gel débil, mientras que en las disoluciones de GMK predominó un comportamiento fluido.

Al evaluar el efecto de diferentes concentraciones de glucomanano de konjac en la gelatinización de almidones de papa, se encontró que éste cambió considerablemente su perfil de viscosidad, es por ello que se recomienda estudiar

el efecto de este polisacárido en almidones de diferentes fuentes, especialmente en almidones nativos, debido a que se encontró que el glucomanano de konjac tuvo un mayor efecto en el almidón nativo que en el modificado y de esta manera promover el uso de estas mezclas, especialmente en formulaciones de alimentos en donde se requiera alta consistencia pero poca cantidad de almidón.

REFERENCIAS

- Ahmed, J., Ramaswamy, H. (2006). Viscoelastic properties of sweet potato puree infant food. *Journal of Food Engineering*, 79, 376-382.
- Ai, Y., Jane, J.L. (2015). Gelatinization and rheological properties of starch. *Starch*, 67, 213-224.
- Ai, Y., Jane, J.L. (2016). Starch. Structure, property and determination. *Encyclopedia of Food and Health*, 165-174.
- Álvarez-Manceño, F.J. (2007). Evaluación del glucomanano de konjac como excipiente base en formas de dosificación sólidas de liberación modificada. Tesis de doctorado de Farmacia y Tecnología Farmacéutica. Universidad de Santiago de Compostela, Santiago de Compostela, España
- Álzate-Carvajal, E. N., Quintero-Castaño, V. D., Lucas-Aguirre, J. C. (2013). Determinación de las propiedades térmicas y composicionales de la harina y almidón de chachafruto (*Erytina Edulis Triana Ex Micheli*). *Temas agrarios*, 18, 21-35.
- Badui, S. D. (2012). Química de los alimentos. 5a ed. México: Pearson.
- Barnes, H.A, Hutton, J.F., Walters, K. (1989). An Introduction to Rheology. Amsterdam Holanda: Elsevier.
- Behera, S.S., Ray, R.C. (2016). Konjac glucomannan, a promising polysaccharide of *Amorphophallus Konjac* K. Koch in health care. *International Journal of Biological Macromolecules*, 92, 942-956.
- Bello-Pérez, L. A., Agama-Acevedo, E., Zamudio-Flores, P. B., Mendez-Montevalvo, G., Rodríguez-Ambriz, S. L. (2010). Effect of low and high acetylation degree in the morphological, physicochemical and structural characteristics of barley starch. *Food Science and Technology*, 43, 1434-1440.
- BeMiller, J. N. (2011). Pasting, paste, and gel properties of starch-hydrocolloids combinations. *Carbohydrate Polymers*, 86, 386-423.
- Bergthaller, W. (2004). Developments in potato starches. In: Starch in food. Structure, function and applications (A. C. Eliasson, ed.), Pp. 241-257. USA: Woodhead Publishing.

- Bertoft, E., Blennow, A. (2016). Structure of potato starch. In: *Advances in Potato Chemistry and Technology*. (J. Singh, L. Kaur, eds.), Pp 57-73. UK: Elsevier.
- Bourne, M.C. (2002). *Food Texture and Viscosity: Concept and Measurement*. 2^a ed. New York, USA: Elsevier.
- Chaisawang, M., Supphantharika, M. (2005). Effects of guar gum and xanthan gum additions on physical and rheological properties of cationic tapioca starch. *Carbohydrate Polymers*, 61, 288-295.
- Chandanasree, D., Gul, K., Riar, C.S. (2016). Effect of hydrocolloids and dry heat modification on physicochemical, thermal, pasting and morphological characteristics of cassava (*Manihot esculenta*) starch. *Food Hydrocolloids*, 52, 175-182.
- Chhabra, R.P., Richardson, J.F. (2008). *Non-Newtonian Flow and Applied Rheology: Engineering Applications*. 2^a ed. Oxford, UK: Butterworth-Heinemann.
- Colussi, R., Mello-El Halal, S. L., Zanella-Pinto, V., Bartz, J., Gutkoski, L. C., Da Rosa-Zavareze, E., Guerra-Dias, A. R. (2015). Acetylation of rice starch in aqueous medium for use in food. *Food Science and Technology*, 62, 1076-1082
- Copeland, L., Blazek, J., Salam, H., Tang, M. C. (2009). Form and functionality of starch. *Food Hydrocolloids*, 23, 1527-1534.
- Day L., Golding M. (2016). Food structure, rheology and texture. In: *Reference Module in Food Science*. (G. Smithers, ed.), Pp 1-5. USA: Elsevier.
- Eliasson, A. C., Gudmundsson, M. (2006). Starch: Physicochemical and functional aspects. In: *Carbohydrates in food*. (A. C. Eliasson, ed.), Pp 391-470. New York, USA: Taylor & Francis.
- Fennema, O.R., Damodaran, S., Parkin, K. L. (2010). *Química de los Alimentos*. 3^a ed. España: Acribia.
- Franssen, M.C.R., Boeriu, C.G. (2014). Chemically modified starch; allyl and epoxy starch derivatives, their synthesis and characterization. In: *Starch Polymers from Genetic Engineering to Green Applications*. (P.J. Halley, L. Avérous, eds.), Pp 145-184. USA: Elsevier

- Funami, T., Kataoka, Y., Omoto, T., Goto, Y., Asai, I., Nishinari, K. (2005). Effects of non-ionic polysaccharides on the gelatinization and retrogradation behavior of wheat starch. *Food Hydrocolloids*, 19, 1-13.
- Grommers, H.E., Van der Krogt, D.A. (2009). Potato starch production, modifications and uses. In: Starch chemistry and technology. (J. BeMiller, R. Whistler, eds.), Pp. 511-538. USA: Elsevier.
- Gunasekaran, S., Mehmet, M. (2000). Dynamic oscillatory shear testing of foods, selected applications. *Trends in Food Science and Technology*, 11, 115-127.
- Hedayati, S., Fakhri, S., Koocheki, A., Farahnaky, A., Majzoobi, M. (2016a). Physical properties of pregelatinized and granular cold water swelling maize starches at different pH values. *International Journal of Biological Macromolecules*, 91, 730-735.
- Hedayati, S., Fakhri, S., Koocheki, A., Farahnaky, A., Majzoobi, M. (2016b). Comparing the effects of sucrose and glucose on functional properties of pregelatinized maize starch. *International Journal of Biological Macromolecules*, 88, 499-504.
- Heyman, B., Depypere, F., Van der Meeren, P., Dewettinck, K. (2013). Processing of waxy starch/xanthan gum mixtures within the gelatinization temperature range. *Carbohydrate Polymers*, 96, 560-567.
- Hoover, R. (2001). Composition, molecular structure, and physicochemical properties of tuber and root starches: a review. *Carbohydrate Polymers*, 45, 253-267.
- Ibarz, A., Castell, E., Barbosa, G. (2009). Newtonian and Non-Newtonian flow. In: Food Engineering. (G. Barbosa, ed.), Pp 11-58. France: Encyclopedia of Life Support Systems. UNESCO.
- Jane, J.L. (2009). Structure features of starch granules II. In: Starch Chemistry and Technology. (J. BeMiller, R. Whistler, eds.), Pp. 193-227. USA: Elsevier.
- Jian, W., Siu, K.C., Wu, J.Y. (2015). Effects of pH and temperature on colloidal properties and molecular characteristics of konjac glucomannan. *Carbohydrates Polymers*, 134, 285-292.

- Khanna, S., Tester, R.F. (2006). Influence of purified konjac glucomannan on the gelatinization and retrogradation properties of maize and potato starches. *Food Hydrocolloids*, 20, 567-576.
- Krystyjan, M., Ciesielski, W., Khachatryan, G., Sikora, M., Tomasik, P. (2015). Structure, rheological, texture and thermal properties of potato starch-inulin gels. *Food Science and Technology*, 60, 131-136.
- Lagarrigue, S., Álvarez, G. (2001). The rheology of starch dispersions at high temperatures and high shear rates: a review. *Food Engineering*, 50, 189-202.
- Lucas-Aguirre, J. C., Quintero-Castaño, V. D. (2016). Caracterización reológica de almidón y evaluación morfológica de 20 variedades de musáceas (*Musa sp.*), del banco de germoplasma Fedeplátano Chinchiná-Caldas, Colombia. *Acta Agronómica*, 65, 218-225.
- Lui, Q. (2005). Understanding starches and their role in foods In: *Food Carbohydrates Chemistry, Physical Properties and Applications*. (S. W. Cui, ed.), Pp 309-355. USA: CRC Press.
- Lui, Q., Donner, E., Tarn, R., Singh, J., Chung, H. J. (2009). Advanced analytical techniques to evaluate the quality of potato and potato starch In: *Advances in Potato Chemistry and Technology*. (J. Singh, L. Kaur, eds.), Pp 221-248. USA: Elsevier
- Martínez-Padilla, L. P. (2015a). Guía rápida de operación: Reómetro Rheolab QC. Documento interno, LAPRYFAL, FESC, UNAM.
- Martínez-Padilla, L. P. (2015b). Guía rápida de operación: Reómetro MCR301. Documento interno, LAPRYFAL, FESC, UNAM.
- Martínez-Padilla, L. P., López-Araiza, F., Tecante, A. (2004). Steady and oscillatory shear behavior of fluid gels formed by binary mixtures of xanthan and gellan. *Food Hydrocolloids*, 18, 471-481.
- Martínez-Padilla, L.P., Casas-Alencáster, N. (2016). Glucomanano de konjac, un polisacárido bifuncional de origen asiático. En *Alimentos Funcionales de Hoy*. (M.E. Ramírez Ortiz, ed.), p. 67-96. Barcelona, España: OmniaScience.
- Mason, W. R. (2009). Starch use in foods. In: *Starch chemistry and technology*. (J. BeMiller, R. Whistler, eds.), Pp. 511-538. USA: Elsevier.

- Mbougueng, P. D., Tenin, D., Scher, J., Tchiégang, C. (2012). Influence of acetylation on physicochemical, functional and thermal properties of potato and cassava starches. *Journal of Food Engineering*, 108, 320-326.
- Morikawa, K., Nishinari, K. (2000). Rheological and DSC studies of gelatinization of chemically modified starch heated at various temperatures. *Carbohydrate Polymers*, 43, 241-247
- Nishinari, K. (2000). Konjac glucomannan. In: Novel Macromolecules in Food Systems. (G. Doxastaki, V. Kiosseoglou, eds.), Pp 309-330. Grecia: Elsevier.
- Parry, J.M. (2010). Konjac glucomannan. In: Food Stabilisers, Thickeners and Gelling Agents. (A. Imeson, ed.), Pp 198-217. UK: Wiley-Blackwell.
- Rao, M. A. (2014). Rheology of fluid, semisolid and solid food, 3a ed. U.S.A: Springer.
- Rivas-Gonzales, M., Zamudio-Flores, P. B., Bello-Pérez, L. A. (2009). Efecto del grado de acetilación en las características morfológicas y fisicoquímicas del almidón de plátano. *Revista Mexicana de Ingeniería Química*, 8, 291-297.
- Saartrat, S., Puttanlek, C., Rungsardthong, V., Uttapap, D. (2005). Paste and gel properties of low-substituted acetylated canna starches. *Carbohydrate Polymers*, 61, 211-221.
- Shah, B. R., Li, B., Wang, L., Liu, S., Li, Y., We, X., Weiping, J., Zhenshun, Li. (2015). Health benefits of konjac glucomannan with special focus on diabetes. *Bioactive Carbohydrates and Dietary Fibre*, 5, 179-187.
- Shi, X., BeMiller, J. N. (2002). Effects of food gums on viscosities of starch suspensions during pasting. *Carbohydrate Polymers*, 50, 7-18.
- Sikora, M., Adamczyk, G., Krystyjan, M., Dobosz, A., Tomasik, P., Berski, W., Lukasiewicz, M., Piotr, I. (2015). Thixotropic properties of normal potato starch depending on the degree of granules pasting. *Carbohydrates Polymers*, 121, 254-264.
- Singh, J., Colussi, R., McCarthy, O.J., Kaur, L. (2016). Potato starch and modification. In: Advances in Potato Chemistry and Technology. (J. Singh, L. Kaur, eds.), Pp 195-207. UK: Elsevier.

- Singh, J., Kaur, L., McCarthy, O. J. (2007). Factors influencing the physicochemical, morphological, thermal and rheological properties of some chemically modified starches for food applications. A review. *Food Hydrocolloids*, 21, 1-22.
- Singh, N., Chawla, D., Singh, J. (2004). Influence of acetic anhydride on physicochemical, morphological and thermal properties of corn and potato starch. *Food Chemistry*, 86, 601-608.
- Singh, N., Singh J., Kaur, L., Sodhi, N. S., Gill B. S. (2003). Morphological, thermal and rheological properties of starches from different botanical sources. *Food Chemistry*, 81, 219-231.
- Steffe, J.F. (1996). *Rheological Methods in Food Process Engineering*. 2^a ed. USA: Freeman Press.
- Tabilo-Munizaga, G., Barbosa-Cánovas, G. (2005). Rheology for the food industry. *Journal of Food Engineering*, 67, 147-156.
- Taggart, P. (2004). Starch as an ingredient: manufacture and applications. (Chapter 12) In: *Starch in food. Structure, function and applications*. (A. C. Eliasson ed.), Pp. 241-257. USA: Woodhead Publishing.
- Takigami, S. (2009). Konjac glucomannan. In: *Handbook Hydrocolloids*. (G.O. Phillips, P.A. Williams, eds.), Pp 889-901. USA: Woodhead Publishing.
- Tester, R. F., Karkalas, J., Qi, X. (2004). Starch. Composition, fine structure and architecture. *Cereal Science*, 39, 151-165.
- Wang, C., Xu, M., Lv, W. P., Qiu, P., Gong, Y.Y., Li, D. S. (2012). Study on rheological behavior of konjac glucomannan. *Physics Procedia*, 33, 25-30.
- Xie, S. X., Lui, Q., Cui, S. W. (2005). Starch modification and applications. In: *Food Carbohydrates Chemistry, Physical Properties and Applications*. (S. W. Cui, ed.), Pp 362-410. USA: CRC Press.
- Yoshimura, M., Takaya, T., Nishinari, K. (1998). Rheological studies on mixtures of corn starch and konjac glucomannan. *Carbohydrate Polymers*, 35, 71-79.
- Yusuph, M., Tester, R.F., Ansell, R., Shape, C.E. (2003). Composition and properties of starches extracted from tubers of different potato varieties grown under the same environmental conditions. *Food Chemistry*, 82, 283-289.

- Zhong, Q., Daubert, C.R. (2013). Food Rheology In: Handbook of Farm, Dairy and Food Machinery Engineering. (M. Kutz, ed.), Pp 403-426, USA: Elsevier.
- Zhou, F., Lui, Q., Zhang, H., Chen, Q., Kong, B. (2016). Potato starch oxidation induced by sodium hypochlorite and its effect on functional properties and digestibility. *International Journal of Biological Macromolecules*, 84, 410-417.
- Zhou, Y., Wang, D., Zhang, L., Du, X., Zhou, X. (2008). Effect of polysaccharides on gelatinization and retrogradation of wheat starch. *Food Hydrocolloids*, 22, 505-512.