



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE
MÉXICO**

FACULTAD DE QUÍMICA

**MUCÍLAGO DE *Opuntia ficus indica*.
EXTRACCIÓN Y APLICACIÓN COMO
AGENTE DISPERSANTE EN SUSPENSIONES
ALIMENTICIAS**

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE

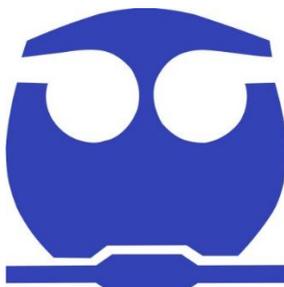
QUÍMICA DE ALIMENTOS

PRESENTA:

PERLA PATRICIA SALAZAR RAMÍREZ

DIRECTORA DE TESIS:

DRA. MARÍA SOLEDAD CÓRDOVA AGUILAR



Ciudad Universitaria, Cd. Mx., 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.

JURADO ASIGNADO:

PRESIDENTE: Dr. José Guillermo de Jesús Aguilar Osorio
VOCAL: M. en C. Lucía Cornejo Barrera
SECRETARIO: Dra. María Soledad Córdova Aguilar
1er. SUPLENTE: M. en C. Tania Gómez Sierra
2° SUPLENTE: M. en C. Miguel Ángel Hernández Valdepeña

**SITIO DONDE SE DESARROLLÓ EL TEMA: CENTRO DE CIENCIAS APLICADAS Y
DESARROLLO TECNOLÓGICO, LABORATORIO DE INGENIERÍA DE PROCESO, UNAM.
INSTITUTO DE INVESTIGACIONES BIOMÉDICAS, UNIDAD DE BIOPROCESOS, UNAM.**

ASESOR DEL TEMA: DRA. MARÍA SOLEDAD CÓRDOVA AGUILAR

SUSTENTANTE: PERLA PATRICIA SALAZAR RAMÍREZ

Este trabajo fue parcialmente financiado por la Secretaría de Ciencia, Tecnología e Innovación de la Ciudad de México, proyecto SECITI/097/2017 CDMX, por lo que se agradece a la institución.

Se agradece de igual manera al Centro de Ciencias Aplicadas y Desarrollo Tecnológico y al Instituto de Investigaciones Biomédicas, pues prestaron sus instalaciones y material para el desarrollo del presente trabajo; especialmente a la Dra. María Soledad Córdova e Ing. Abel Blancas Cabrera por sus tutorías y apoyo dentro de cada institución, respectivamente.

CONTENIDO

Página

ÍNDICE DE FIGURAS.....	I
ÍNDICE DE TABLAS.....	IV
RESUMEN	1
INTRODUCCIÓN	2
CAPÍTULO 1. MARCO TEÓRICO	4
1. Antecedentes	4
1.1. Generalidades del nopal	4
1.1.1. Composición química general	7
1.1.2. Usos del nopal.....	7
1.2. El mucílago de nopal	8
1.2.1. Composición química del mucílago de nopal	9
1.2.2. Métodos de extracción del mucílago de nopal	11
1.2.3. Usos del mucílago de nopal.....	13
1.2.4. Reología de soluciones acuosas de mucílagos de nopal	14
1.3. Agentes dispersantes para alimentos	17
1.3.1. Funcionalidad de agentes dispersantes	17
CAPÍTULO 2. HIPÓTESIS Y OBJETIVOS	19
Hipótesis	19
Objetivo general.....	19
Objetivos particulares	19
CAPÍTULO 3. METODOLOGÍA	20
3.1. Método de extracción y secado del mucílago de nopal.....	20
3.2. Caracterización fisicoquímica del mucílago de nopal	22
3.2.1. Análisis químico proximal del mucílago de nopal.....	22
3.2.2. Composición de azúcares del mucílago de nopal	22
3.2.2.1. Cromatografía en capa fina del mucílago de nopal	22
3.2.3. Caracterización reológica de soluciones de mucílago de nopal reconstituido	23
3.3. Aplicación del mucílago de nopal como agente dispersante en suspensiones alimenticias.....	24
3.3.1. Desarrollo de suspensiones alimenticias para pacientes post-cirugía bariátrica.....	24
3.3.2. Evaluación del mucílago de nopal como agente dispersante	26
3.3.2.1. Pruebas de estabilidad.....	26

3.3.2.2. Caracterización reológica	26
3.3.2.3. Color.....	28
CAPÍTULO 4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	29
4.1. Método de extracción y secado del mucílago de nopal.....	29
4.2. Caracterización fisicoquímica del mucílago de nopal	32
4.2.1. Análisis químico proximal	32
4.2.2. Composición de azúcares.....	35
4.2.3. Caracterización reológica de soluciones de mucílago reconstituido ..	37
4.3. Aplicación del mucílago de nopal como agente dispersante en suspensiones alimenticias.....	40
4.3.1. Evaluación del mucílago de nopal como agente dispersante	40
4.3.1.1. Pruebas de estabilidad.....	40
4.3.1.2. Caracterización reológica	45
4.3.1.3. Color.....	58
CONCLUSIONES.....	61
PERSPECTIVAS.....	62
REFERENCIAS.....	63
ANEXOS.....	69
Anexo 1. Curvas de viscosidad en corte de suspensiones alimenticias.	69
Anexo 2. Módulos dinámicos en función de la deformación.	71
Anexo 3. Extenso publicado en memorias del Congreso "Latin Food 2016".	73
Anexo 4. Cartel expuesto en Congreso "Latin Food 2016".....	79

ÍNDICE DE FIGURAS

Página

Figura 1. Planta de nopal.....	5
Figura 2. Origen y destino de la producción y comercialización de nopal en México en 2015.	6
Figura 3. Ejemplo de la estructura parcial propuesta para el mucílago de <i>Opuntia ficus indica</i>	11
Figura 4. Curva de viscosidad en corte del mucílago de nopal reconstituido en agua. Efecto de la concentración del mucílago en la viscosidad de flujo constante a 25°C.	15
Figura 5. Comportamiento de los módulos dinámicos de almacenamiento G' y pérdida G'' en función de la frecuencia angular para diferentes concentraciones de mezclas de mucílago de nopal y goma xantana. Símbolos rellenos, G' y símbolos vacíos, G''	16
Figura 6. Diagrama de flujo de la obtención del mucílago de <i>Opuntia ficus indica</i> en polvo.....	20
Figura 7. Diagrama de flujo de extracción y secado del mucílago de nopal <i>Opuntia ficus indica</i>	29
Figura 8. Cromatografía en capa fina del mucílago de nopal.....	36
Figura 9. Curva de viscosidad en corte del mucílago de nopal reconstituido en agua.	38
Figura 10. Curva de viscosidad en corte del mucílago de nopal reconstituido en jugo de manzana.	38
Figura 11. Porcentaje de sedimentación de harinas en las diferentes suspensiones alimenticias desarrolladas.	41
Figura 12. Comparación entre los porcentajes de sedimentación de harinas manteniendo fija la quinoa y variando la leguminosa en la mezcla.	44

Figura 13. Comparación entre los porcentajes de sedimentación de harinas manteniendo fija la lenteja y variando el cereal en la mezcla. .	44
Figura 14. Curva de viscosidad en corte de suspensión de avena y lenteja con mucílago al 10% p/p.....	45
Figura 15. Curva de viscosidad en corte de suspensión de amaranto y lenteja con mucílago al 10% p/p.	46
Figura 16. Módulos dinámicos de almacenamiento (G') y pérdida (G'') en función del porcentaje de deformación a frecuencia de 1Hz, para diferentes concentraciones de la mezcla quinoa-lenteja y mucílago de nopal.	48
Figura 17. Módulos dinámicos de almacenamiento (G') y pérdida (G'') en función del porcentaje de deformación a frecuencia de 1Hz, para diferentes concentraciones de la mezcla amaranto-lenteja y mucílago de nopal.	49
Figura 18. Comportamiento de los módulos dinámicos de almacenamiento G' y pérdida G'' en función de la frecuencia angular para diferentes concentraciones de mezclas de harinas y mucílago de nopal al 10% p/p.	54
Figura 19. Comportamiento del módulo complejo en función del esfuerzo cortante para diferentes mezclas de harinas.	56
Figura 20. Curva de viscosidad en corte de suspensión de quinoa y lenteja con mucílago al 10% p/p.....	69
Figura 21. Curva de viscosidad en corte de suspensión de quinoa y haba con mucílago al 10% p/p.....	70
Figura 22. Curva de viscosidad en corte de suspensión de quinoa y frijol con mucílago al 10% p/p.....	70
Figura 23. Módulos dinámicos de almacenamiento (G') y pérdida (G'') en función del porcentaje de deformación a frecuencia de 1Hz, para	

diferentes concentraciones de la mezcla quinoa-haba y mucílago de nopal.	71
Figura 24. Módulos dinámicos de almacenamiento (G') y pérdida (G'') en función del porcentaje de deformación a frecuencia de 1Hz, para diferentes concentraciones de la mezcla quinoa-frijol y mucílago de nopal.	72
Figura 25. Módulos dinámicos de almacenamiento (G') y pérdida (G'') en función del porcentaje de deformación a frecuencia de 1Hz, para diferentes concentraciones de la mezcla avena-lenteja y mucílago de nopal.	72

ÍNDICE DE TABLAS

Página

Tabla 1. Composición general de los cladodios de nopal <i>Opuntia</i>	7
Tabla 2. Caracterización cromatográfica de los azúcares de seis especies de <i>Opuntia</i>	10
Tabla 3. Métodos de extracción del mucílago de nopal.	12
Tabla 4. Rendimientos del proceso de extracción del mucílago de <i>Opuntia ficus indica</i>	30
Tabla 5. Balances de materia y energía de la extracción del mucílago de <i>Opuntia ficus indica</i>	31
Tabla 6. Análisis químico proximal del mucílago de nopal (<i>Opuntia ficus indica</i>) en polvo.	32
Tabla 7. Viscosidad de soluciones de mucílago de nopal reconstituido en agua y jugo de manzana.	39
Tabla 8. Parámetros reológicos de suspensiones alimenticias según Ley de Potencia.	47
Tabla 9. Prueba Pantone® para mucílago de nopal reconstituido en matrices líquidas.	58
Tabla 10. Prueba Pantone® para suspensiones alimenticias de diferentes mezclas de harina con mucílago de nopal al 10% p/p.	59

RESUMEN

El presente trabajo tiene como objetivo evaluar si el mucílago del nopal de *Opuntia ficus indica* actúa como agente dispersante de harinas de origen vegetal en una matriz alimenticia líquida. Para cubrir este objetivo se desarrolló un método de extracción del mucílago de *Opuntia ficus indica* libre del uso de solventes orgánicos, a partir de la molienda de nopal fresco, filtración y secado por aspersion, con la finalidad de utilizarlo como agente dispersante en la formulación de suplementos alimenticios para pacientes sometidos a cirugía bariátrica. Se obtuvo mucílago con un proceso de alto rendimiento (1.6%) con respecto a los métodos que utilizan solventes. El consumo energético del proceso corresponde a 184.61 kW. Se reportan los balances de materia y energía para cada etapa de la extracción. Asimismo, se realizó la caracterización bromatológica y química del mucílago obtenido, con lo cual se corroboró la factibilidad de su uso en suspensiones alimenticias y se identificó la presencia de arabinosa y galactosa como componentes de los polisacáridos del mucílago de nopal. Con una caracterización reológica se encontró el comportamiento no newtoniano, de tipo pseudoplástico o reofluidizante, de las suspensiones alimenticias desarrolladas y con pruebas de sedimentación, se evaluó la capacidad dispersante del mucílago al 10% p/p en suspensiones de mezclas harinas de origen vegetal en un intervalo de concentración del 2 al 20% p/p en leche descremada. Con todo lo anterior, se encontraron las concentraciones más convenientes de mucílago y harinas a utilizar en las suspensiones alimenticias para su consumo en la fase post-quirúrgica de líquidos generales y se considera que las mezclas más convenientes a utilizar son: quinoa y lenteja, quinoa y haba y, avena y lenteja a una concentración de 10% p/p.

INTRODUCCIÓN

El mucílago de *Opuntia ficus indica* es un heteropolisacárido de alto peso molecular que puede ser utilizado como agente estabilizante de emulsiones y suspensiones alimenticias debido a su composición química y carga eléctrica. Se ha demostrado que este hidrocoloide reduce la tensión superficial del sistema y modifica sus propiedades viscosas (Sáenz *et al.*, 2004). Estas propiedades hacen atractivo el uso del mucílago como hidrocoloide para la formulación de algunos productos alimenticios.

Actualmente, su obtención se lleva a cabo por precipitación con solventes orgánicos como acetona y diversos alcoholes, lo cual implica bajos rendimientos y aumenta el costo del proceso (Sepúlveda *et al.*, 2007). En el presente trabajo, se desarrolló un método de extracción del mucílago de *Opuntia ficus indica* a partir de la molienda de nopal fresco, filtración y secado por aspersion, libre de solventes orgánicos, para poder utilizarlo como agente dispersante en suspensiones alimenticias.

Por otra parte, se consideraron como posible aplicación a las suspensiones alimenticias de las que requerían en la Clínica de Obesidad del Hospital General Dr. Manuel Gea González, pues sus pacientes obesos después de haber sido sometidos a cirugía bariátrica necesitan del consumo de formulaciones alimenticias hipoenergéticas que les proporcionen apoyo nutrimental, en el que la proteína es esencial para favorecer la cicatrización rápida de las heridas, y ayuda a evitar la pérdida de masa magra. Para ello, se propuso el consumo de formulaciones altas en proteína de origen vegetal, como lo son las harinas de cereales y leguminosas. Sin embargo, al adicionarlas en matrices líquidas, resultaban suspensiones inestables que sedimentaban, ocasionando una consistencia heterogénea y rechazo por parte de los pacientes.

En vista de lo anterior, se propuso utilizar el mucílago de *Opuntia ficus indica* como agente dispersante de mezclas de harinas de

leguminosas y cereales en leche descremada, y con ello, favorecer la condición nutrimental de los pacientes bariátricos en la etapa de líquidos generales.

Capítulo 1. Marco teórico

1. Antecedentes

1.1. Generalidades del nopal

El nopal *Opuntia ficus indica* es una cactácea arbustiva, rastrera o erecta, que puede alcanzar de 3 a 5 m de altura según la zona en la que se cultiva (Matsuhira *et al.*, 2006). El sistema radical es muy extenso, densamente ramificado, rico en raíces finas absorbentes y superficiales en zonas áridas de escasa pluviometría. Sus ramas están formadas por cladodios de 30 a 60 cm de largo por 20 a 40 cm de ancho y de 2 a 3 cm de espesor. La longitud de las raíces está en relación con las condiciones hídricas y con el manejo cultural, especialmente el riego y la fertilización (Villegas y De Gante, 1997; Granados y Castañeda, 2000; De la Rosa y Santana, 2001). El cladodio fresco recibe el nombre de nopalito y el adulto de penca. Su tronco es leñoso y mide entre 20 y 50 cm de diámetro. Los cladodios de esta especie se distinguen de las demás especies por ser elípticos, cuentan con capacidad para retener agua y con tamaños hasta de 60 cm (Reyes-Agüero *et al.*, 2009).

La clasificación taxonómica del nopal es la siguiente:

Reino	Vegetal
Subreino	Embryophita
División	Angiospermae
Clase	Dicotyledonea
Subclase	Dialipetalas
Orden	Opuntiales
Familia	Cactaceae
Subfamilia	Opuntioideae
Tribu	Opuntiae
Género	Opuntia; Nopalea

Fuente: Barrientos (1983)

En la *Figura 1* se ilustra una planta común de nopal. En el exterior de los cladodios se encuentra la clorénquima, tejido que les permite llevar a cabo la fotosíntesis; mientras que, en su interior, el parénquima permite a estas plantas soportar periodos largos de sequía (Saag *et al.*, 1975), pues en él se encuentran presentes los mucílagos que tienen la capacidad de retener el agua (Nobel *et al.*, 1992).



Figura 1. Planta de nopal.

El género *Opuntia* es originario del continente americano, fundamentalmente de México (Flores-Valdez *et al.*, 1995). Aunque a México se le considera como centro de origen y en el cual hay mayor número de especies, también se observa su crecimiento silvestre en las zonas áridas y semiáridas de otros continentes. En México se conocen 104 especies del género *Opuntia* y 10 del género *Nopalea* (Barrientos, 1983). Hay 3×10^6 ha de nopal silvestre mientras que 233,000 ha de nopal cultivado para obtención de tuna, forraje o consumo humano (SAGARPA, 2007; García-Favela, 2013). En la producción de nopal participan 18 estados, como se observa en la *Figura 2*. La Ciudad de México aporta el

72% de la superficie y casi el 80% de la producción, en donde Milpa Alta, es la mayor y más antigua zona productora, seguida de los estados de Morelos, Tamaulipas, Zacatecas, San Luis Potosí, Aguascalientes, Oaxaca, Michoacán y Jalisco (SIAP/SAGARPA, 2015).

México es el principal exportador mundial, pues exporta alrededor de 1,500 toneladas en fresco y unas 3,500 toneladas procesadas a E.U.A. y cantidades menores a otros países.



Figura 2. Origen y destino de la producción y comercialización de nopal en México en 2015.

Fuente: (SIAP/SAGARPA, 2015).

Las aplicaciones nutritivas, industriales y medicinales hacen de este cultivo un producto de relevancia económica para el país además de representar un valor cultural e histórico muy significativo desde la época prehispánica (Cárdenas *et al.*, 1997).

1.1.1. Composición química general

Los cladodios cuentan con una alta proporción de agua (alrededor del 90%) y son altamente cotizados por su contenido de fibra, comparable al de varias frutas y hortalizas (Zambrano et al., 1998; Ruales y Zumba, 1998). Son ricos también en minerales, entre ellos el calcio y el potasio (93 y 166 mg/100 g, respectivamente), y tienen bajo contenido de sodio (2 mg/100 g), lo que es una ventaja para la salud humana (Abraján-Villaseñor, 2008).

A pesar de que los valores reportados de los nutrimentos contenidos en el nopal no deben ser tomados como valores absolutos, pues dicho contenido varía con respecto a la edad, así como entre especies y variedades, en la *Tabla 1* se muestra la composición química general de los cladodios de *Opuntia* (Stintzing y Carle, 2005).

Tabla 1. Composición general de los cladodios de nopal *Opuntia*.

Componente	Contenido (%) Base seca	Contenido (%) Base húmeda
Agua	-	88 a 95
Hidratos de carbono	64 a 71	3 a 7
Cenizas	19 a 23	1 a 2
Fibra	18	1 a 2
Proteína	4 a 10	0.5 a 1
Lípidos	1 a 4	0.2

Fuente: Stintzing y Carle, (2005)

1.1.2. Usos del nopal

La gastronomía mexicana tiene al nopal como uno de sus principales elementos. Una vez que se le retiran las espinas, son innumerables las preparaciones culinarias en las que se puede emplear.

Los antepasados de la población mexicana le asignaban al nopal numerosos usos medicinales, y hoy en día, diversos estudios científicos han demostrado lo que antes era tan sólo un conocimiento empírico, pues se ha probado que el nopal ayuda a equilibrar el sistema digestivo y a

mejorar el metabolismo, además de reducir la cantidad de azúcar en la sangre, por lo que ha sido utilizado como auxiliar en los tratamientos para la diabetes (Fрати *et al.*, 1990 y Frати-Munari *et al.*, 1992). El nopal también ayuda a disminuir los niveles de colesterol y triglicéridos, y su alto contenido de minerales y fibra, lo convierten en un alimento de gran ayuda para mantener el peso corporal.

El nopal también es usado como materia prima para la elaboración de conservas, así como productos medicinales y cosméticos. Los cladodios tienen interés desde el punto de vista industrial, ya que cuando los brotes son tiernos (10 a 15 cm) se usan para la producción de nopal verdura y cuando están parcialmente lignificados (cladodios de 2 a 3 años), para la producción de harinas y otros productos.

Otro uso que se le da a la planta de nopal es como hospedera para la crianza de un insecto conocido como grana cochinilla (*Dactylopius coccus* Costa), del cual se extrae el carmín, colorante natural de gran importancia en la industria cosmética, farmacéutica y alimenticia. Por otra parte, su fruto, la tuna es recolectada para consumo en fresco o para ser procesada para la elaboración de jugos, dulces, mermeladas y licores.

1.2. El mucílago de nopal

El compuesto espeso que cualquier cactácea excreta por daño físico se denomina mucílago (Alger, 1997). Este tipo de compuestos se observan en varias cactáceas, frutos y semillas como la chía, linaza y okra (Singer *et al.*, 2011; Muñoz *et al.*, 2012; Cervantes-Martínez *et al.*, 2014).

Debido a sus propiedades de viscosidad, el mucílago se considera importante para la industria de alimentos (Sepúlveda *et al.*, 2007). Tiene la capacidad de formar redes moleculares, que incrementan la capacidad de retención de agua en el sistema (Ting, 1997); además de modificar las propiedades de viscosidad, elasticidad, textura; es un buen gelificante,

espesante, y emulsificante (Schirra *et al.*, 1998), propiedades de utilidad en la formulación de algunos productos cosméticos y alimenticios (Sáenz *et al.* 2004).

Adicional a lo anterior, se ha reportado su aplicación en pinturas, como agente estabilizante de emulsiones (Garti, 1999) y en la formación de recubrimientos y películas biodegradables (Espino-Díaz *et al.*, 2010; Medina-Torres *et al.*, 2013; Rivera-Corona *et al.*, 2014). Es importante mencionar que la aplicación del mucílago está en función del método de extracción (con o sin solventes) y de su vida de anaquel, ya que su alta actividad de agua y composición de azúcares, favorece el crecimiento de microorganismos disminuyendo su tiempo de utilidad (Sáenz *et al.*, 2004).

1.2.1. Composición química del mucílago de nopal

El mucílago del nopal es un hidrocoloide conformado fundamentalmente por un heteropolisacárido altamente ramificado (McGarvie y Parolis, 1981), cuyo peso molecular oscila alrededor de 13×10^6 g/mol. Contiene D-galactosa, L-arabinosa, D-xilosa, y L-ramnosa como principales unidades de azúcares neutros, así como ácido D-galacturónico. Las proporciones reportadas de los azúcares mencionados varían de acuerdo con el autor, en función de la especie y metodología utilizadas, además de la parte de la planta de la que se obtiene, entre otras variables. En la *Tabla 2*, se muestra el contenido de los azúcares presentes en el mucílago, los datos son concordantes con lo reportado por Madjdoub *et al.* (2001) y Sepúlveda *et al.* (2007) que expresan un contenido aproximado de 35 a 40 % de arabinosa, 20 a 25% de galactosa y xilosa, cada una, y de 7 a 8% de ramnosa y ácido galacturónico, cada uno.

Tabla 2. Caracterización cromatográfica de los azúcares de seis especies de *Opuntia*.

Autores	Gal	Ara	Xil	Ram	Ác. U.
McGarvie y Paroils (1981) ^a	18.4	42.4	2.5	6.4	8.4
Trachtenberg y Mayer (1981) ^a	40.1	24.6	22.2	13.1	ND
Nobel <i>et al.</i> (1992) ^a	21	42	22	7	8
Medina-Torres <i>et al.</i> (2000) ^a	17.92	46.68	23.45	6.76	5.19
Matushiro <i>et al.</i> (2006)	+	+	+	+	+
Cárdenas <i>et al.</i> (2008) ^a	7	6	1	0.6	85.4
Ginestra <i>et al.</i> (2009)	+	+	+	+	+
Ribeiro <i>et al.</i> (2010)	+	+	+	ND	+

Adaptado de (Rodríguez-González, 2014).

Gal: Galactosa, Ara: Arabinosa, Xil: Xilosa, Ram: Ramnosa, Ác. U.: Ácidos urónicos.

^a: Expresado en porcentaje. +: Presencia del azúcar, ND: Dato no disponible.

Según Trachtenberg y Mayer, 1982, el mucílago está presente como su sal de calcio en las células de mucílago del parénquima de la penca. Por su parte, según las investigaciones de Sáenz *et al.*, 2004, proponen que dicho hidocoloide presenta una cadena principal lineal con repeticiones de α (1-4) ácido D-galacturónico y β (1-2) L-ramnosa ligado con cadenas laterales de oligosacáridos β (1-6) D-galactosa unidos a residuos de O-(4) de L-ramnosa. La composición de las cadenas periféricas es compleja, pues se han identificado al menos 20 diferentes tipos de oligosacáridos (la mayoría son disacáridos y trisacáridos) que contienen uniones (1-5) de residuos de L-arabinosa y D-xilosa como grupos terminales, dando una proporción de xilosa:arabinosa cercana a 1:2. Lamentablemente, en la actualidad no se han realizado más investigaciones al respecto de la posible estructura de los hidratos de carbono que componen al mucílago de nopal.

En la *Figura 3* se observa la estructura propuesta por Sáenz *et al.*, 2004, para los polisacáridos que conforman al mucílago de *Opuntia ficus indica*.

por extracción con calentamiento o a temperatura ambiente (Guevara-Ayala, 2014).

Tabla 3. Métodos de extracción del mucílago de nopal.

Tipo de Extracción	Descripción de la metodología	Rendimiento (%)	Autores
Extracción con solventes	Pretratamiento de las pencas hirviéndolas en etanol al 80%. Se cortaron en cubos y se dejaron reposar en la solución de etanol hasta que se extrajo el mucílago, se filtró para ser resuspendido en agua, se realizó una segunda filtración para posteriormente centrifugar lo obtenido y secarlo por congelación.	0.07	Cárdenas, <i>et al.</i> 1997
Extracción con solventes	Se maceraron las pencas y se homogeneizaron con agua en relación 1:1, hirviéndolas durante 20 min a 85°C. La mezcla se filtró y se centrifugó; se recuperó el sobrenadante para ser precipitado con una solución de etanol al 65% durante 20 horas a 4°C. La precipitación se lavó dos veces con etanol 95% y se secó por congelación.	0.68	Espino, <i>et al.</i> 2010
Extracción por Ultrafiltración	Se maceraron las pencas en agua desionizada bajo agitación mecánica durante 24 h a temperatura ambiente para posteriormente ser filtrada. El filtrado resultante se centrifugó y se filtró. El filtrado se separó mediante ultrafiltración frente a agua desionizada por aprox. 1 día hasta que la conductividad igualaba a la del agua desionizada. La muestra ultrafiltrada se secó por congelación.	0.085 a 0.46	Majdoub <i>et al.</i> 2010
Extracción acuosa	Las pencas se cortaron en trozos pequeños donde se les añadió agua destilada en proporción 1:3 y se mantuvo a 86°C durante 3.6 h bajo agitación. El mucílago fue separado de la masa sólida por decantación, se filtró y almacenó a 4°C para posteriormente ser secado por congelación.	ND	León-Martínez, <i>et al.</i> 2011
Extracción acuosa	Se maceraron las pencas utilizando 500 mL de agua desionizada por cada kg de material para facilitar la extracción, se dejó reposando 24 h y el material sólido fue separado por decantación para posteriormente ser filtrado, centrifugado y almacenado a 4°C.	0.009 a 0.018	Medina-Torres, <i>et al.</i> 2000

ND: Dato no disponible. Adaptado de Guevara-Ayala (2014).

1.2.3. Usos del mucílago de nopal

Existen numerosos usos del mucílago en campos diversos, por ejemplo, como aditivo en la industria de alimentos, por sus propiedades espesantes, su gran capacidad de adsorción de agua, de formar geles. Como reemplazante de grasas en diversos alimentos, ligante de sabor (Cárdenas *et al.*, 1997), agente emulsificante, mejorador de textura, controla la cristalización, estabiliza suspensiones, inhibe la sinéresis y crea películas comestibles (Rodríguez-González, 2014).

En México, se ha utilizado mezclado con barro, como pegamento en zonas rurales para construir viviendas y como adhesivo, como lo demuestran algunas obras maestras del muralismo nacional (Blanco, 1966) o en la restauración/conservación de edificios históricos. Otras aplicaciones son su uso como agente floculante, como abono orgánico o como agente dispersante (Matsuhira *et al.*, 2006).

Por otra parte, Gardi, 1999, ha estudiado la capacidad como agente emulsionante de la goma o mucílago de *Opuntia ficus indica*. El autor encontró que esta goma: (1) reduce la tensión superficial e interfacial; (2) estabiliza emulsiones del tipo aceite-agua; (3) forma gotas pequeñas de aceite; (4) los sistemas a los que se agrega no floculan.

Espinosa 2002, estudió la adición de dispersiones de mucílago de nopal en distintas concentraciones (0.5 y 0.8 %) a espumas elaboradas con clara de huevo, demostrando que la adición de mucílago de nopal se manifestaba en una menor sinéresis y un mayor volumen después de 48 h. Esta clase de ingredientes utilizados con frecuencia por su capacidad para mejorar la textura, también se emplean para estabilizar emulsiones, para controlar la cristalización, como estabilizadores de suspensiones, para inhibir la sinéresis y para crear películas comestibles. Algunos de ellos tienen la capacidad de formar geles.

Por otra parte, fuera del campo de la alimentación, existen otros usos del mucílago de nopal, por ejemplo, López, 2000, estudió la capacidad del mucílago como clarificante de agua obteniendo resultados exitosos al compararlo con otros agentes tradicionales como el sulfato de aluminio $[Al_2(SO_4)_3]$. Aunado a ello, Hammouch *et al.*, 2004, informan que la utilización de un extracto acuoso obtenido de los cladodios demostró ser exitoso para evitar la corrosión del hierro.

1.2.4. Reología de soluciones acuosas de mucílagos de nopal

El mucílago de nopal es un hidrocoloide soluble en agua, que forma soluciones viscoelásticas (Medina-Torres *et al.*, 2000). El comportamiento de las soluciones acuosas con mucílago de *Opuntia ficus indica* reconstituido, de acuerdo con las mediciones de viscosidad en corte que se han realizado, es el de un fluido no newtoniano de tipo adelgazante, pseudoplástico o reofluidizante, como se observa en la *Figura 4*. Su viscosidad se puede correlacionar con la velocidad de deformación mediante el Modelo de Ley de Potencia.

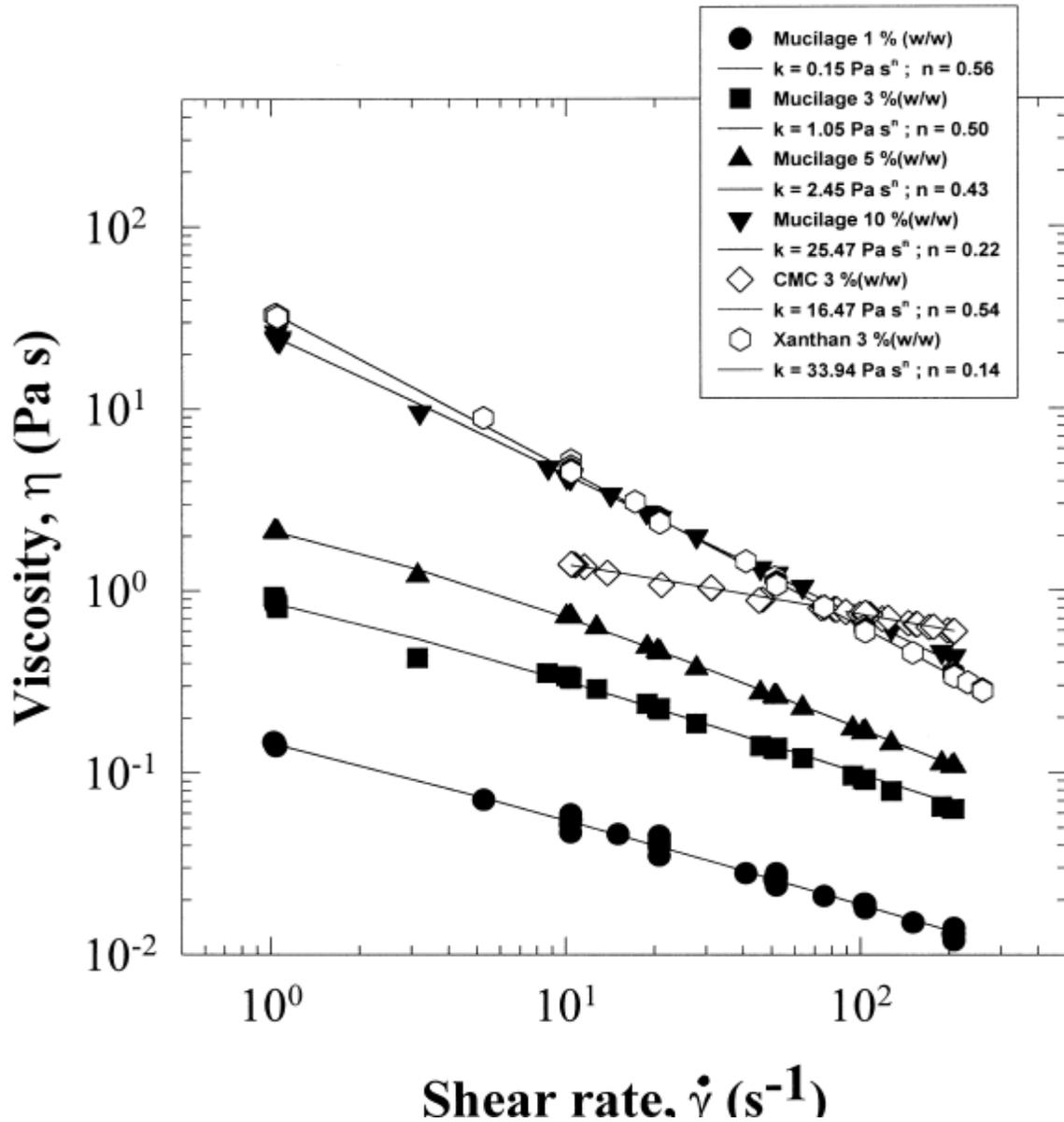


Figura 4. Curva de viscosidad en corte del mucílago de nopal reconstituido en agua. Efecto de la concentración del mucílago en la viscosidad de flujo constante a 25°C.

Tomado de Medina-Torres *et al.*, (2000).

Los estudios realizados de la reología de las soluciones acuosas de mucílago de nopal, además, abarcan la evaluación del espectro mecánico o propiedades de flujo dinámico que fueron estudiadas en la región viscoelástica lineal como función de la temperatura y concentración de

mucílago. Ambas propiedades, G' (módulo elástico) y G'' (módulo viscoso), resultaron dependientes de la concentración de mucílago y la frecuencia angular aplicada, como se observa en la *Figura 5*. El punto de cruce entre ambos módulos sugirió un rearrreglo de la configuración inicial.

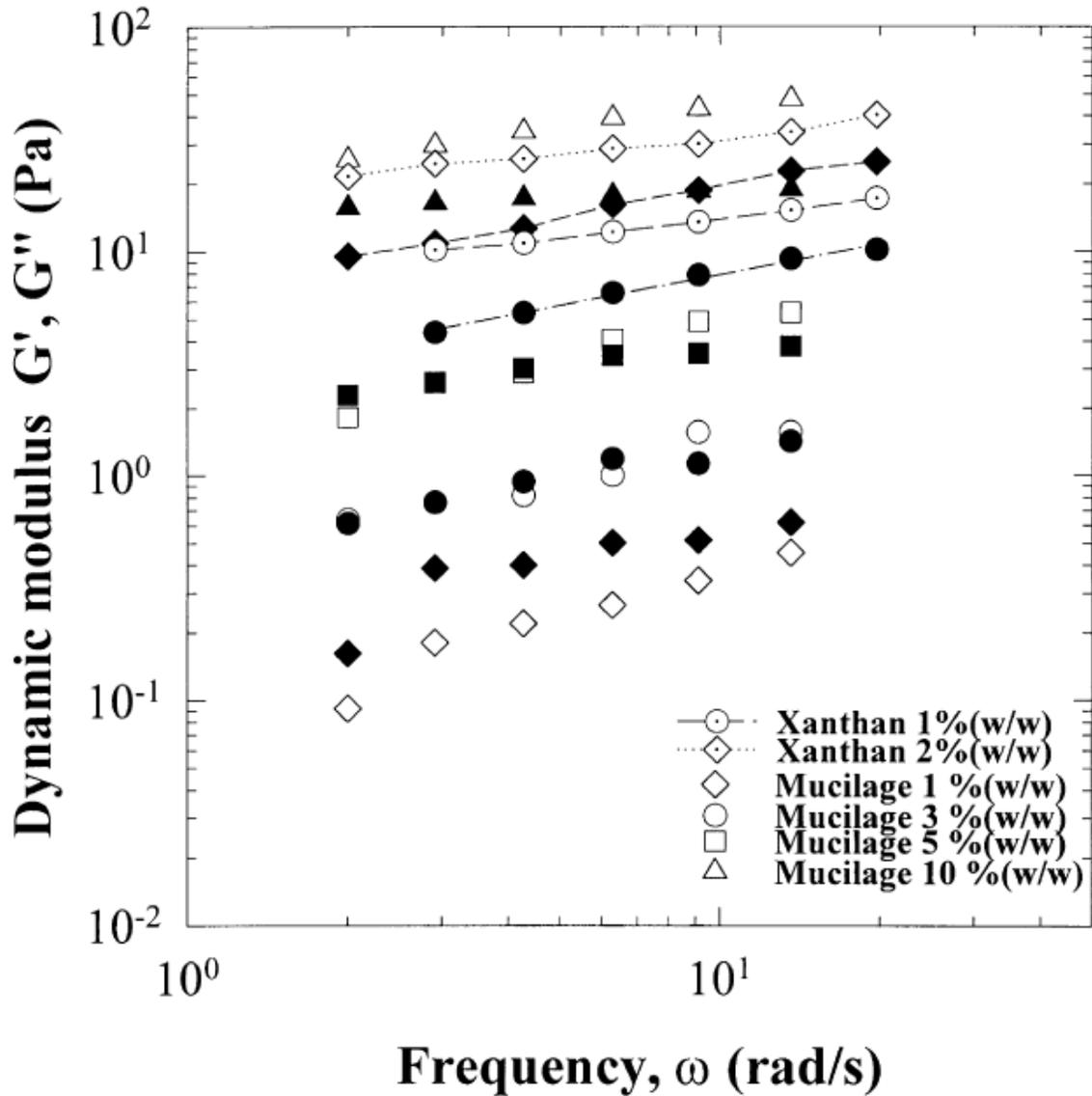


Figura 5. Comportamiento de los módulos dinámicos de almacenamiento G' y pérdida G'' en función de la frecuencia angular para diferentes concentraciones de mezclas de mucílago de nopal y goma xantana. Símbolos rellenos, G' y símbolos vacíos, G'' .

Tomado de Medina-Torres *et al.*, (2000).

1.3. Agentes dispersantes para alimentos

Los aditivos alimentarios, son por definición cualquier sustancia que por sí misma no se consume normalmente como alimento, ni tampoco se usa como ingrediente básico en alimentos, tenga o no valor nutritivo, y cuya adición al alimento en sus fases de producción, fabricación, elaboración, preparación, tratamiento, envasado, empaquetado, transporte o almacenamiento, resulte directa o indirectamente por sí o sus subproductos, un componente del alimento o bien afecte a sus características (FAO/OMS, 1995).

Los aditivos alimentarios se encuentran clasificados de acuerdo con la funcionalidad que desempeñan en los alimentos a los que son adicionados. Entre las divisiones de dicha clasificación se encuentran, por ejemplo, los acentuadores de sabor, agentes gelificantes, antiaglutinantes, antioxidantes, colorantes, edulcorantes, emulsionantes, espesantes, humectantes, leudantes, reguladores de acidez, sustancias conservadoras y sustancias inertes, entre otros.

Dentro de la clasificación de los emulsionantes, que son aditivos alimentarios que forman o mantienen una emulsión uniforme de dos o más fases en un alimento, se encuentra otra subclasificación tecnológica, cuyas divisiones son: agentes dispersantes, agentes enturbiadores, agentes tensoactivos, etc. (FAO/OMS, 1995). Los agentes dispersantes son los de interés para el presente trabajo.

1.3.1. Funcionalidad de agentes dispersantes

Un material sólido disperso en un líquido requiere un aditivo para hacer el proceso de dispersión más fácil y más estable, este es el papel de un agente dispersante.

Los dispersantes defloculan sólidos y como resultado de este efecto, la carga sólida, que es la cantidad de material dispersable en polvo, puede

ser aumentada relativamente. La fase de dispersión es posiblemente la fase que más consume tiempo y energía en el proceso de producción de una suspensión. Esto se debe a las diferentes tensiones superficiales de los líquidos (utilizados generalmente como fase continua en la dispersión) y los sólidos (por ejemplo, rellenos, aditivos, etc.).

Un aditivo dispersante es necesario para producir formulaciones estables y asegurar la estabilidad al almacenamiento, manteniendo la homogeneidad y evitando la separación.

Algunos ejemplos de agentes dispersantes ampliamente utilizados en la industria de los alimentos son hidrocoloides, por ejemplo, gomas como la árabiga, xantana, tragacanto, algarrobo, guar, algunos derivados de alginatos, carrageninas, pectinas y de la celulosa, así como almidones modificados. La selección de uso se lleva a cabo de acuerdo con la compatibilidad del aditivo con la matriz alimenticia en la que se utilizará, así como con las características del producto terminado que se desea obtener, pues el uso de ciertos hidrocoloides no es sólo como agentes dispersantes sino también modifican la viscosidad, actúan como estabilizantes, encapsulantes, gelificantes, texturizantes, etc.

En el presente trabajo, se desea evaluar la capacidad como agente dispersante del mucílago de nopal en leche.

Capítulo 2. Hipótesis y objetivos

Hipótesis

El mucílago de nopal (*Opuntia ficus indica*) es un hidrocoloide que modifica las características reológicas de los líquidos, por lo que reconstituido, actúa como agente dispersante de harinas de origen vegetal en suspensiones alimenticias.

Objetivo general

Extraer el mucílago de nopal (*Opuntia ficus indica*) y evaluar su capacidad como agente dispersante en suspensiones alimenticias.

Objetivos particulares

- Definir un método de obtención de mucílago de nopal (*Opuntia ficus indica*) libre de solventes.
- Caracterizar las propiedades fisicoquímicas del mucílago de nopal (*Opuntia ficus indica*) obtenido después del proceso de secado por aspersión.
- Caracterizar las propiedades reológicas del mucílago de nopal (*Opuntia ficus indica*) reconstituido en matrices líquidas (agua y jugo de manzana).
- Evaluar la aplicación del mucílago de nopal (*Opuntia ficus indica*) reconstituido como agente dispersante de harinas de origen vegetal en suspensiones alimenticias diseñadas para el consumo de pacientes bariátricos.
- Comparar las mezclas de harinas utilizadas y definir los ingredientes más convenientes a utilizar en la formulación de suspensiones alimenticias.

Capítulo 3. Metodología

3.1. Método de extracción y secado del mucílago de nopal

Sustrato. Para obtener el mucílago se utilizó nopal *Opuntia ficus indica* fresco de Milpa Alta, Ciudad de México.

Obtención de mucílago en polvo. Se llevó a cabo de acuerdo al diagrama de la *Figura 6*.

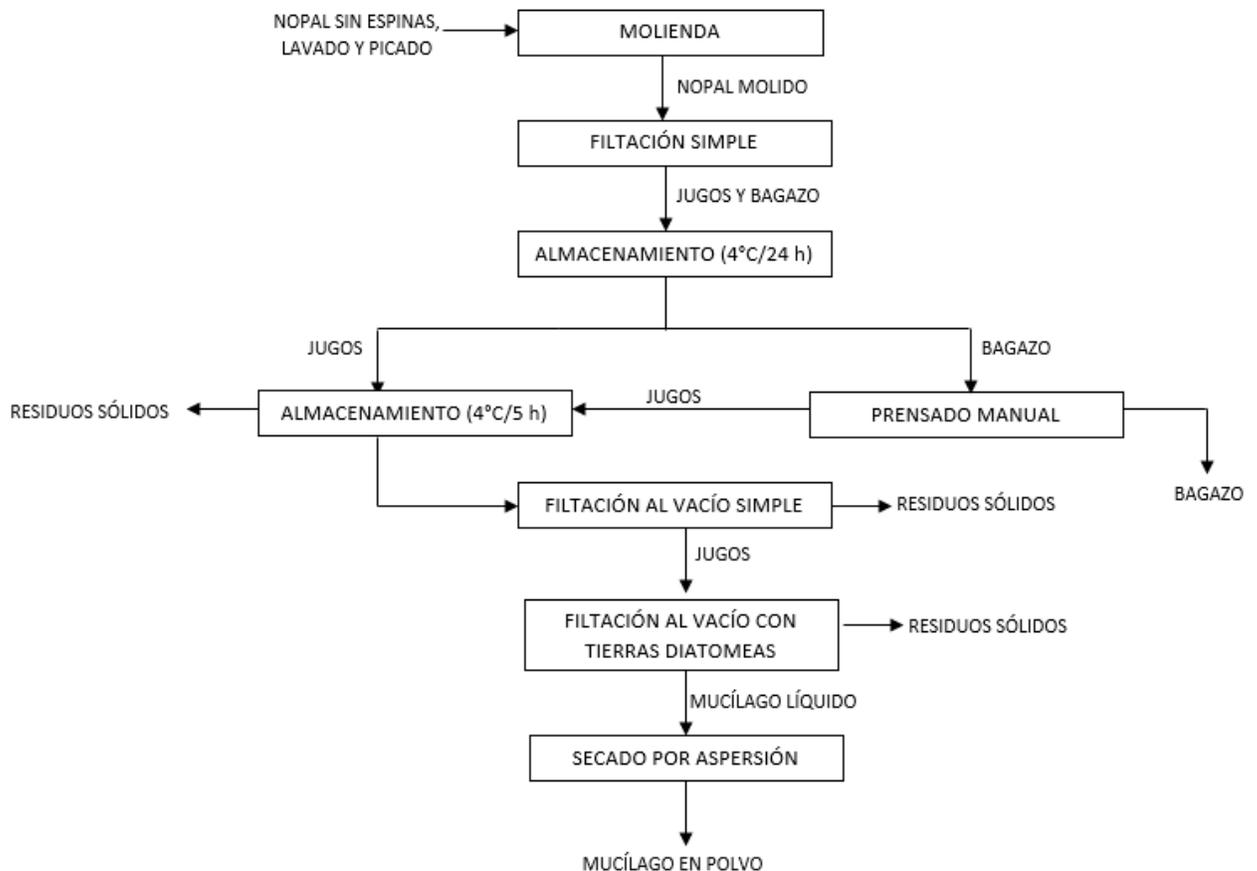


Figura 6. Diagrama de flujo de la obtención del mucílago de *Opuntia ficus indica* en polvo.

Se realizó una molienda en seco utilizando una licuadora Hoffmann-Pinther & Bosworth, S.A. La mezcla se dejó en un filtro (poros de 2 x 2

mm) durante 24 h a 4 °C. Se exprimió el bagazo y el jugo se dejó reposar por 5 horas a 4 °C, para posteriormente filtrar al vacío de forma consecutiva a través de papel filtro de poro abierto y tierras diatomeas. El mucílago obtenido se deshidrató con el objetivo de obtenerlo en polvo, utilizando un equipo de secado por aspersion Niro Atomizer® (135 °C, flujo de entrada y 90 °C, flujo de salida).

Los rendimientos de cada etapa de la extracción, fueron calculados de acuerdo con lo siguiente:

$$\% R_o = \left(\frac{m_p}{m_n} \right) 100$$

Donde: % R_o: rendimiento porcentual de la operación, m_p: suma de las masas de los productos obtenidos en cada operación (kg) y m_n: masa de nopal que ingresó al proceso de extracción (kg).

Se registraron los tiempos de operación y el consumo energético reportado para cada equipo utilizado para obtener el flujo (kg/min) y la energía consumida por operación (kW) respectivamente. El cálculo de energía consumida por operación, se realizó mediante la ecuación siguiente:

$$E_o = \left(m * \frac{1}{F_o} * C_e \right) 1000$$

Donde: E_o: energía consumida por operación (kW), m: masa involucrada en cada operación (kg), F_o: flujo másico de la operación (kg/min) y C_e: consumo energético del equipo utilizado para cada operación (W/min), el factor 1000 es debido a la conversión de W a kW.

3.2. Caracterización fisicoquímica del mucílago de nopal

3.2.1. Análisis químico proximal del mucílago de nopal

El análisis químico proximal (AQP) se realizó de acuerdo al Método AOAC 1990, que consiste en determinar: humedad (934.01) mediante secado en estufa; cenizas (942.05) utilizando una mufla; extracto etéreo (920.39) mediante el método de Soxhlet; fibra cruda (962.09) por digestión ácida y alcalina, y proteína cruda (954.01) por el método Kjeldahl (Factor: 6.25).

3.2.2. Composición de azúcares del mucílago de nopal

La composición de azúcares del mucílago en polvo, se determinó mediante hidrólisis ácida seguida de cromatografía en capa fina.

Para la hidrólisis, se sometieron a calentamiento (80 a 90 °C) 5 g de mucílago en polvo en 50 mL de agua destilada adicionada con 3 mL de HCl al 20% durante 4 h en condiciones de reflujo y con agitación constante, se adicionó $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 1M para detener la hidrólisis alcanzando un pH de 6 a 7, obteniendo así la muestra para la cromatografía en capa fina.

3.2.2.1. Cromatografía en capa fina del mucílago de nopal

Se realizó utilizando como fase móvil una mezcla de n-butanol:etanol:agua tridestilada en proporción 5:3:2; la fase estacionaria fue una capa de sílica gel dispersa en una placa de vidrio (Macherey-Nagel GmbH & Co. KG DC-Fertgplatten SIL G-25); el agente revelador fue una solución de H_2SO_4 al 10% en metanol. Se prepararon soluciones estándar con una concentración de 1% (utilizando como disolvente agua tridestilada) de cada uno de los siguientes azúcares: arabinosa, galactosa, ramnosa y xilosa, y de ácido galacturónico. La

muestra se eluyó durante 4 h, se reveló rociando la solución reveladora, dejando secar por 15 minutos y calentando la placa de vidrio a 100 °C. Finalmente, para evaluar la presencia de los estándares en las muestras, se calculó el factor de retención (R_f) mediante la siguiente ecuación:

$$R_f = \frac{\text{Distancia recorrida por la muestra (cm)}}{\text{Distancia recorrida por el disolvente (cm)}}$$

3.2.3. Caracterización reológica de soluciones de mucílago de nopal reconstituido

Se reconstituyó el mucílago de nopal en polvo a diferentes concentraciones (5, 10 y 20% p/p) en dos matrices líquidas: agua y jugo de manzana *Ami*[®]. Se realizaron las curvas de corte en un reómetro de esfuerzo controlado MCR101 (Anton Paar Physica, Austria) a 25 °C, con una configuración de cilindros concéntricos (CC27/T200) por triplicado. Se analizaron los datos con el software Rheoplus 3.5[®]. El análisis estadístico se llevó a cabo mediante un análisis de la varianza (ANOVA) con intervalo de confianza de 5% ($\alpha=0.05$) con el software Excel 2013. Este análisis permitió determinar las diferencias entre las propiedades reológicas de corte del mucílago reconstituido en agua y jugo de manzana con respecto a la viscosidad de corte del mucílago fresco utilizado como referencia.

Las mediciones de viscosidad de corte se evaluaron en función de la velocidad de deformación en el intervalo de 10 a 100 s⁻¹. Los datos experimentales se ajustaron al modelo de ley de potencia, el cual se describe con la siguiente ecuación:

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

Donde η es la viscosidad de corte (Pa·s), $\dot{\gamma}$ es la velocidad de deformación (s^{-1}), K es el índice de consistencia (Pa·s^{*n*}) y n es el índice de comportamiento del fluido (adimensional).

3.3. Aplicación del mucílago de nopal como agente dispersante en suspensiones alimenticias

En México no existen productos comerciales diseñados especialmente para pacientes bariátricos, además de que los alimentos con alto contenido de proteínas (carne, pescados, huevo, etc.) no son tolerados en las primeras semanas después de la cirugía. Por ello, es necesaria la administración de un suplemento comercial de proteínas en polvo, el cual tiene un costo muy elevado para algunos pacientes. Dado lo anterior y considerando las condiciones económicas precarias de la gran mayoría de los pacientes de hospitales públicos, se ha recomendado el consumo de harinas de algunas leguminosas y cereales.

3.3.1. Desarrollo de suspensiones alimenticias para pacientes post-cirugía bariátrica

La dieta de los pacientes bariátricos debe contener entre 500 y 800 kcal dependiendo de la etapa post-quirúrgica en la que éstos se encuentren. Entre las características generales de una dieta para pacientes bariátricos, está que los hidratos de carbono deben aportar del 40 al 50% de la energía total de la dieta, los lípidos por su parte deben aportar entre el 20 y 30%, y el porcentaje restante de la energía debe provenir de proteínas de alto valor biológico (Rubio Herrera, 2005).

En este trabajo se tomó como base una dieta de 600 kcal que es la energía requerida en la etapa post-quirúrgica de líquidos generales (fase II).

La calidad de las proteínas de las leguminosas al ser comparadas con aquellas que son de origen animal, es inferior debido a su baja digestibilidad, a su deficiencia en aminoácidos azufrados (metionina y cisteína) y a la presencia de factores antinutritivos (Aguilera, 2009). Es por ello que, para aumentar el valor biológico de las proteínas de origen vegetal, se llevaron a cabo combinaciones de las harinas de cereales y leguminosas a utilizar. Las mezclas se determinaron de acuerdo con la Calificación Química de los aminoácidos esenciales presentes en las harinas de cada alimento, así tomando en cuenta el déficit que tenía un alimento en cierto aminoácido, se adicionó otro alimento para cubrir dicho déficit y se complementaron entre sí.

Por tanto, considerando los requerimientos propuestos y que los pacientes deben consumir una dieta que les proporcione nutrimentos y energía que necesitan a lo largo del día, distribuida en ingestas que no superen los 150 mL en intervalos de 2 h aprox., se obtuvieron cinco mezclas de harinas: 1) quinoa y frijol, 2) quinoa y haba, 3) quinoa y lenteja, 4) avena y lenteja y, 5) amaranto y lenteja. Para obtener las harinas, las leguminosas utilizadas pasaron por un proceso de remojo (9 h), fueron cocidas (121°C/ 30 min), sometidas a molienda húmeda, secadas a 60°C y posteriormente se sometieron a molienda en seco y tamizado. Para los cereales se llevó a cabo un tostado de los granos (150 a 175°C/ 15 min), se enfriaron a temperatura ambiente, pasaron por una molienda en seco y finalmente tamizado. Por otra parte, como matriz líquida se consideró utilizar leche descremada, debido a su valor nutrimental.

3.3.2. Evaluación del mucílago de nopal como agente dispersante

Se realizaron pruebas de estabilidad de la dispersión, utilizando como harinas a las mezclas propuestas en el apartado 3.3.1. y mucílago de nopal reconstituido al 10% p/p en leche descremada.

3.3.2.1. Pruebas de estabilidad

La leche es una matriz alimenticia en la cual, debido a su opacidad, se dificulta la evaluación de la sedimentación de harinas. Por ello, fue necesaria la implementación de una técnica para evaluar la estabilidad de la dispersión ante estrés mecánico, midiendo con ello, el porcentaje de sedimentación de harinas para cada mezcla evaluada.

Pruebas de estabilidad de dispersión. Se llevó a cabo una centrifugación a 500 rpm, durante 1 min de las suspensiones al 10% p/p de mucílago y 2% p/p de cada una de las mezclas de harinas en un tubo falcón. Después, se decantó el sobrenadante y el sedimento obtenido fue lavado con 50 mL de agua destilada, mientras se filtró con vacío. Se dejó secar el sedimento en una estufa durante 24 h a 60 °C, para obtener la masa del sedimento seco y, con ello, el porcentaje de sedimentación de cada una de las mezclas. Para la prueba de estabilidad, se llevaron a cabo blancos experimentales, en donde se colocó sólo leche, y leche con mucílago al 10% p/p, con el objetivo de obtener el valor de porcentaje de sedimentación considerando sólo el sedimento proveniente de las harinas. Las pruebas se realizaron por triplicado, en el gráfico se reportaron los promedios obtenidos y las barras de desviación estándar.

3.3.2.2. Caracterización reológica

Para la caracterización reológica de las suspensiones alimenticias, las concentraciones evaluadas de cada mezcla fueron: 2, 5, 10, 15 y 20%

p/p, ya que con éstas concentraciones se calculó que se cubrían los requerimientos nutrimentales de los pacientes bariátricos en fase de líquidos generales. De esta forma se determinó la concentración de harinas a utilizar en las suspensiones propuestas. Cabe mencionar que en cada mezcla se mantuvo en proporción del 50% a cada una de las harinas.

Se obtuvieron las curvas de corte y dinámicas en un reómetro de esfuerzo controlado MCR101 (Anton Paar Physica, Austria) a 25 °C, con una configuración de cilindros concéntricos (CC27/T200) por triplicado. Los datos se analizaron con el software Rheoplus 3.5®. El análisis estadístico se llevó a cabo mediante un análisis de la varianza (ANOVA) con intervalo de confianza de 5% ($\alpha=0.05$) con el software Excel 2013. Este análisis permitió determinar las diferencias entre las propiedades reológicas de corte y dinámicas de las suspensiones de mucílago reconstituido con respecto a la referencia que fue un puré de durazno, pues se deseaban suspensiones con una consistencia menos espesa que la del puré.

A partir de los módulos dinámicos también fue posible obtener un módulo complejo (G^*) de acuerdo con la siguiente fórmula:

$$G^* = \sqrt{(G')^2 + (G'')^2}$$

Al graficar el módulo complejo en función del estrés de corte, se obtuvo una gráfica que para fines de interpretación del estado físico de las mezclas, indica si las estructuras formadas son fuertes o débiles dependiendo de la variación en la longitud de la curva a lo largo del eje de las abscisas y si son suaves o rígidas dependiendo de la variación en la longitud de la curva sobre el eje de las ordenadas. Los gráficos obtenidos fueron utilizados con fines comparativos entre sí mismos.

Para todos los casos se utilizó como producto de referencia a un puré de durazno, pues se deseaba corroborar que el módulo complejo de las mezclas no se igualara con el de dicho producto, pues al tratarse de suplementos que se ingerirán en la etapa de líquidos generales, después de la cirugía bariátrica, se desea tener suplementos con una consistencia más suave y débil que la de un puré.

3.3.2.3. Color

Se utilizó una escala Pantone® para evaluar el color de las suspensiones en donde el mucílago de nopal fue reconstituido al 10% p/p en agua, jugo de manzana y leche descremada, además de evaluar las suspensiones con mucílago a la misma concentración y las mezclas de harinas mencionadas en el apartado 3.3.2.2.

Capítulo 4. Resultados y discusión

4.1. Método de extracción y secado del mucílago de nopal

En la *Figura 7* se muestra esquemáticamente el diagrama de flujo del proceso de extracción y secado por aspersión del mucílago de nopal.

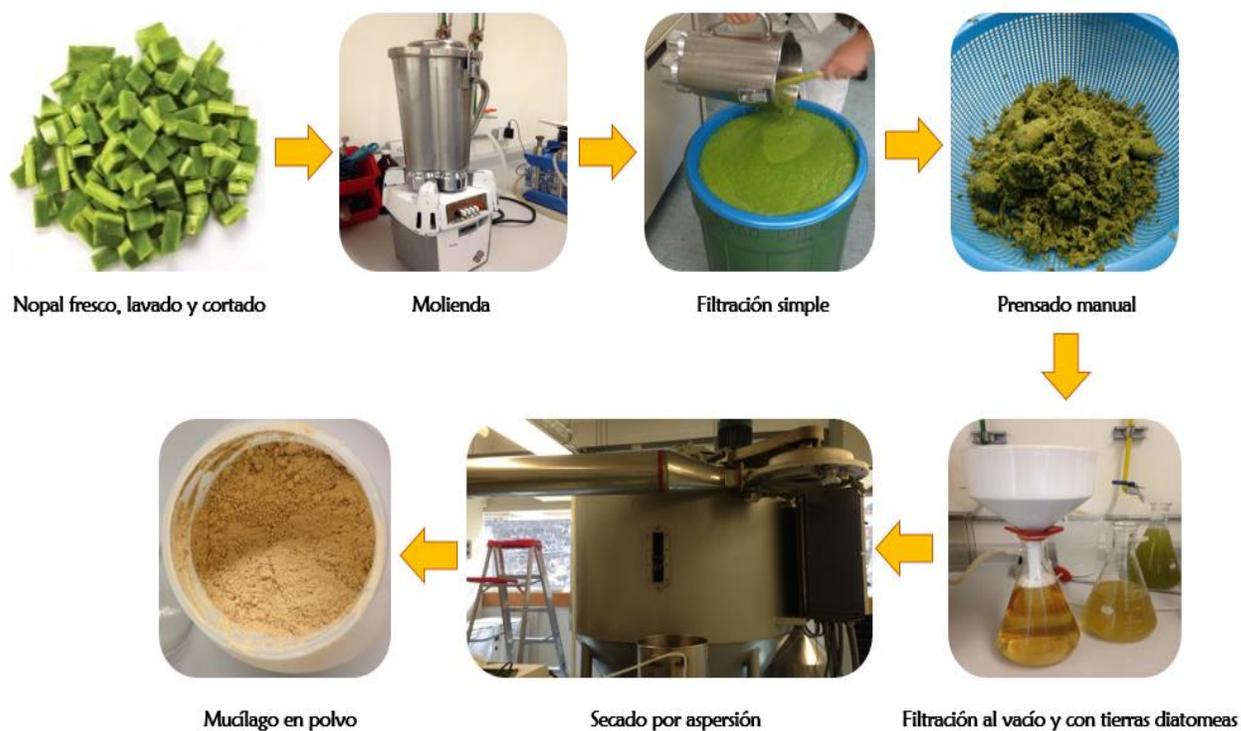


Figura 7. Diagrama de flujo de extracción y secado del mucílago de nopal *Opuntia ficus indica*.

Las metodologías de extracción del mucílago reportadas son muy diversas. El método es modificado en función de factores como la fuente de extracción del mucílago (cladodio o fruto), la parte específica de la que se extrae el hidrocoloide (piel, pulpa o semillas) y/o las características del producto de la extracción que se desean obtener (Abraján-Villaseñor, 2008).

Los rendimientos obtenidos en el presente trabajo para cada una de las operaciones unitarias llevadas a cabo durante el proceso de extracción y secado del mucílago de nopal *Opuntia ficus indica* se presentan en la *Tabla 4*.

Tabla 4. Rendimientos del proceso de extracción del mucílago de *Opuntia ficus indica*.

Operación		Promedio
Materia Prima	% Humedad Nopal Fresco	95.13 ± 0.07
Molienda en seco	Masa inicial (kg)	25.00 ± 0.10
	% Humedad Nopal Molido	94.43 ± 0.21
	Masa final (kg)	24.73 ± 0.09
	Rendimiento de la operación (%)	98.90 ± 0.34
Prensado mecánico	Masa Bagazo exprimido (kg)	2.75 ± 0.10
	% Humedad Bagazo exprimido	86.66 ± 4.29
	Volumen Jugos (L)	19.51 ± 0.36
	Densidad Jugos (kg/L)	0.96 ± 0.07
	Masa Jugos (kg)	18.73 ± 0.35
	Rendimiento de la operación (%)	85.90 ± 1.10
Filtración (Tierras diatomeas)	Volumen Mucílago (L)	15.87 ± 0.90
	Densidad de Mucílago (kg/L)	1.03 ± 0.07
	Masa de Mucílago (kg)	16.34 ± 0.92
	Volumen Residuos (L)	1.15 ± 0.63
	Densidad Residuos (kg/L)	1.01 ± 0.07
	Masa Residuos (kg)	1.16 ± 0.07
	Rendimiento de la operación (%)	70.01 ± 2.87
Secado por aspersión	Masa de Mucílago inicial (kg)	16.34 ± 0.92
	Masa de Mucílago seco (kg)	0.40 ± 0.09
	Rendimiento de la operación (%)	1.6 ± 0.36

Los resultados se expresan en base húmeda y se reportan los promedios de los dos lotes trabajados.

Diferentes autores han reportado métodos diversos para la extracción del mucílago de nopal, dichos métodos tienen influencia directa sobre el rendimiento de la extracción del mucílago (Nobel *et al.*, 1992; Cárdenas *et al.*, 1997). En el presente trabajo, el rendimiento de mucílago reportado con respecto a la masa de nopal fresco fue 1.6%, que es considerablemente mayor al obtenido utilizando solventes orgánicos

como parte del proceso de extracción, como lo reporta Cárdenas, *et al.*, 1997 al obtener 0.07% con respecto a los cladodios frescos, por su parte Sáenz y Sepúlveda, 1993 reportaron un rendimiento entre 1.0 y 1.2% y Sepúlveda *et al.*, 2007 obtuvo 1.48% de rendimiento.

En la *Tabla 5* se presentan los resultados del balance de materia y energía. La base para calcular ambos balances son los 25 kg de nopal fresco sometidos al proceso de extracción por molienda, filtración y secado del mucílago de *Opuntia ficus indica*.

Tabla 5. Balances de materia y energía de la extracción del mucílago de *Opuntia ficus indica*.

Operación	Flujo másico de operación (kg/min)	Consumo energético del equipo utilizado (W/h)	Masa (kg)	Rendimiento de operación (%)	Energía consumida por operación (kW)
Nopal fresco	NA	NA	25.00	NA	NA
Molienda en seco	1	560	24.73	98.90	0.23
Almacenamiento (24 h/4°C)	NA	1381	24.73	NA	819.72
Prensado manual	0.334	NA	21.48	85.90	NA
Almacenamiento (5 h/4°C)	NA	1381	21.48	NA	148.33
Filtración simple al vacío	0.20	750	17.98	83.70	1.12
Filtración (tierras diatomeas)	0.334	750	17.51	70.01	0.66
Secado por aspersión	0.074	8700	0.40	1.60	34.27
Total de energía consumida (kW)					1004.33

Balances reportados con respecto a la masa inicial del lote de nopal (25kg). NA: No aplica.

Como se observa en la *Tabla 5*, la operación unitaria en la que se consumió 78.49% de la energía total utilizada durante la extracción del mucílago de nopal fue el almacenamiento por 24 h. Este primer almacenamiento en refrigeración fue realizado puesto que los tiempos de trabajo así lo requirieron, pero no es necesario. Por lo tanto, sin esta etapa la energía total consumida sería 184.61 kW. Por el contrario, el segundo almacenamiento (5 h /4°C) sí es indispensable, para lograr la sedimentación de algunos residuos sólidos que se encuentran dispersos

en el mucílago. Además, permitió que el bagazo húmedo resultante del prensado manual se escurriera y de esta manera se aumentó el rendimiento de la extracción.

Otro parámetro del proceso de extracción a mejorar es realizar el prensado manual con un sistema mecánico para facilitar el proceso de extracción y, con ello, se aumentará el rendimiento de la extracción.

4.2. Caracterización fisicoquímica del mucílago de nopal

4.2.1. Análisis químico proximal

Los resultados del AQP del mucílago en polvo obtenido después del secado por aspersión, se presentan en la *Tabla 6*.

Tabla 6. Análisis químico proximal del mucílago de nopal (*Opuntia ficus indica*) en polvo.

Determinación	Contenido (%)
Materia seca	96.98 ± 0.14
Humedad	3.03 ± 0.14
Proteína cruda (Nitrógeno*6.25)	7.65 ± 0.20
Extracto etéreo	0.71 ± 0.06
Cenizas	25.93 ± 0.77
Fibra cruda	0.02 ± 0.005
Hidratos de carbono totales ^a	62.68 ± 0.18

^a: Calculados mediante diferencia. Los resultados se expresan en base húmeda.

En comparación con el análisis químico proximal realizado por Abraján-Villaseñor, 2008, a diversos mucílagos obtenidos a través de diferentes métodos de extracción, el contenido de hidratos de carbono totales es menor, pues en dicho trabajo el intervalo de su contenido se encuentra entre 68.9 y 74.8%, mientras que en el presente trabajo es 62.68%, otros macrocomponentes diferentes en contenido con respecto al trabajo de Abraján-Villaseñor, 2008, son la fibra cruda y la proteína,

pues esta autora reportó un contenido entre 0.1 y 1.3% de fibra cruda y entre 3.0 y 4.0% de proteína, sin embargo en la *Tabla 6*, se observa un contenido menor en la fibra (0.02%) y considerablemente mayor (7.65%) con referencia a la proteína, sin embargo, éste último resultado es concordante, con el contenido reportado por Sepúlveda *et. al.*, 2007, pues el intervalo que reportan, oscila entre 6.7 y 7.5% de proteína. Por otro lado, el contenido de cenizas fue similar en ambos trabajos, encontrándose 25.93% en el presente proyecto y en un intervalo de entre 20.5 y 25.9% en el de Abraján-Villaseñor, 2008, a pesar de ello, el contenido de cenizas fue menor con respecto al reportado por Sepúlveda *et. al.*, 2007, al obtener entre 36.8 y 38.1%.

Las variaciones entre los AQP realizados en cada proyecto se atribuyen en primera instancia a la diferencia entre el método de extracción que se mantuvo en cada uno de ellos, pues en el caso de Sepúlveda *et. al.*, 2007, se llevó a cabo una extracción con solventes orgánicos y en el caso de Abraján-Villaseñor, 2008, se realizaron diversos procedimientos previos a la extracción del mucílago, como lo son el escaldado o el decolorado del nopal. Además de lo anteriormente mencionado, el tipo de suelo, la zona de siembra, el clima, la edad, entre otras cosas, son factores que impactan de manera directa en la composición del nopal y con ello también, la composición de su mucílago.

De acuerdo con los resultados obtenidos, el contenido de lípidos en el mucílago es 0.71%, valor que hace favorable su posterior utilización para la aplicación deseada: agente dispersante en las matrices alimentarias que ingerirán los pacientes después de la cirugía bariátrica, enfatizando que es deseable que los lípidos de los suplementos a consumir, se encuentren entre el 20 y 30% del aporte total de energía en su dieta diaria.

En cuanto al contenido de cenizas, se obtuvo 25.93%, lo que indica que el mucílago posee una cantidad alta de minerales, no obstante, es conveniente realizar un análisis más detallado para identificar y cuantificar los minerales que contiene el mucílago específicamente. Cabe señalar que los pacientes bariátricos requieren cubrir deficiencias de Calcio, Zinc, Cobre, Fósforo y Magnesio (Rubio Herrera, 2005), y si están presentes en el mucílago, sería de gran utilidad para ellos.

Con respecto al contenido de proteína cruda (7.65%), es decir el contenido total de Nitrógeno de origen proteínico y no proteínico, es menor al de algunos otros alimentos reportados en la Base de Datos de Nutrientes para Estándares de Referencia del Departamento de Agricultura de los Estados Unidos (USDA, por sus siglas en inglés) como lo son los cereales, como avena (16.9 %) y trigo (harina, 13.2 %), algunas legumbres como cacahuate (cocido, 13.5 %) y soya (18.2%) y semillas como ajonjolí (tostado, 17 %) y nuez (tostada, 24.1 %), es por ello que se utilizaron harinas de dichos grupos de alimentos como principal aporte proteínico en las suspensiones desarrolladas para consumo de pacientes bariátricos.

La proteína es uno de los nutrientes más importantes para la dieta que se mantendrá después de la cirugía, deben ser consumidas proteínas de alto valor biológico que aporten entre el 20 y 40% de energía total diariamente, su consumo debe corresponder a 1.2 g de proteína por kilogramo de peso ajustado por día, sin embargo, dado que la cantidad de proteína a consumir se basa en el peso corporal de cada paciente, en general las mujeres como mínimo deben consumir 60 g al día, mientras que para los hombres la cantidad mínima son 80 g.

El Extracto Libre de Nitrógeno, proporciona información respecto a la cantidad de hidratos de carbono presentes en el mucílago de nopal, los

cuales no deben rebasar el límite entre el 40 y 50% de la energía total en la dieta diaria de los pacientes.

Finalmente, de acuerdo con la información sobre el consumo energético total diario en pacientes bariátricos proporcionada por la Clínica de Obesidad del Hospital General Dr. Manuel Gea González, este consumo debe ser aprox. de 600 kcal, ya que al mantener una dieta hipocalórica se asegura la ausencia de una ganancia de peso rápida e indeseable.

4.2.2. Composición de azúcares

Con respecto a la caracterización química del mucílago de *Opuntia ficus indica*, se ha reportado la presencia de compuestos como galactosa, arabinosa, xilosa, ramnosa y ácidos urónicos, específicamente ácido galacturónico, en el mucílago de diferentes especies de *Opuntia* (Rodríguez-González *et al.* 2014), presentes en las proporciones mostradas en la *Tabla 2*, es por ello que, como estándares se utilizaron dichos compuestos para evaluar su presencia mediante cromatografía en capa fina.

En la *Figura 8* es posible observar las placas cromatográficas a y b, obtenidas como resultado de la cromatografía en capa fina realizada; en ellas aparecen los estándares utilizados y la aplicación de dos muestras después de la hidrólisis ácida del mucílago de nopal.

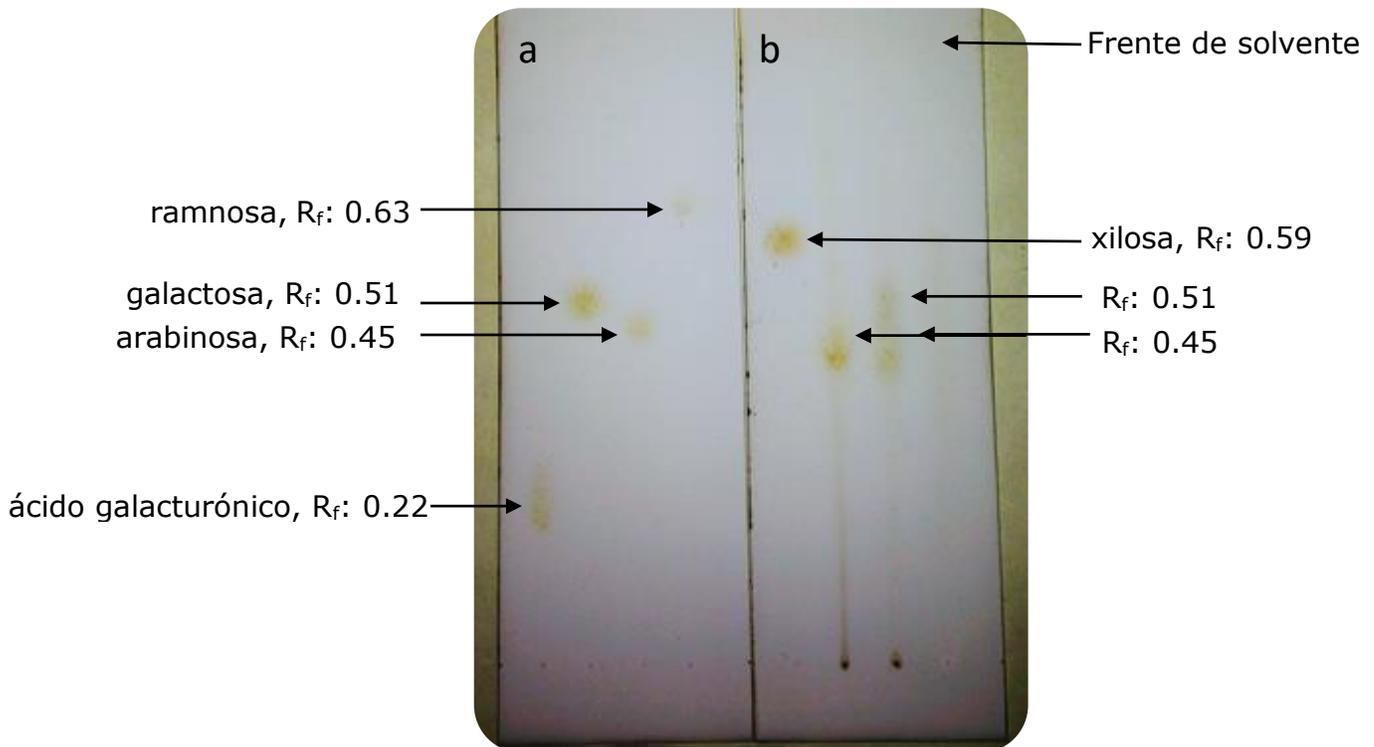


Figura 8. Cromatografía en capa fina del mucílago de nopal. Orden de izquierda a derecha a): estándares de ácido galacturónico, arabinosa, galactosa y ramnosa; en la placa b): estándar de xilosa, muestra de mucílago de nopal 1 y 2.

Al evaluar los R_f , en la muestra 1 del mucílago, se observa la presencia de arabinosa (R_f : 0.45), mientras que para la muestra 2, se observa la presencia de galactosa y arabinosa (R_f : 0.51 y 0.45, respectivamente). Ambos azúcares, según diversos autores (observar *Tabla 2*) son los que se encuentran en mayor proporción en el mucílago, por lo que posiblemente no se hayan observado los demás azúcares debido a la proporción tan baja en la que se podrían encontrar, de estar presentes. Otra posible explicación, es la que dan McGarvie y Parolis, 1981, que suponen que la ramnosa y el ácido galacturónico parecen

encontrarse confinados en la parte ácido-resistente de la cadena lineal principal, pues no aparecen después de la hidrólisis del mucílago que desarrollaron en su trabajo.

Cabe señalar que las marcas de las muestras de mucílago aplicadas, se aprecian "barridas". Se sugiere mejorar la técnica aumentando el tiempo de elución y variar las proporciones de los componentes de la fase móvil, para separar mejor los azúcares.

Mediante la cromatografía en capa fina se obtiene sólo un análisis cualitativo de los azúcares presentes en los polisacáridos que conforman el mucílago de nopal, para lo cual se sugiere como perspectiva del trabajo, complementar la técnica con una cuantitativa y de mayor sensibilidad para hacer posible la cuantificación de los azúcares presentes.

4.2.3. Caracterización reológica de soluciones de mucílago reconstituido

Se obtuvieron las curvas de flujo para el mucílago reconstituido a las diferentes concentraciones con un baño con control de temperatura mantenido a 25°C. Se trabajó en un intervalo de gradiente de velocidad de 10 a 100 s⁻¹. En la *Figura 9* se muestra la curva de comportamiento al flujo del mucílago reconstituido en agua, mientras que el mismo comportamiento del mucílago en jugo de manzana se encuentra en la *Figura 10*.

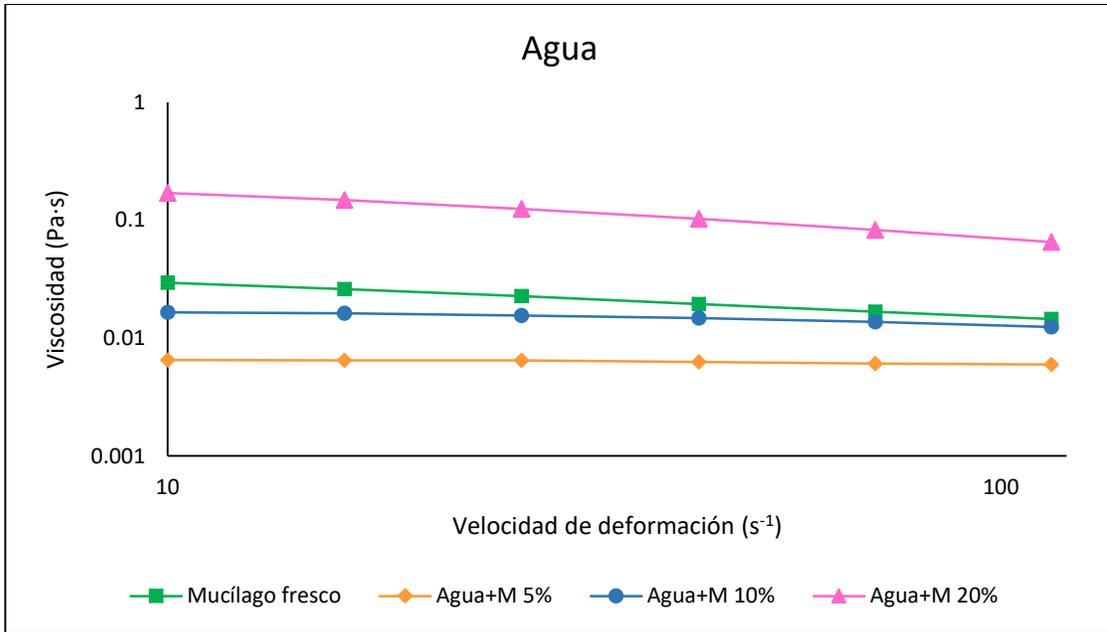


Figura 9. Curva de viscosidad en corte del mucílago de nopal reconstituido en agua.

Agua+M 5%: mucílago al 5% en agua, Agua+M 10%: mucílago al 10% en agua, Agua+M 20%: mucílago al 20% en agua.

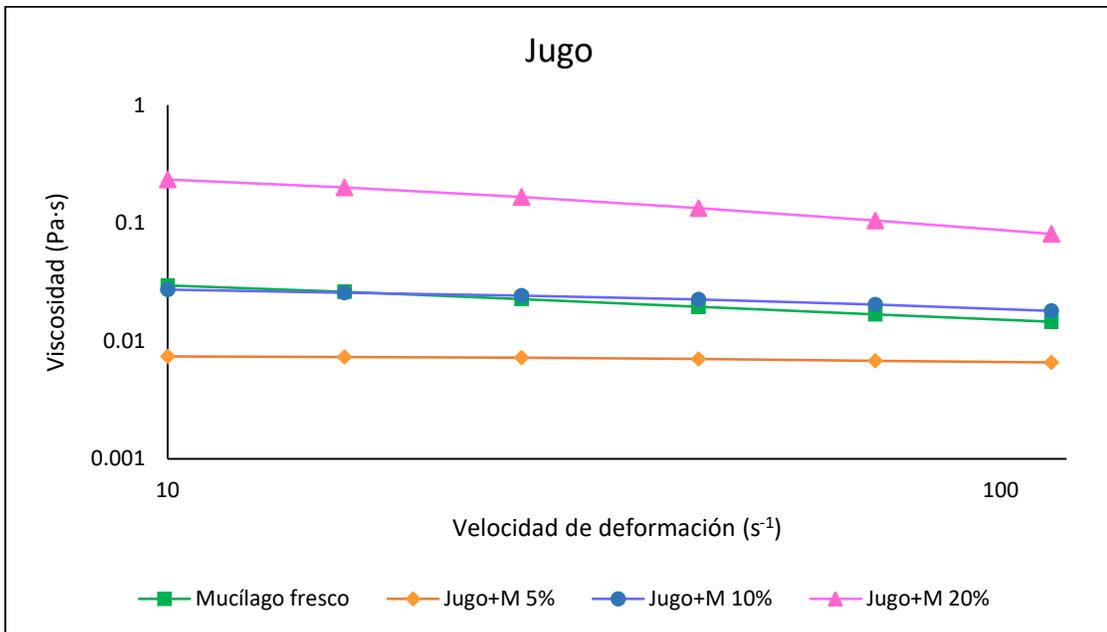


Figura 10. Curva de viscosidad en corte del mucílago de nopal reconstituido en jugo de manzana.

Jugo+M 5%: mucílago al 5% en jugo, Jugo+M 10%: mucílago al 10% en jugo, Jugo+M 20%: mucílago al 20% en jugo.

La diferencia entre las matrices utilizadas es la concentración alta de azúcares presente en el jugo de manzana (5 g azúcares/200 mL de jugo) que en el agua están ausentes. El comportamiento es newtoniano, similar a lo que reporta Anandha Rao, 2013, quien señala que los alimentos que contienen compuestos de bajo peso molecular (por ejemplo: azúcares) y que no contienen altas concentraciones de polímeros (como pectinas, proteínas, almidones) o de sólidos insolubles, son típicamente newtonianos.

En las concentraciones al 5 y 10% p/p en las matrices líquidas, se observa que la viscosidad no depende de la velocidad de deformación aplicada, excepto en el caso de la concentración del mucílago al 20% p/p, en la cual el comportamiento del fluido es no newtoniano de tipo pseudoplástico o reofluidizante, por lo que sus datos se ajustaron al modelo de Ley de Potencia, obteniendo así las viscosidades reportadas en la *Tabla 7*.

Tabla 7. Viscosidad de soluciones de mucílago de nopal reconstituido en agua y jugo de manzana.

Matriz	Concentración de mucílago (%)	Viscosidad (Pa·s)	Desv. Est.
Agua	0	0.00099	0.00008
	5	0.00629	0.00032
	10	0.02505	0.00323
Jugo de manzana	0	0.00112	0.00011
	5	0.00820	0.00050
	10	0.03250	0.00390
Matriz	Concentración de mucílago (%)	k (Pa·sⁿ)	n
Agua	20	0.4384	0.607
Jugo de manzana	20	0.6690	0.564

En general el jugo de manzana tuvo valores de viscosidad más altos que los del agua seguramente debido a la concentración de azúcares

presentes en dicha bebida, sin embargo, a pesar de ello, el comportamiento de ambas matrices sin mucílago es newtoniano.

Se analizaron estadísticamente los datos de viscosidad obtenidos, resultando con ello que hubo diferencia significativa ($p < 0.05$) entre el comportamiento del mucílago fresco y las reconstituciones del mucílago en polvo en concentraciones del 5 y 20% p/p, y por el contrario, no hubo diferencia significativa con respecto al mucílago reconstituido al 10% p/p en agua ni en jugo de manzana, motivo por el cual se seleccionó dicha concentración para continuar con el desarrollo de las pruebas del presente trabajo.

4.3. Aplicación del mucílago de nopal como agente dispersante en suspensiones alimenticias

4.3.1. Evaluación del mucílago de nopal como agente dispersante

4.3.1.1. Pruebas de estabilidad

Los porcentajes de sedimentación obtenidos para las cinco mezclas de harinas al 2% p/p (proporción 1:1 c/u) y mucílago al 10% p/p en leche descremada, se presentan en la *Figura 11*.

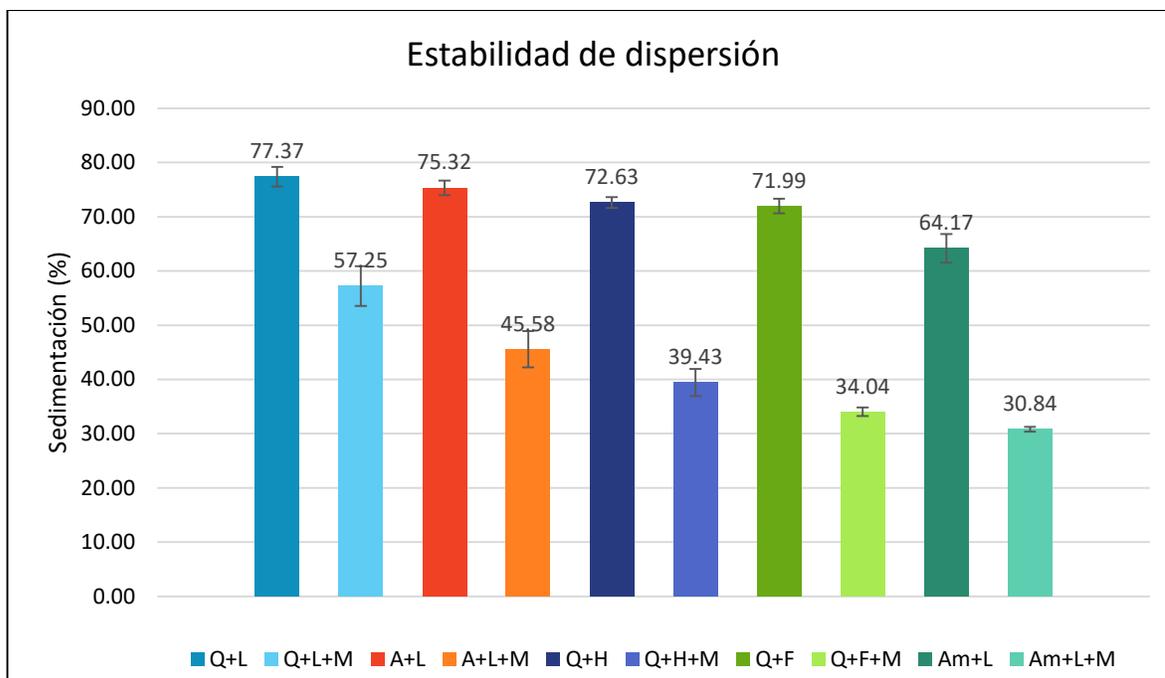


Figura 11. Porcentaje de sedimentación de harinas en las diferentes suspensiones alimenticias desarrolladas.

Q+L: mezcla de quinoa y lenteja, Q+L+M: mezcla de quinoa y lenteja con mucílago.

A+L: mezcla de avena y lenteja, A+L+M: mezcla de avena y lenteja con mucílago.

Q+H: mezcla de quinoa y haba, Q+H+M: mezcla de quinoa y haba con mucílago.

Q+F: mezcla de quinoa y frijol, Q+F+M: mezcla de quinoa y frijol con mucílago.

Am+L: mezcla de amaranto y lenteja, Am+L+M: mezcla de amaranto y lenteja con mucílago.

En la figura se observa que la presencia de mucílago disminuye el porcentaje de sedimentación, estabilizando las suspensiones, por lo que se demuestra su función como agente dispersante. Asimismo, se observa que el orden de estabilidad desciende de la siguiente manera en ambos casos, con y sin mucílago: amaranto y lenteja, quinoa y frijol, quinoa y haba, avena y lenteja, y por último quinoa y lenteja.

Por otra parte, mientras la mezcla de harinas es más estable, mayor es la diferencia de los porcentajes de sedimentación entre las suspensiones con mucílago y sin mucílago.

Con el objetivo de realizar un análisis basado en el cambio entre el uso de cereales y leguminosas en las suspensiones y definir los ingredientes más convenientes a utilizar en las mismas, se fijó el uso de quinoa, en el caso de cereales y de lenteja, para el caso de las leguminosas, en combinación con tres harinas diferentes. Los resultados se reportan en la *Figura 12*, en la que se muestra la diferencia entre las interacciones del mucílago, dejando fijo el cereal (quinoa) con el cambio de leguminosas en las suspensiones y la *Figura 13*, en la cual se varían los cereales, fijando la leguminosa (lenteja).

Se observa que la interacción del mucílago con quinoa y frijol es más estable que las interacciones del mismo con lenteja y haba, mientras que la interacción del mucílago con amaranto y lenteja es más estable que aquellas con avena y quinoa. Dicho comportamiento puede ser atribuible a diferentes factores.

Primeramente, a la densidad (cantidad de masa presente por unidad de volumen ocupado) de las harinas, pues experimentalmente se determinó que decrece de la siguiente manera: avena, lenteja, frijol, quinoa, haba y amaranto, esto debido a la composición de cada cereal y leguminosa.

La harina de lenteja es considerablemente más densa que la de frijol y la de haba, esto pudo favorecer la sedimentación de la misma. Por otro lado, la harina de amaranto desde que es adicionada a la leche, tiende a flotar, por lo que se esperaba que se mantuviera en una suspensión más estable en comparación con la de avena y quinoa, pues opone más resistencia a la sedimentación.

Además de lo anterior, cada cereal y leguminosa, posee una composición diferente de almidones, los cuales varían en la proporción de amilosa y amilopectina presentes. La estructura altamente ordenada de la amilosa, opone resistencia a una rápida hidratación del almidón, y, por

el contrario, la amilopectina permite una mejor hidratación. En consecuencia, si un almidón se hidrata, puede ofrecer una mayor estabilidad a la suspensión, pues aumenta la viscosidad de la misma, favoreciendo con ello la formación de un gel y por ende, se dificulta la sedimentación de las partículas en suspensión, como fue el caso del amaranto con lenteja, pues se aumentó tanto la viscosidad que no se formó un gel, sino una pasta que mantuvo por completo dispersas a las partículas de harina.

Una vez que el mucílago de nopal se reconstituye, forma una red con la leche descremada que puede ser traspasada por partículas muy densas que tienden a sedimentar independientemente de su tamaño, o bien, pueden retener partículas cuyo almidón se encuentre totalmente hidratado y, por ello, hayan aumentado su tamaño y en consecuencia, no logren cruzar por los orificios propios de la red.

Por otro lado, la solubilidad de ciertos componentes de los cereales y leguminosas pudieron afectar en la estabilidad de las suspensiones, pues si las harinas eran ricas en fibra insoluble, por ejemplo, las partículas presentes tenderían a sedimentar.

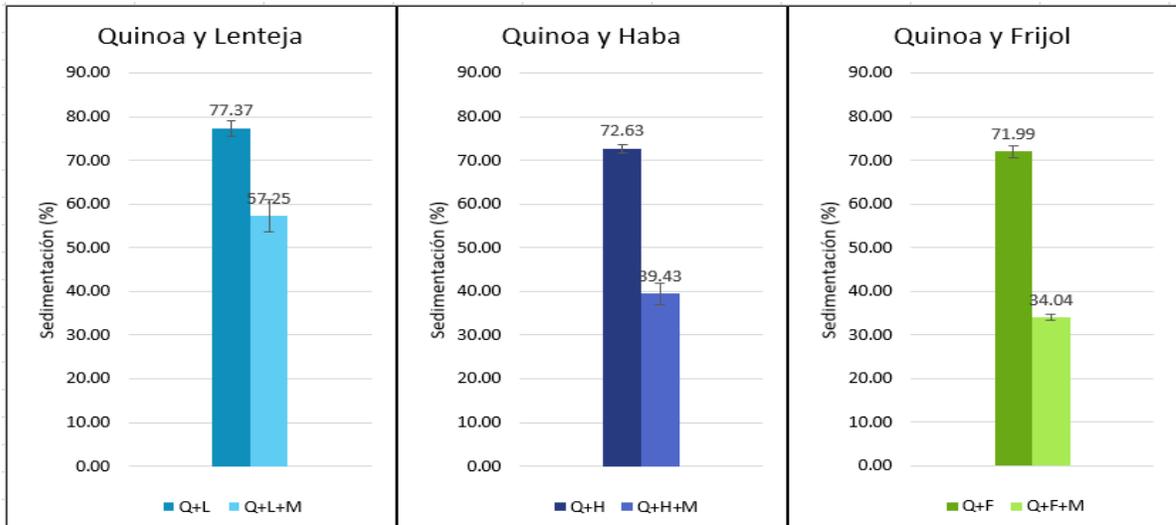


Figura 12. Comparación entre los porcentajes de sedimentación de harinas manteniendo fija la quinoa y variando la leguminosa en la mezcla.

Q+L: mezcla de quinoa y lenteja, Q+L+M: mezcla de quinoa y lenteja con mucílago.

Q+H: mezcla de quinoa y haba, Q+H+M: mezcla de quinoa y haba con mucílago.

Q+F: mezcla de quinoa y frijol, Q+F+M: mezcla de quinoa y frijol con mucílago.

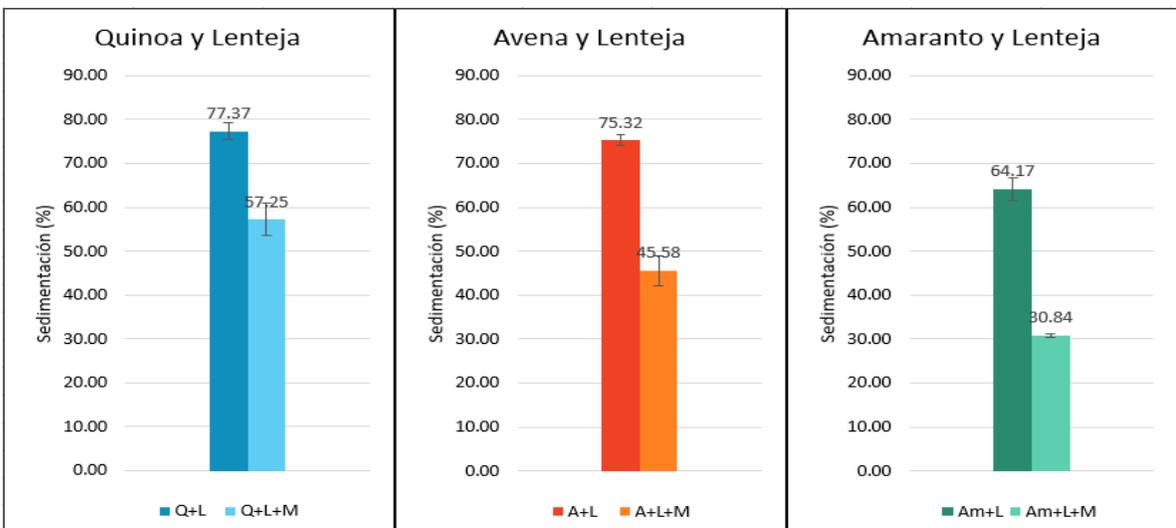


Figura 13. Comparación entre los porcentajes de sedimentación de harinas manteniendo fija la lenteja y variando el cereal en la mezcla.

Q+L: mezcla de quinoa y lenteja, Q+L+M: mezcla de quinoa y lenteja con mucílago.

A+L: mezcla de avena y lenteja, A+L+M: mezcla de avena y lenteja con mucílago.

Am+L: mezcla de amaranto y lenteja, Am+L+M: mezcla de amaranto y lenteja con mucílago.

4.3.1.2. Caracterización reológica

En la *Figura 14* y la *Figura 15*, se presentan las curvas de viscosidad que se obtuvieron con las mezclas de avena con lenteja y amaranto con lenteja en presencia de mucílago al 10% p/p. Las curvas de viscosidad para las mezclas restantes se exponen en el Anexo 1. Curvas de viscosidad en corte de suspensiones alimenticias.

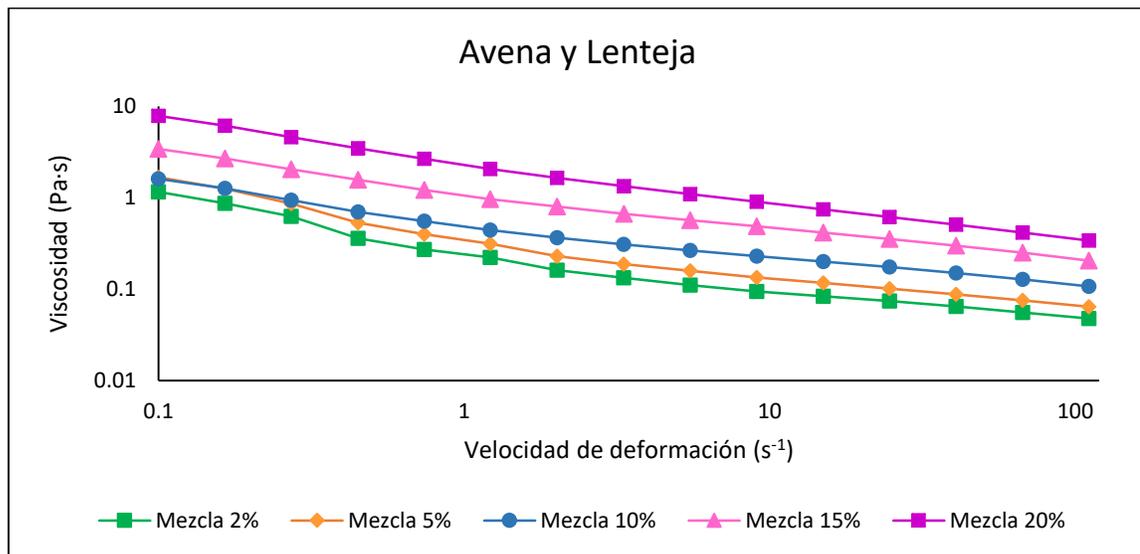


Figura 14. Curva de viscosidad en corte de suspensión de avena y lenteja con mucílago al 10% p/p.

Revisar nomenclatura bajo la *Figura 15*.

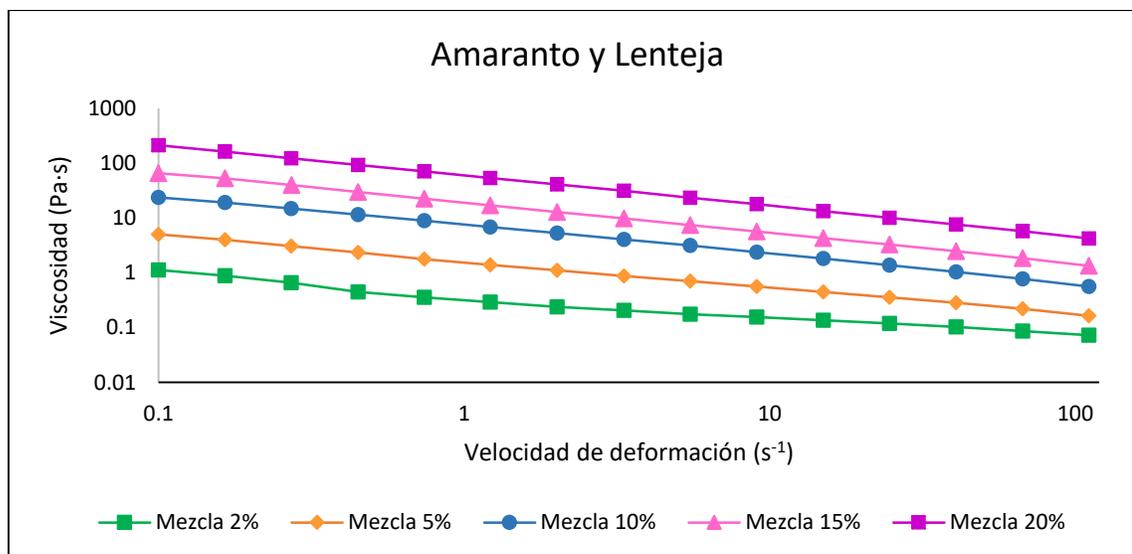


Figura 15. Curva de viscosidad en corte de suspensión de amaranto y lenteja con mucílago al 10% p/p.

Mezcla 2%: mezcla al 2% de cereal (1%) y leguminosa (1%) en leche descremada.

Mezcla 5%: mezcla al 5% de cereal (2.5%) y leguminosa (2.5%) en leche descremada.

Mezcla 10%: mezcla al 5% de cereal (5%) y leguminosa (5%) en leche descremada.

Mezcla 15%: mezcla al 5% de cereal (7.5%) y leguminosa (7.5%) en leche descremada.

Mezcla 20%: mezcla al 5% de cereal (10%) y leguminosa (10%) en leche descremada.

De acuerdo con las figuras, el amaranto proporciona a la mezcla mayor viscosidad que la avena en combinación con la lenteja a concentraciones mayores al 5% p/p. En el caso de la concentración al 2% p/p, ambos cereales proporcionan viscosidades similares a la mezcla. Esto es de suma relevancia, debido a que en la fase de líquidos generales es posible consumir sólo alimentos fluidos, pues el consumo de alimentos con consistencia de puré o papilla como lo es la suspensión con amaranto y lenteja está permitido en la fase post-quirúrgica posterior.

En todos los casos, el comportamiento es no newtoniano y pseudoplástico o refluidizante. Los datos obtenidos en las curvas de todas las suspensiones obedecen a la Ley de Potencia o de Ostwald de Waele. Por lo que en la *Tabla 8* se presentan los parámetros reológicos obtenidos de dicha ecuación.

Tabla 8. Parámetros reológicos de suspensiones alimenticias según Ley de Potencia.

Mezcla	Concentración de harina (%)	k (Pa·s ⁿ)	n
Q+L	2	0.462	0.325
	5	0.931	0.424
	10	0.791	0.548
	15	2.956	0.473
	20	3.292	0.536
Q+H	2	0.316	0.568
	5	0.382	0.580
	10	0.462	0.632
	15	0.748	0.611
	20	1.675	0.564
Q+F	2	0.238	0.644
	5	0.361	0.626
	10	0.706	0.655
	15	1.919	0.586
	20	6.349	0.545
A+L	2	0.291	0.557
	5	4.160	0.547
	10	0.552	0.628
	15	1.184	0.612
	20	2.493	0.558
Am+L	2	0.372	0.628
	5	1.613	0.521
	10	7.479	0.468
	15	19.021	0.446
	20	59.819	0.445

Q+L: mezcla de quinoa y lenteja

A+L: mezcla de avena y lenteja

Q+H: mezcla de quinoa y haba

Q+F: mezcla de quinoa y frijol

Am+L: mezcla de amaranto y lenteja

Mientras el valor de n sea más cercano a 1, el fluido tiene un carácter más cercano a un fluido newtoniano. En ninguno de los casos se esperaría dicho comportamiento, puesto que independientemente del uso de harinas, la combinación de mucílago con leche descremada posee ya un comportamiento no newtoniano, reofluidizante. Para todas las

mezclas, excepto la de avena y lenteja, se observa que el índice de consistencia (k), aumenta conforme la concentración de harinas es mayor.

De igual manera, se realizó una caracterización del comportamiento viscoelástico de las mezclas en presencia de mucílago. Para ello, se obtuvo el intervalo viscoelástico lineal de cada suspensión a partir de los módulos dinámicos de almacenamiento (G') y pérdida (G'') en función de la deformación.

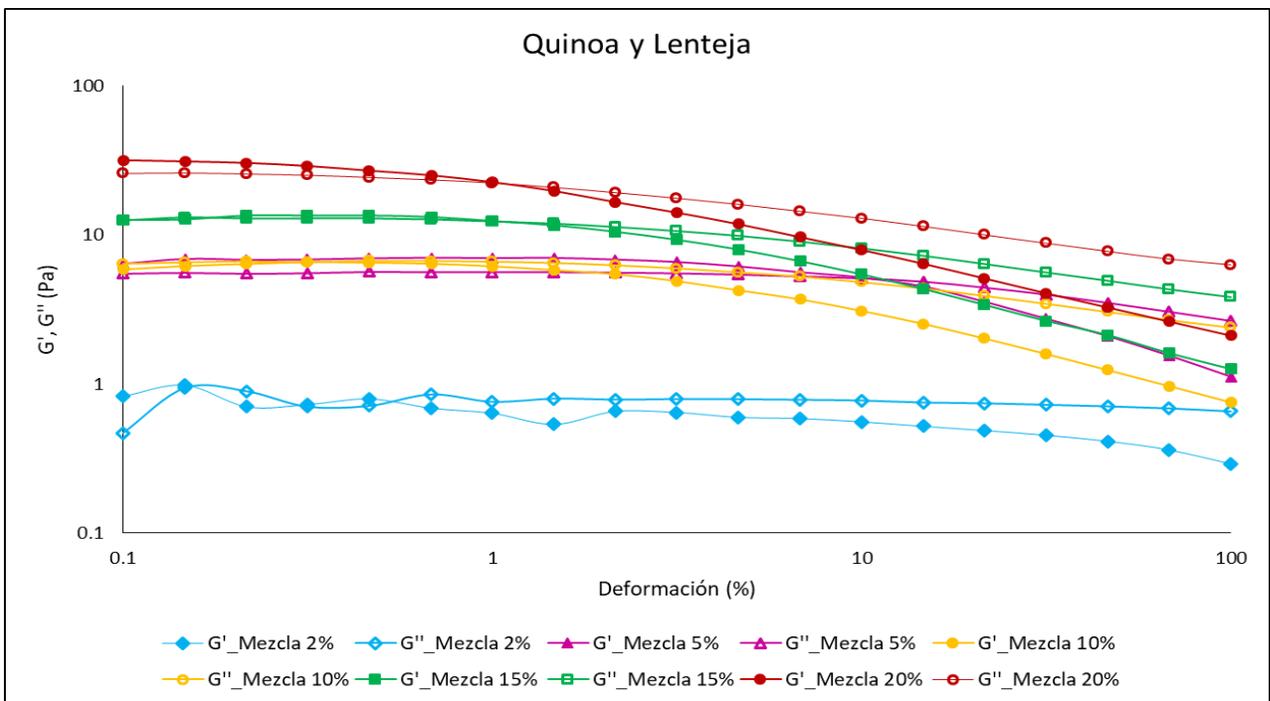


Figura 16. Módulos dinámicos de almacenamiento (G') y pérdida (G'') en función del porcentaje de deformación a frecuencia de 1Hz, para diferentes concentraciones de la mezcla quinoa-lenteja y mucílago de nopal.

Revisar nomenclatura bajo la *Figura 17*.

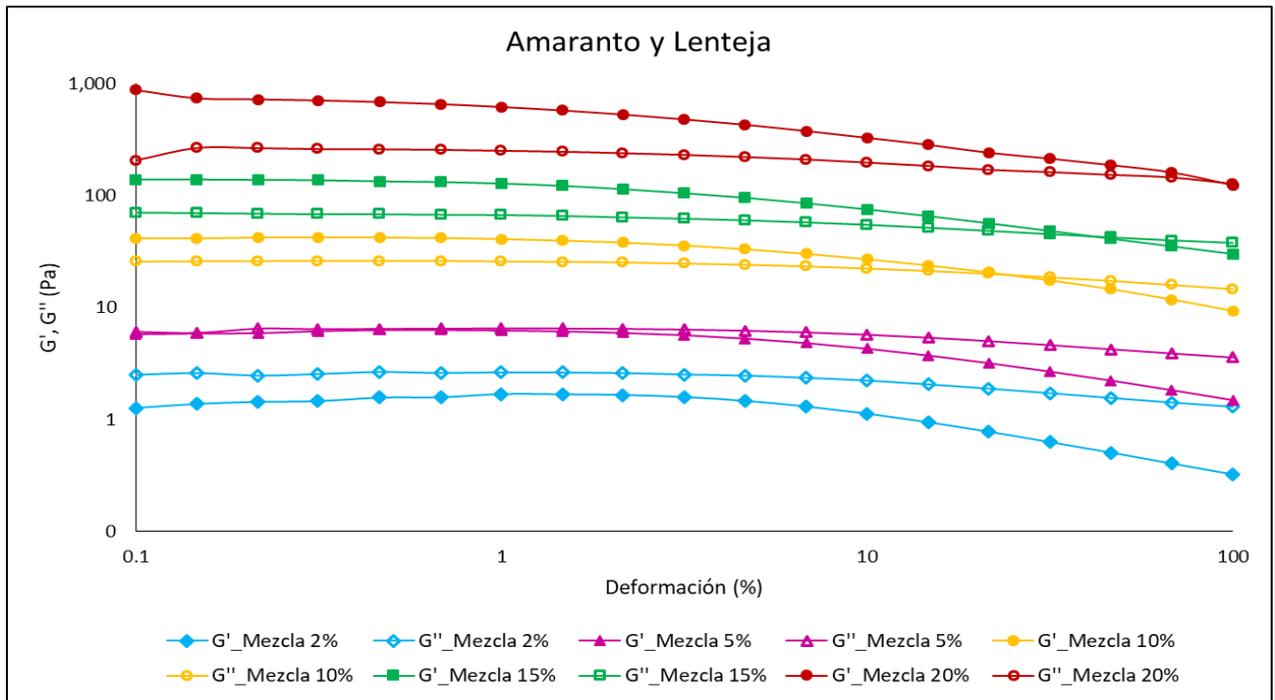


Figura 17. Módulos dinámicos de almacenamiento (G') y pérdida (G'') en función del porcentaje de deformación a frecuencia de 1Hz, para diferentes concentraciones de la mezcla amaranto-lenteja y mucílago de nopal.

G' _Mezcla 2%: módulo elástico o de almacenamiento de la mezcla al 2%, de cereal (1%) y leguminosa (1%) en leche.

G'' _Mezcla 2%: módulo viscoso o de pérdida de la mezcla al 2% de cereal (1%) y leguminosa (1%) en leche.

G' _Mezcla 5%: módulo elástico o de almacenamiento de la mezcla al 5% de cereal (2.5%) y leguminosa (2.5%) en leche.

G'' _Mezcla 5%: módulo viscoso o de pérdida de la mezcla al 5% de cereal (2.5%) y leguminosa (2.5%) en leche.

G' _Mezcla 10%: módulo elástico o de almacenamiento de la mezcla al 10% de cereal (5%) y leguminosa (5%) en leche.

G'' _Mezcla 10%: módulo viscoso o de pérdida de la mezcla al 10% de cereal (5%) y leguminosa (5%) en leche.

G' _Mezcla 15%: módulo elástico o de almacenamiento de la mezcla al 15% de cereal (7.5%) y leguminosa (7.5%) en leche.

G'' _Mezcla 15%: módulo viscoso o de pérdida de la mezcla al 15% de cereal (7.5%) y leguminosa (7.5%) en leche.

G' _Mezcla 20%: módulo elástico o de almacenamiento de la mezcla al 20%, de cereal (10%) y leguminosa (10%) en leche.

G'' _Mezcla 20%: módulo viscoso o de pérdida de la mezcla al 20% de cereal (10%) y leguminosa (10%) en leche.

En la *Figura 16* se presenta el comportamiento para las suspensiones de quinoa con lenteja, mientras que en la *Figura 17* se muestran los módulos dinámicos para las mezclas de amaranto con lenteja.

En el Anexo 2, se encuentran las curvas de amplitud en función de la deformación a frecuencias bajas, de las demás mezclas de harinas. En todos los casos se observa un comportamiento estable, no obstante que a porcentajes de deformación menores a 1% para la mezcla al 2% p/p de quinoa y lenteja, se muestran variaciones que implican baja estabilidad, producto de la heterogeneidad en la mezcla.

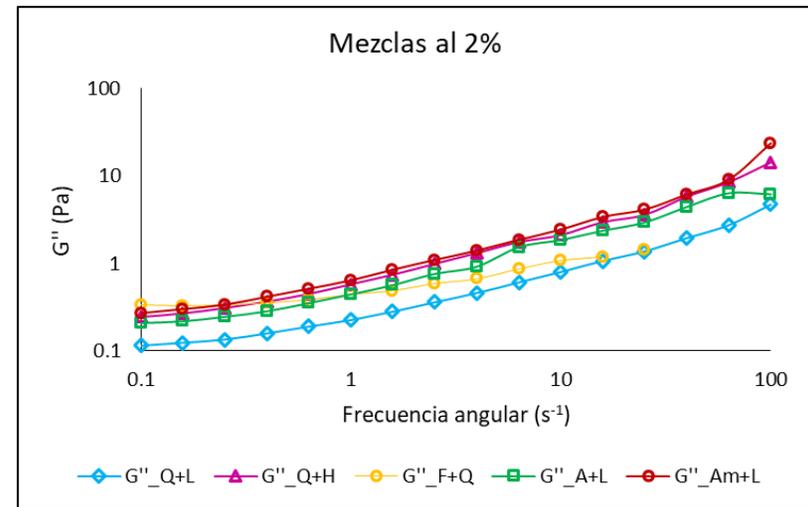
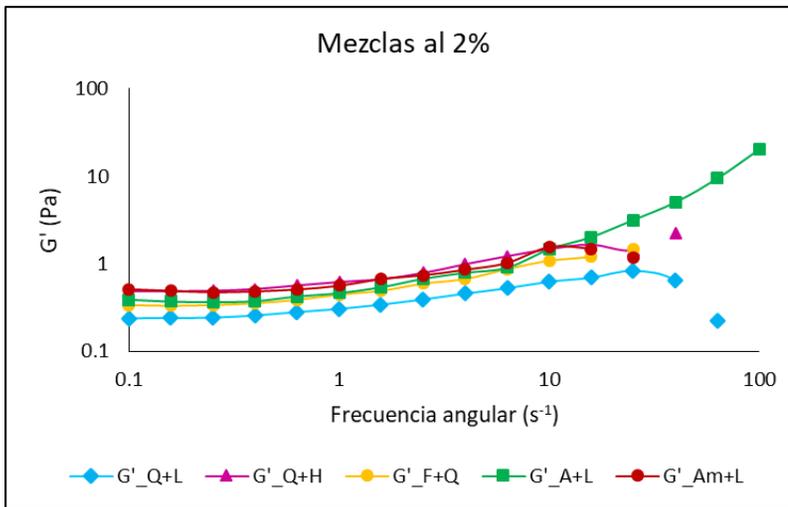
De igual forma, para todos los casos, el módulo de almacenamiento es mayor que el de pérdida, lo que indica la formación de un gel ligero con la matriz alimenticia. Esto es un aspecto favorable para mantener un sistema estable con una dispersión homogénea de las harinas en todo el suplemento. Sin embargo, en concentraciones bajas de harinas, como al 2% p/p, se presenta un comportamiento líquido, pues predomina el módulo viscoso ante el elástico, provocando inestabilidad.

Es conveniente señalar que, a valores de deformación bajos, de 3 a 5%, existe un punto de cruce entre ambos módulos dinámicos, lo que implica un cambio en la estructura del gel para la mezcla con quinoa y lenteja. Para la mezcla de amaranto y lenteja, este cambio de estructura se presentó a valores mayores al 20% de deformación, lo cual indica que se requiere mayor fuerza para modificar la estructura que forma esta mezcla con el mucílago y la leche.

Se trabajó dentro del intervalo viscoelástico lineal de cada suspensión, para obtener el comportamiento de los módulos dinámicos G' y G'' con respecto a la frecuencia angular, según se indica en las *Figura 18 a-e*, en las que se observa un comportamiento estable de ambos

módulos en frecuencias angulares menores a 10 s^{-1} . Sin embargo, frecuencias angulares cercanas a 100 s^{-1} , provocan cambios en las estructuras de los geles formados en las suspensiones y se rompe la estabilidad de las mismas.

a) Mezcla de harinas al 2% p/p, de cereal (1%) y leguminosa (1%) en leche.



b) Mezcla de harinas al 5% p/p, cereal (2.5%) y leguminosa (2.5%) en leche.

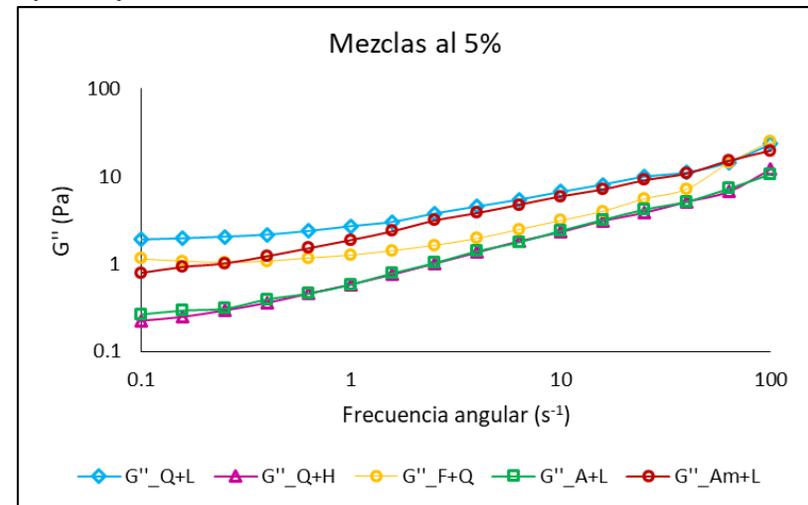
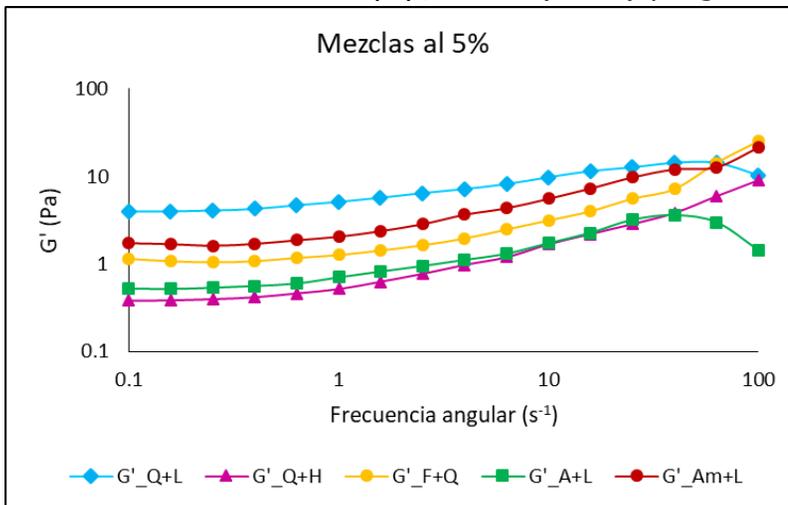
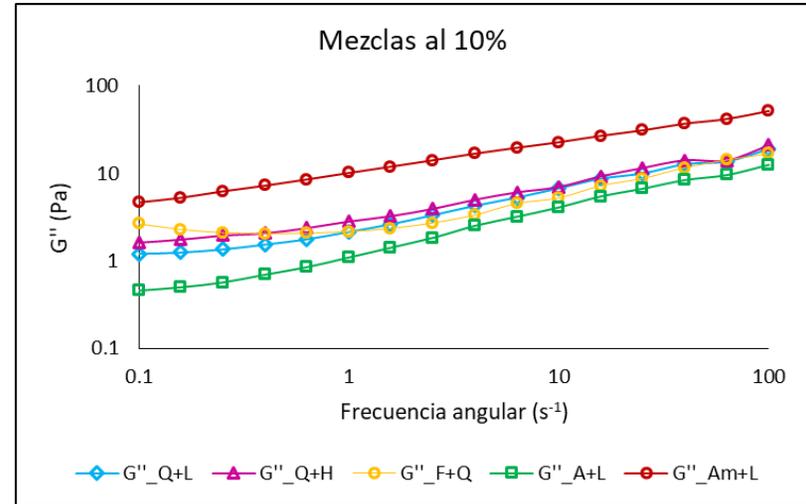
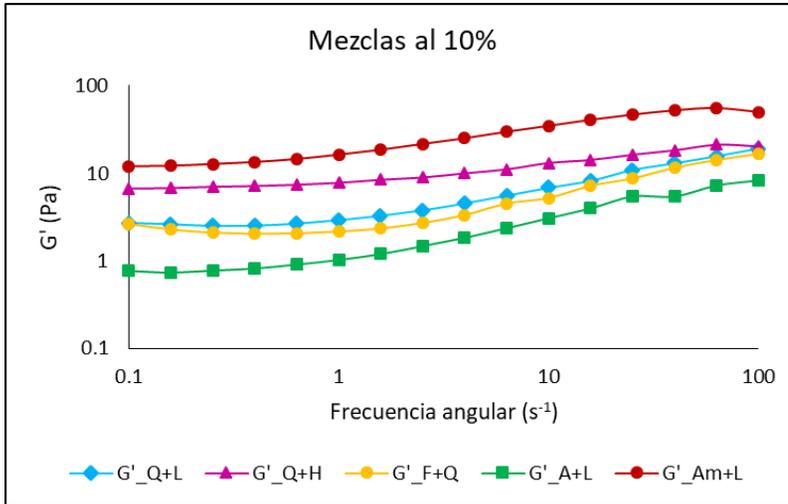
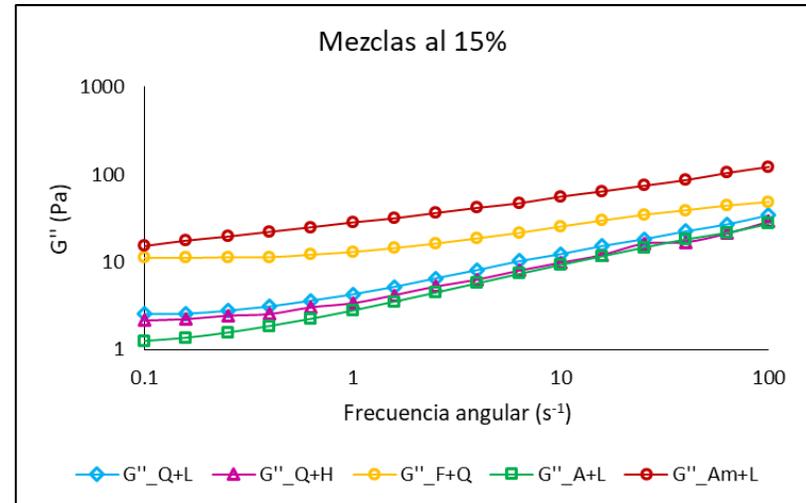
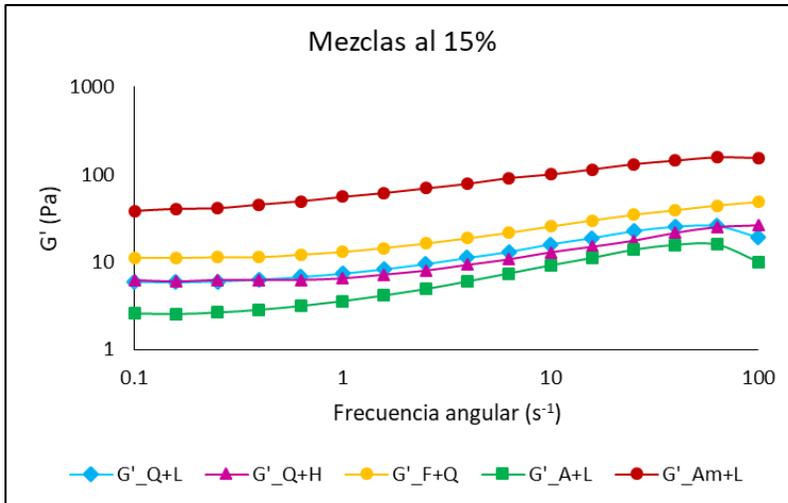


Figura 18. Comportamiento de los módulos dinámicos de almacenamiento G' y pérdida G'' en función de la frecuencia angular para diferentes concentraciones de mezclas de harinas y mucílago de nopal al 10% p/p.

c) Mezcla de harinas al 10% p/p, cereal (5%) y leguminosa (5%) en leche.

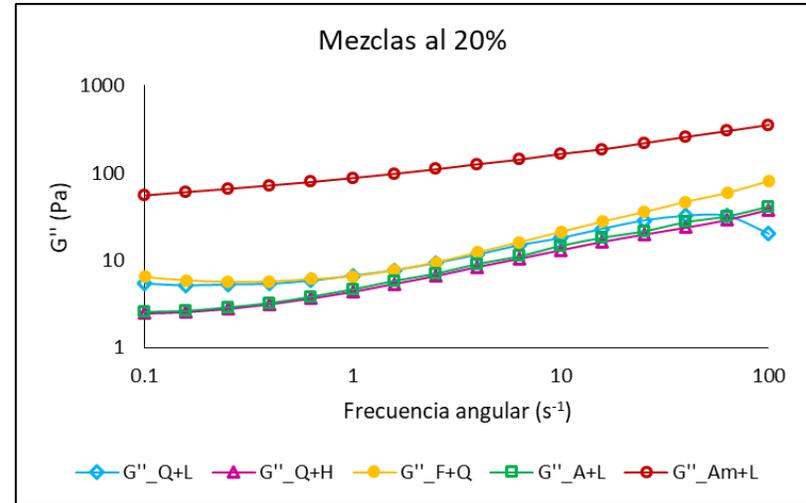
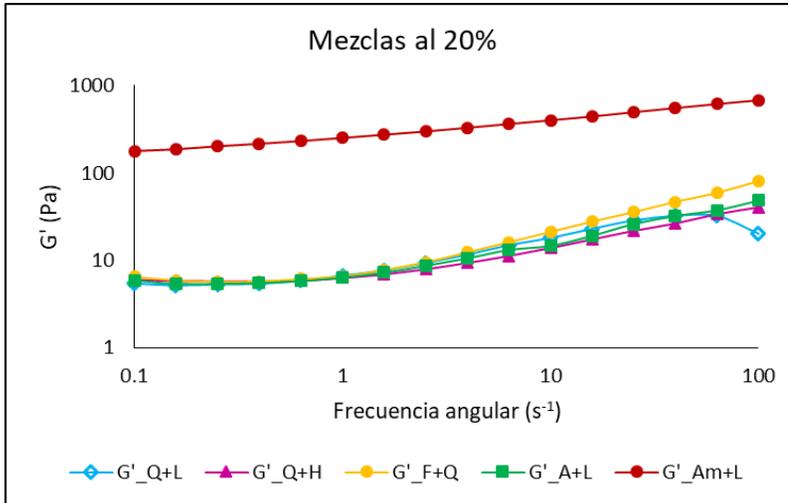


d) Mezcla de harinas al 15% p/p, cereal (7.5%) y leguminosa (7.5%) en leche.



Continuación Figura 18. Comportamiento de los módulos dinámicos de almacenamiento G' y pérdida G'' en función de la frecuencia angular para diferentes concentraciones de mezclas de harinas y mucílago de nopal al 10% p/p.

e) Mezcla de harinas al 20% p/p, cereal (10%) y leguminosa (10%) en leche.



Continuación Figura 18. Comportamiento de los módulos dinámicos de almacenamiento G' y pérdida G'' en función de la frecuencia angular para diferentes concentraciones de mezclas de harinas y mucílago de nopal al 10% p/p.

G'_Q+L : módulo elástico o de almacenamiento de la mezcla de quinoa y lenteja.

G''_Q+L : módulo viscoso o de pérdida de la mezcla de quinoa y lenteja.

G'_Q+H : módulo elástico o de almacenamiento de la mezcla de quinoa y haba.

G''_Q+H : módulo viscoso o de pérdida de la mezcla de quinoa y haba.

G'_Q+P : módulo elástico o de almacenamiento de la mezcla de frijol y quinoa.

G''_Q+P : módulo viscoso o de pérdida de la mezcla de frijol y quinoa.

G'_A+L : módulo elástico o de almacenamiento de la mezcla de avena y lenteja.

G''_A+L : módulo viscoso o de pérdida de la mezcla de avena y lenteja.

G'_Am+L : módulo elástico o de almacenamiento de la mezcla de amaranto y lenteja.

G''_Am+L : módulo viscoso o de pérdida de la mezcla de amaranto y lenteja.

Con respecto a las concentraciones de las diferentes mezclas de harinas utilizadas, es posible observar que, para 2, 5, 10 y 15% p/p los módulos dinámicos se mantienen en un intervalo de 0.1 a 10 Pa. Sin embargo, para la concentración de 20% p/p de mucílago, los valores de los módulos aumentan para todas las mezclas, pero en particular, los valores sufren un incremento brusco para la mezcla de amaranto y lenteja, aumentando aproximadamente 10 veces los valores en ambos módulos dinámicos con respecto a los de las demás mezclas de harinas. Dicho comportamiento resulta en tener mezclas altamente cohesivas, muy espesas, tienen apariencia de pasta más que de gel y son más difíciles de deglutir con respecto a un gel. Dicho comportamiento no es el óptimo para los suplementos que se desean desarrollar, pues al tratar de adecuarse a la fase post-quirúrgica de líquidos generales (fase II), no se requiere de una pasta.

En la *Figura 19* es posible observar el comportamiento del módulo complejo con respecto al esfuerzo de corte aplicado para las cinco mezclas de harinas en los suplementos alimenticios.

Mezcla 2%: mezcla al 2% de cereal (1%) y leguminosa (1%) en leche descremada.

Mezcla 5%: mezcla al 5% de cereal (2.5%) y leguminosa (2.5%) en leche descremada.

Mezcla 10%: mezcla al 5% de cereal (5%) y leguminosa (5%) en leche descremada.

Mezcla 15%: mezcla al 5% de cereal (7.5%) y leguminosa (7.5%) en leche descremada.

Mezcla 20%: mezcla al 5% de cereal (10%) y leguminosa (10%) en leche descremada.

Puré de durazno: muestra de referencia utilizada en el análisis.

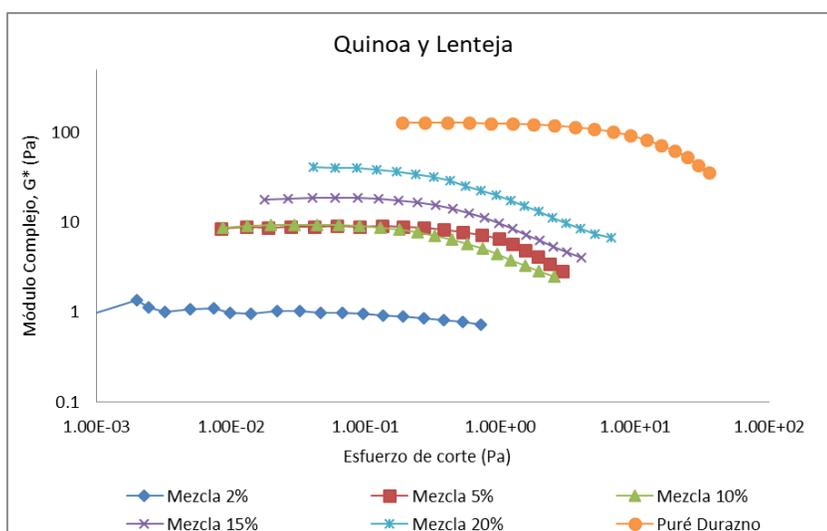
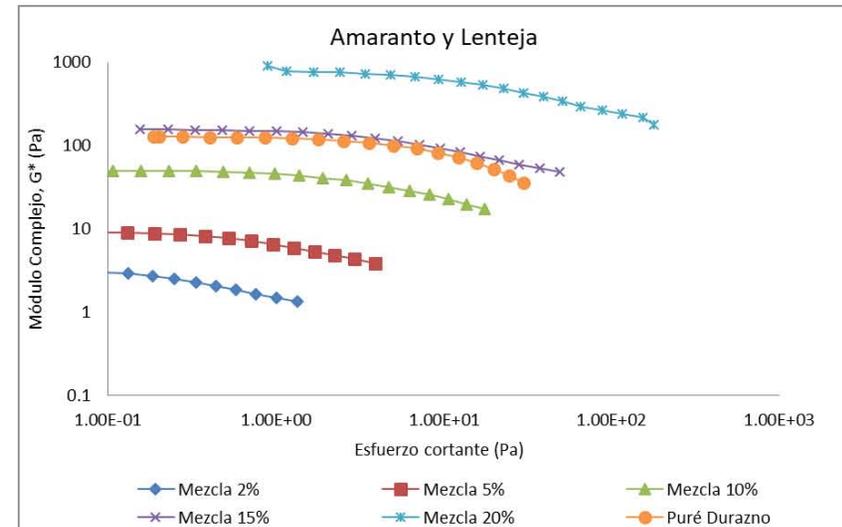
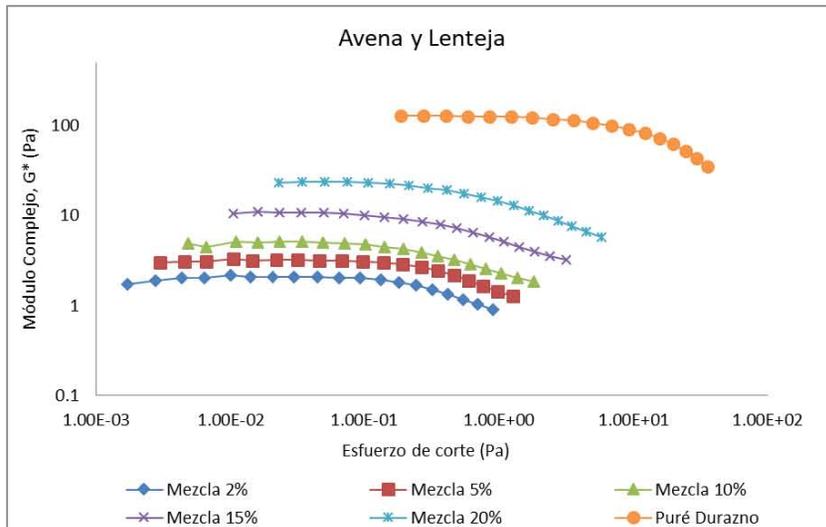
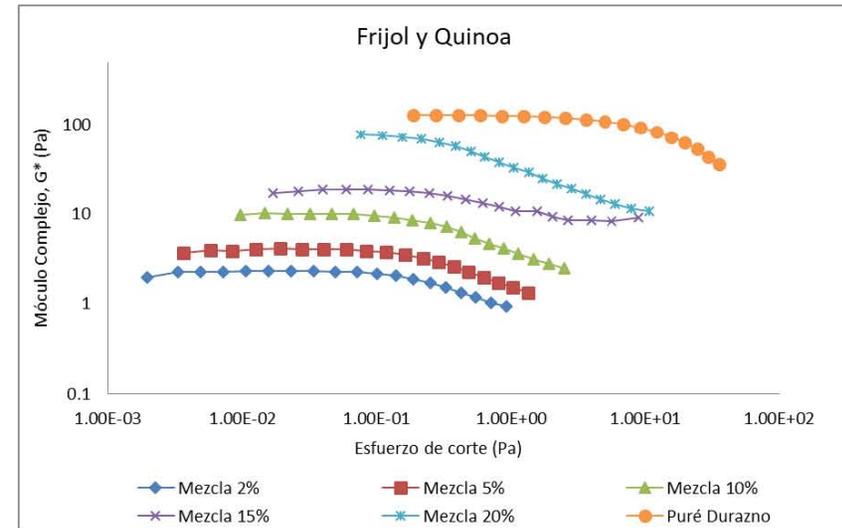
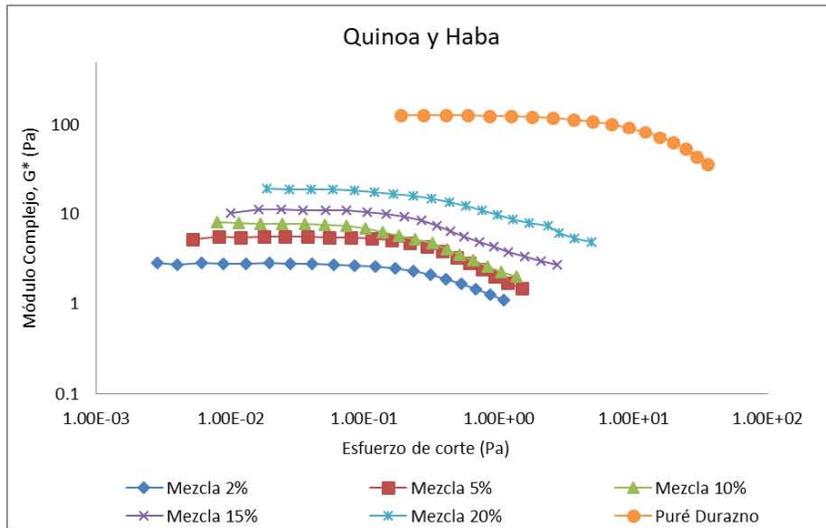


Figura 19. Comportamiento del módulo complejo en función del esfuerzo cortante para diferentes mezclas de harinas.



Continuación Figura 19. Comportamiento del módulo complejo en función del esfuerzo cortante para diferentes mezclas de harinas.

En el caso de la mezcla de amaranto y lenteja, es posible observar que a concentraciones de 15 y 20% p/p, se sobrepasa la rigidez del puré, dicha mezcla de acuerdo con las gráficas anteriores demuestra nuevamente ser sumamente estable, sin embargo, forma estructuras tan rígidas que se asemejan más a un pasta que a un gel o líquido, por lo que se corrobora que no es conveniente su uso para la aplicación deseada.

Para las mezclas quinoa con lenteja y, quinoa con frijol, se presentaron inestabilidades en sus mezclas al 2% p/p y al 15% p/p, respectivamente. Sin embargo, todas las demás mezclas, resultaron estables. En particular, la estructura de la mezcla quinoa y frijol obtuvo un comportamiento mayormente rígido y fuerte al obtener curvas más desplazadas hacia valores mayores tanto de estrés de corte como de módulo complejo, con respecto a las mezclas con quinoa y lenteja, quinoa y haba y, avena y lenteja. Las mezclas con estructuras más débiles y suaves formadas en la suspensión fueron éstas últimas tres, con estabilidades similares entre sí y más parecidas a un fluido que a una pasta, por lo que se consideran las más convenientes a utilizar para las suspensiones alimenticias para la etapa post quirúrgica de líquidos generales. Sus mezclas con 5 y 10% p/p de harinas poseen comportamientos casi iguales entre sí y son más débiles y suaves que las del 15 y 20% p/p, además de cumplir en teoría con los requerimientos nutrimentales de los pacientes en cuestión.

Dado lo anterior, sería indistinto el uso de cualquiera de las tres últimas mezclas, y se preferiría utilizar la concentración al 10% p/p, pues con ella se estaría consumiendo el doble de proteína de origen vegetal con respecto a la concentración al 5% p/p.

El carácter de gel que adquieren las suspensiones, está proporcionado por la interacción del mucílago con las partículas de las harinas y la leche, que es una emulsión sumamente compleja pero

estable, pues por su parte, el mucílago tiene la capacidad de formar redes moleculares, posee la capacidad de retención de agua, así como la de modificar las propiedades de viscosidad, y textura, por lo que probablemente forma una red compleja en su combinación con la leche, y dicha red es la que envuelve las partículas de harina en el suplemento.

4.3.1.3. Color

Los resultados de la evaluación del color mediante la escala Pantone® del mucílago reconstituido en matrices líquidas (agua, jugo y leche) se expresan en la *Tabla 9*, mientras que la misma evaluación llevada a cabo para las suspensiones alimenticias se encuentra en la *Tabla 10*.

Tabla 9. Prueba Pantone® para mucílago de nopal reconstituido en matrices líquidas.

Mucílago (%)	Agua	Jugo	Leche
5	 4645C	 470C	 7655C
10	 478C	 724U	 731U
20	 4695C	 478C	 776C

En la *Tabla 9* es posible observar que el mucílago imparte colores con tonalidad café-marrón a las matrices en donde fue reconstituido, esto

posiblemente se dio como resultado de un conjunto de diversos factores como:

- Oxidación de la clorofila, pues en el proceso de molienda quedan expuestos todos los componentes celulares.
- Oxidación enzimática de los polifenoles presentes, lo que se pudo solucionar escaldando los cladodios después de la molienda, o bien, sumergiéndolos en una solución ácida (con ácido cítrico, por ejemplo), ambos tratamientos con el objetivo de inactivar a las enzimas polifenoloxidasas liberadas durante la molienda.
- Secado muy agresivo, es decir, tomando en cuenta el tamaño tan pequeño de las partículas formadas al secar por aspersion, éstas pudieron resultar dañadas. Como posible solución podría utilizarse un recubrimiento con un encapsulante para protección del mucílago (maltodextrinas, por ejemplo) durante el proceso.

Tabla 10. Prueba Pantone® para suspensiones alimenticias de diferentes mezclas de harina con mucílago de nopal al 10% p/p.

Mezcla de harinas (%)	Quinoa + Lenteja	Quinoa + Haba	Quinoa + Frijol	Avena + Lenteja	Amaranto + Lenteja
2	 4735C	 469C	 4635C	 4715C	 730U
5	 4715C	 731U	 7517U	 725U	 731U
10	 4635C	 725U	 731U	 4635C	 732U

Continuación Tabla 10. Prueba Pantone® para suspensiones alimenticias de diferentes mezclas de harina con mucílago de nopal al 10% p/p.

15	 7517U	 477C	 469C	 731U	 469U
20	 4696C	 732U	 732U	 730U	 469C

Mezcla de harinas 2%: mezcla al 2% de cereal (1%) y leguminosa (1%) en leche descremada.

Mezcla de harinas 5%: mezcla al 5% de cereal (2.5%) y leguminosa (2.5%) en leche descremada.

Mezcla de harinas 10%: mezcla al 5% de cereal (5%) y leguminosa (5%) en leche descremada.

Mezcla de harinas 15%: mezcla al 5% de cereal (7.5%) y leguminosa (7.5%) en leche descremada.

Mezcla de harinas 20%: mezcla al 5% de cereal (10%) y leguminosa (10%) en leche descremada.

Como se esperaba, la adición del mucílago de nopal como agente dispersante influyó de gran manera en la coloración, debido a los factores anteriormente mencionados. La adición de harinas sólo volvió más intenso el color de las suspensiones alimenticias, esto debido a la naturaleza de cada una de las harinas; por ejemplo, la harina de lenteja que es café, intensificó el color proporcionado por el mucílago reconstituido, o bien, debido a que en el proceso de secado y/o en el tostado de las harinas, éstas pudieron adquirir ciertos tonos oscuros.

CONCLUSIONES

- Se logró desarrollar un método de extracción y secado del mucílago de nopal de *Opuntia ficus indica* libre de solventes, de alto rendimiento (1.6%) con respecto a los métodos que utilizan solventes, con consumo energético de 184.61 kW.
- El análisis químico proximal llevado a cabo para el mucílago en polvo, indica que su uso es factible para la aplicación deseada: suspensiones alimenticias para pacientes bariátricos.
- Los azúcares encontrados en el mucílago de nopal analizado, son la arabinosa y la galactosa.
- El comportamiento reológico del mucílago reconstituido al 10% p/p tanto en agua como en jugo de manzana no presentan diferencia significativa con respecto al comportamiento reológico del mucílago fresco, las concentraciones de mucílago al 5 y 20% p/p sí la presentan.
- Las pruebas de estabilidad indican que el mucílago al 10% p/p funciona como agente dispersante de las mezclas de harinas de origen vegetal propuestas en el presente trabajo. La presencia de mucílago disminuye el porcentaje de sedimentación entre 20 y 38% en las suspensiones alimenticias.
- La reología de las suspensiones alimenticias es no newtoniana, de comportamiento pseudoplástico o reofluidizante que conserva un carácter de gel.
- Las mezclas más convenientes a utilizar en la fase post-quirúrgica de líquidos generales, son: quinoa y lenteja, quinoa y haba y, avena y lenteja a una concentración de 10% p/p en presencia de mucílago al 10% p/p.
- Los procesos de oxidación del mucílago son críticos para el color final de las suspensiones alimenticias.

PERSPECTIVAS

- Sustituir el prensado manual por uno mecánico en el proceso de extracción del mucílago y corroborar si esto impacta en el rendimiento total de la extracción.
- Realizar la caracterización química de la composición de azúcares del mucílago mediante un método cuantitativo con una sensibilidad mayor a la de la cromatografía en capa fina realizada, por ejemplo, mediante HPLC.
- Llevar a cabo tratamientos previos a la extracción del mucílago para evitar el desarrollo de color en el mucílago en polvo, por ejemplo, utilizar como encapsulante maltodextrinas para evitar un posible daño térmico a las partículas de mucílago, o bien, llevar a cabo un escaldado o sumergir el nopal en una solución de ácido cítrico para inactivar la enzimas encargadas del pardeamiento de los polifenoles presentes.
- Desarrollar mezclas con diferentes harinas vegetales para probar una gama más amplia de alimentos a utilizar en las suspensiones alimenticias.
- Hacer pruebas con otro tipo de hidrocoloides por sí solos o en combinación con el mucílago de nopal para evaluar si se incrementa el efecto dispersante del mismo o bien, si se mejora la dispersión de las harinas.

REFERENCIAS

- Abraján-Villaseñor, M. A., (2008). Efecto del Método de Extracción en las Características Químicas y Físicas del Mucílago del Nopal (*Opuntia ficus-indica*) y Estudio de su Aplicación como Recubrimiento Comestible. Tesis Doctoral, Valencia, España.
- Aguilera, Y., (2009). Harinas de leguminosas deshidratadas: Caracterización nutricional y valoración de sus propiedades tecno-funcionales. Tesis para obtener el grado de Doctor. Universidad Autónoma de Madrid, Facultad de Ciencias. Madrid, España
- Alger, M. S. (1997) *Polymer Science dictionary*. Springer Science and Business Media.
- Anandha Rao, M. (2013). *Rheology of Fluid, Semisolid, and Solid Foods. Principles and Applications*. 3rd ed. Washington: Springer.
- Association of Official Analytical Chemists, (1990). Official Methods of Analysis (Volume I). 15th ed. Virginia: Association of Official Analytical Chemists, Inc.
- Barnes, H. A. (2000). *A Handbook of Elementary Rheology*. Institute of Non-Newtonian Fluid Mechanics University of Wales. England: Cambrian Printers. ISBN 0-9538032-0-1.
- Barrientos, P.F. (1983). Nopal y agaves como recurso de zonas áridas y semiáridas de México. Centro de genética del Colegio de Posgraduados, Chapingo, México.
- Blanco, M.G. (1966) El nopal como forraje para el ganado en las zonas áridas y aprovechamiento de la tuna. *El Campo*, México.
- Cárdenas, A., Higuera-Ciapara, I., Goycoolea, F. (1997). Rheology and aggregation of cactus (*Opuntia ficus indica*) mucilage in solution. *Journal of the Professional Association for Cactus Development*, 2, 152-157.
- Cárdenas, A., Goycoolea F. M., Rinaudo, M. (2008). On the gelling behaviour of 'nopal' (*Opuntia ficus indica*) low methoxyl pectin. *Carbohydrate polymers*, 73: 212-222.
- Cervantes-Martínez, C.V. Medina-Torres, L. González-Laredo, R. F., Calderas, F., Sánchez-Olivares, G., Herrera-Valencia, E.E., Gallegos Infante, J. A., Rocha-Guzmán, N.E. y Rodríguez-Ramírez, J. (2014) Study of spray drying of the Aloe vera mucilage as a function of its rheological properties. *LWT-Food Science and Technology*, 55: 426-435.

- De la Rosa, J.P. y Santana, D. (2001). El nopal. Usos, manejo agronómico y costes de producción en México. CONAZA-UACH-CIESTAAM. Texcoco, pp.: 23-35.
- Espino-Díaz, M. Ornelas-Paz, J.J., Martínez-Tellez, M.A., Santillán, C. Barbosa-Cánovas, G.V., Zamudio-Flores, P.B. y Olivas, G. I. (2010). Development and characterization of edible films base on mucilage of *Opuntia ficus-indica*. *Journal of Food Science*, 75 (6): E347-E352.
- Espinosa, S. (2002). Estudios de algunas características físicas de hidrocoloides provenientes de semilla de algarrobo (*Prosopis chilensis* (Mol.) Stuntz) y de cladodios de nopal (*Opuntia ficus-indica* (L.) Mill). Tesis para optar al grado de Magíster en Ciencias Agropecuarias. Facultad de Ciencias Agronómicas y Forestales. Universidad de Chile. Santiago.
- FAO/OMS (1995). *CODEX ALIMENTARIUS Normas Internacionales de los Alimentos*.
- Flores-Valdez, E.A., Luna, E. J. y Ramírez, M. P. (1995). Mercado Mundial del nopalito, Universidad Autónoma de Chapingo (UACH), pp.: 1-176.
- Frati, A.C., Jiménez, E. y Ariza, C.R. (1990). Hypoglycemic effect of *Opuntia ficus-indica* in non insulinn-dependent diabetes mellitus patients. *Phytotherapy Research*, PTR, 4: 195-197.
- Frati-Munari, A., Vera Lastras, O. y Ariza-Andraca, C.R. (1992). Evaluación de cápsulas de nopal en Diabetes Mellitus. *Gaceta Médica de México*, 128: 431-436.
- García-Favela, B. (2013) Mucílago de nopal (*Opuntia spp*) sobre propiedades micromorfológicas y estructurales del suelo en trigo. Colegio de Posgraduados, Tesis de Doctorado, Texcoco, Estado de México, México.
- Garti, N. (1999). Hydrocolloids as emulsifying agents for oilin-water emulsions. *Journal of Dispertion Sciense and Technology*, 20: 327-355.
- Ginestra, G., Parker, L.M., Bennett, N.R., Robertson, J., Mandalari, G., Narbad, A., Lo Curto, B.R., Bisignano, G., Faulds, B.C. And Waldron,W.K. (2009). Anatomical, chemical, and biochemical characterization of cladodes from prickly pear [*Opuntia ficus-indica* (L.) Mill]. *J. Agric. Food Chem.* 57, 10323–10330.

- Granados, D. y Castañeda, A.D. (2000) El Nopal. Historia, Fisiología, Genética e Importancia Frutícola. Editorial Trillas. México.
- Guevara-Ayala, M.L. (2014). Optimización de la extracción de mucilago de nopal (*Opuntia spp.*) mediante la aplicación de ultrasonido de alta potencia. Tesis. Facultad de Ciencias Químicas, Universidad Autónoma de Chihuahua, México.
- León-Martínez, F. M., Rodríguez-Ramírez, J., Medina-Torres, L. L., Méndez Lagunas, L. L., Bernad-Bernad, M. J. (2011). Effects of drying conditions on the rheological properties of reconstituted mucilage solutions (*Opuntia ficus indica*). *Carbohydr.Polym.* 84(1):439–445.
- López, E. (2000). Utilización de productos naturales en la clarificación de aguas para consumo humano. Tesis de Maestría, Facultad de Ingeniería Química. ISPJAE. Universidad de la Habana. Cuba.
- Majdoub, H., Roudesli, S. y Deratani, A. (2001) Polysaccharides from prickly pear peel and nopals of *Opuntia ficus-indica*: extraction, characterization and polyelectrolyte behavior. *Polymer International*, 50 (5): 552-560.
- Majdoub, H., Picton, L. And Le Cerf, D. (2010). Water retention capacity of polysaccharides from prickly pear nopals of *Opuntia ficus indica* and *Opuntia littoralis*: Physical–chemical approach. *J. Polym. Environ.* 18, 451–458.
- Matsuhira, B., Lillo, L. E., Sáenz, C., Urzúa, C.C., Zárate, O. (2006). Chemical characterization of the mucilage from fruits of *Opuntia ficus indica*. *Carbohydrate Polymers*, 63, 263–267.
- McGarvie, D. y Parolis, H. (1981). Methylation analysis of the mucilage of *Opuntia ficus-indica*. *Carbohydrate Research*, 88 (2): 305-314.
- Medina-Torres, L., Brito-De la Fuente, E., Torrestiana-Sanchez, B., Katthain, R., (2000). Rheological properties of the mucilage gum (*Opuntia ficus indica*). *Food Hydrocolloids*, 14 (5), 417-424.
- Medina-Torres, L., García-Cruz, E.E., Calderas, F., González-Laredo, R.F., Sánchez-Olivares, G., Gallegos-Infante, J.A., Rocha-Guzmán, N.E. Y Rodríguez-Ramírez, J. (2013). Microencapsulation by spray drying of gallic acid with nopal mucilage (*Opuntia ficus-indica*). *LWT – Food Sci. Technol.* 50, 642–650.

- Muñoz, L.A., Cobos, A., Díaz, O. y Aguilera, J. M. (2012) Chia sedes: microestructura, mucilago extraction and hydration. *Journal of Food Engineering*, 108 (1): 216 -224.
- Nobel, P.S., Cavelier, J. y Andrade J.L. (1992). Mucilage in cacti: its apoplastic capacitance, associated solutes, and influence on tissue water relations. *Journal of Experimental Botany*, 43: 641-648.
- Reyes-Agüero, J.A., Aguirre-Rivera, J.R. Carlin-Castelán, F. y González-Durán, A. (2009). Catálogo de las principales variantes silvestres y cultivadas de *Opuntia* en la Antiplanicie Meridional de México, UASLP, SAGARPA y CONACyT, San Luis Potosí, México.
- Ribeiro, E.M.O., Silva, N.H., Lima, F.J.L., Brito, J.Z. Y Silva, M.P.C. (2010). Study of carbohydrates present in the cladodes of *Opuntia ficus-indica* (fodder palm), according to age and season. *Ciencia Tecnol. Alim.* 30, 933–939.
- Rivera-Corona, J. L., Rodríguez-González, F., Rendón-Villalobos, R. García-Hernández, E. y Solorza-Feria, J. (2014) Thermal, structural and rheological properties of sorghum starch with cactus mucilage addition. *LWT-Food Science and Technology*, 59 (2): 806 -812.
- Rodríguez-González, S., Martínez-Flores, H.E., Chávez-Moreno, C.K., Macías-Rodríguez, L.I., Zavala-Mendoza, E. Garnica-Romo, M.G., y Chacón-García, L. (2014) Extraction and Characterization of Mucilage from Wild Species of *Opuntia*. *Journal of Food Process Engineering*, 37: 285–292.
- Ruales, J. y Zumba, J. (1998). Cuantificación y caracterización de fibra dietética en frutas y hortalizas ecuatorianas. pp. 55-59. In: M. Lajolo y E. Wenzel de Menezes, eds. Temas en Tecnología de Alimentos. Vol. 2. Fibra Dietética. F. CYTED. Dirección de Publicaciones y Materiales Educativos, Instituto Politécnico Nacional. México.
- Rubio Herrera, M.A. (2005). *Manual de Obesidad Mórbida*. Madrid: Médica Panamericana.
- Saag, L.M. K., Sanderson, G. R., Moyna, P. y Ramos, G. (1975). *Cactaceae* mucilage composition. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 26 (7): 993-1000.
- Sáenz, C., Sepúlveda, E., (1993). Alternativas de industrialización de la tuna (*Opuntia ficus indica*). *Alimentos*, 18 (3), 29–32.

- Sáenz, C., Sepúlveda, E., Matsuhiro B. (2004). *Opuntia* spp mucilage's: A functional component with industrial perspectives. *Journal of Arid Environments*, 57, 275-290.
- SAGARPA [En línea] (2007). Información de las Delegaciones, distritos y Cader's, México. Disponible en: <http://www.siap.gob.mx/>. [Último acceso 26 de mayo de 2016].
- Schirra, M. (1998) Storage trials of cactus pear (*Opuntia ficus-indica* Miller L.) fruit with non-convetional methods. International Symposium Proceedings: Cactus pear and nopalitos processing and uses. Office of Arid Lands Studies, Chile.
- Sepúlveda, E., Sáenz, C., Aliaga, E., Aceituno C. (2007). Extraction and characterization of mucilage in *Opuntia* spp. *Journal of Arid Environments*, 68, 534-545.
- Serna-Saldívar, S. (1996). *Química, Almacenamiento e Industrialización de los Cereales*. Monterrey: AGT Editor, S.A.
- SIAP/SAGARPA [En línea] (2015) Márgenes de Comercialización de Hortalizas. Nopalitos. Disponible en: https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/69403/Margenes_Comer_Nopalitos_Mayo2015.pdf. [Último acceso 20 de agosto de 2017).
- Singer, F. A. W., Taha, F. S., Mohamed, S. S. Gibriel, A. y El-Nawawy, M., (2011). Preparation of mucilage/protein products from flaxseed. *American Journal of Food Technology*, 6 (4): 260-278.
- Stintzing, F.C. y Carle, R. (2005). Cactus stems (*Opuntia* spp.): a review on their chemistry, technology, and uses. *Molecular, Nutrition and Food Reserch*, 49: 175-194.
- Ting, I. P. (1997) Carbohydrate metabolism in Cacti: Gums and Mucilage. *Journal PACD*, 2: 7-12.
- Trachtenberg, S. And Mayer, M.A. (1981). Composition and properties of *Opuntia ficus-indica* mucilage. *Phytochemistry* 20: 2665-2668.
- Trachtenberg, S. y Mayer, A.M. (1982). Mucilage cells, calcium oxalate crystals and soluble calcium in *Opuntia ficus-indica*. *Botany*, 50: 549-557.
- USDA National Nutrient Database for Standard Reference. [En línea] (Actualizado al 18 de marzo de 2016). Disponible en: <https://ndb.nal.usda.gov/ndb/foods?qlookup=&fgcd=&manu=&SY>

[NCHRONIZER_TOKEN=d8492b9d-461b-4c87-8a37-99a2e3824d51&SYNCHRONIZER_URI=%2Fndb%2Ffoods](#) [Último acceso 26 de mayo de 2017].

- Villegas, C. y De Gante, M. 1997. Los Nopales (*Opuntia spp.*) recursos y símbolos tradicionales en México. pp. 271-273. In. Memorias. VII Congreso Nacional y V Internacional sobre Conocimiento y Aprovechamiento del Nopal. Universidad Autónoma de Nuevo León, Monterrey, México.
- Zambrano, M. L., Hernández, A. D. y Gallardo, Y. (1998). Características fisicoquímicas del nopal. P. 29-42. In. M. Lajolo y E. Wenzel de Menezes, eds. Temas en Tecnología de Alimentos. Vol. 2. Fibra Dietética. F. CYTED. Dirección de Publicaciones y Materiales Educativos, Instituto Politécnico Nacional, México.

ANEXOS

Anexo 1. Curvas de viscosidad en corte de suspensiones alimenticias.

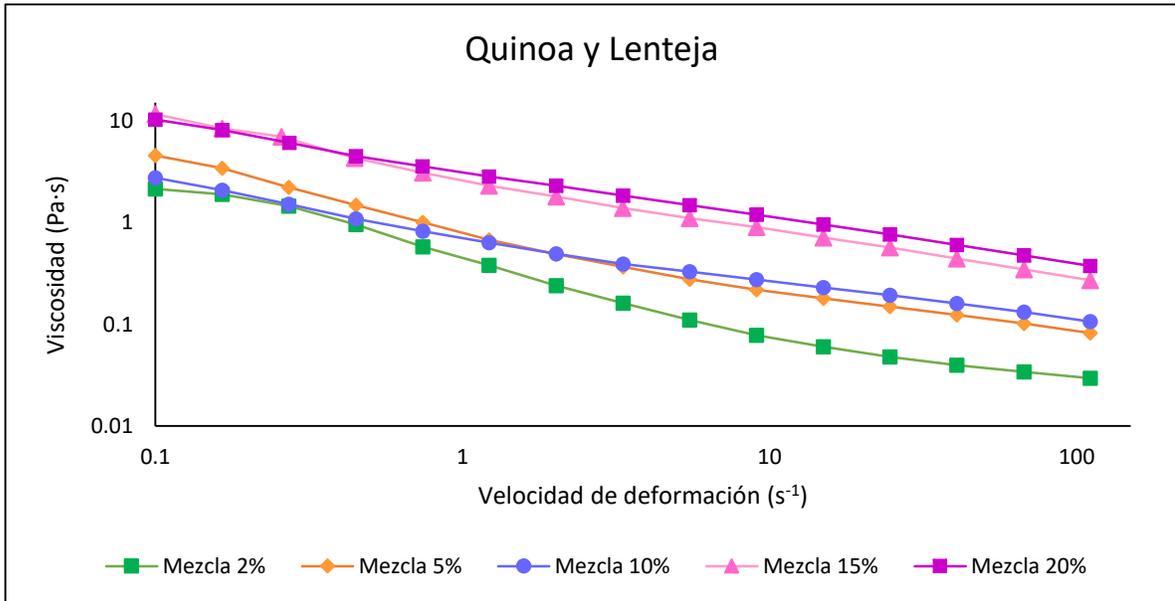


Figura 20. Curva de viscosidad en corte de suspensión de quinoa y lenteja con mucílago al 10% p/p.

Mezcla 2%: mezcla al 2% de cereal (1%) y leguminosa (1%) en leche descremada.

Mezcla 5%: mezcla al 5% de cereal (2.5%) y leguminosa (2.5%) en leche descremada.

Mezcla 10%: mezcla al 5% de cereal (5%) y leguminosa (5%) en leche descremada.

Mezcla 15%: mezcla al 5% de cereal (7.5%) y leguminosa (7.5%) en leche descremada.

Mezcla 20%: mezcla al 5% de cereal (10%) y leguminosa (10%) en leche descremada.

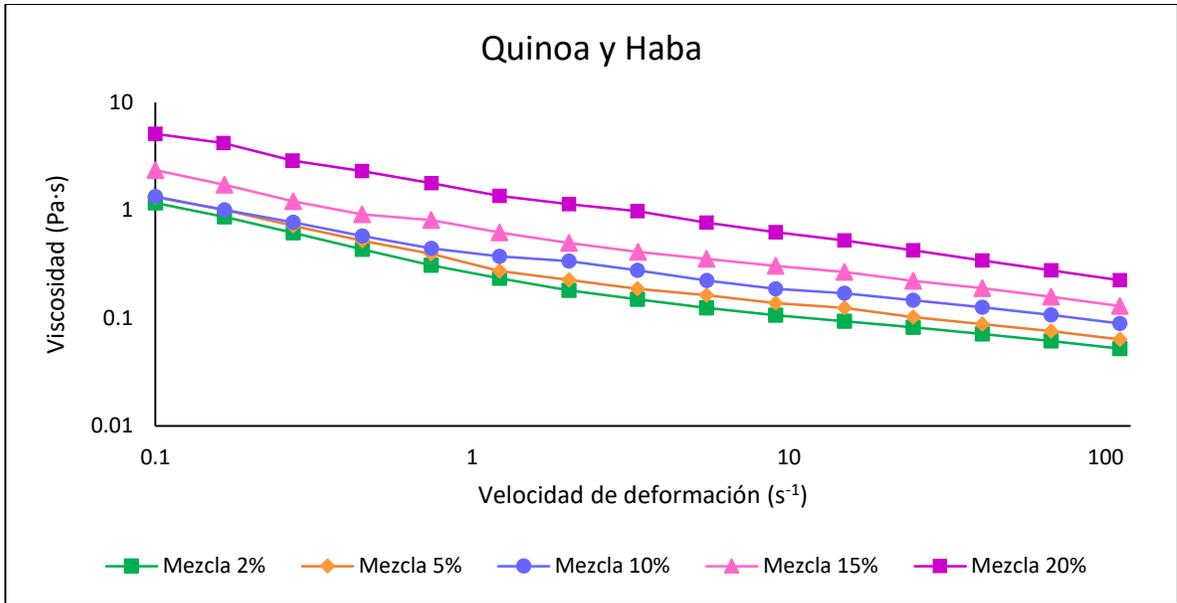


Figura 21. Curva de viscosidad en corte de suspensión de quinoa y haba con mucílago al 10% p/p.

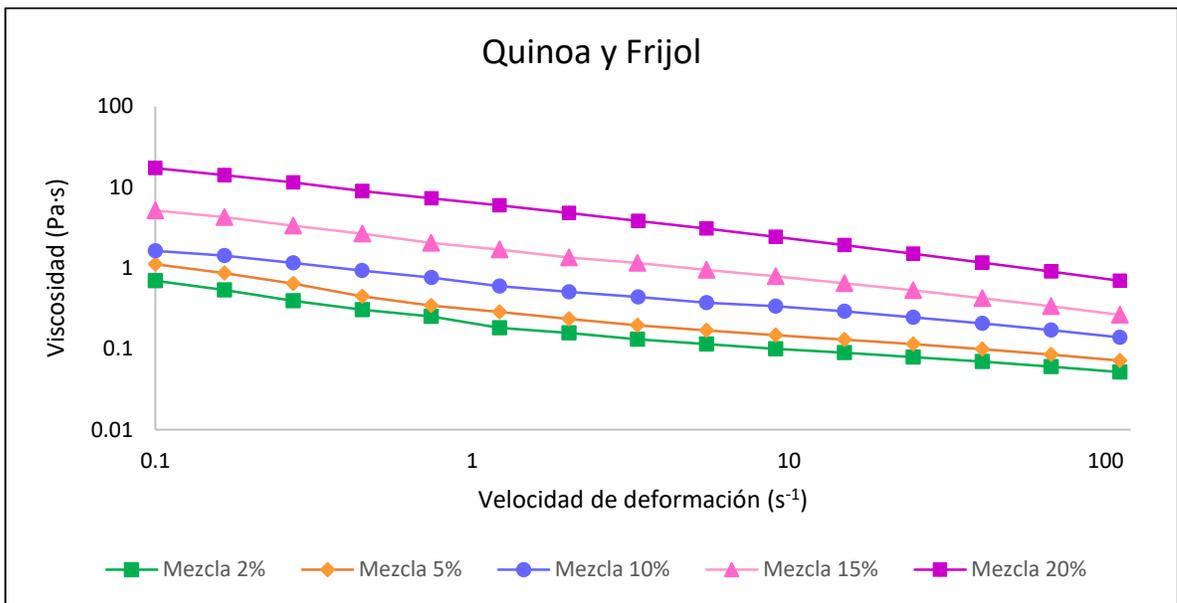


Figura 22. Curva de viscosidad en corte de suspensión de quinoa y frijol con mucílago al 10% p/p.

Anexo 2. Módulos dinámicos en función de la deformación.

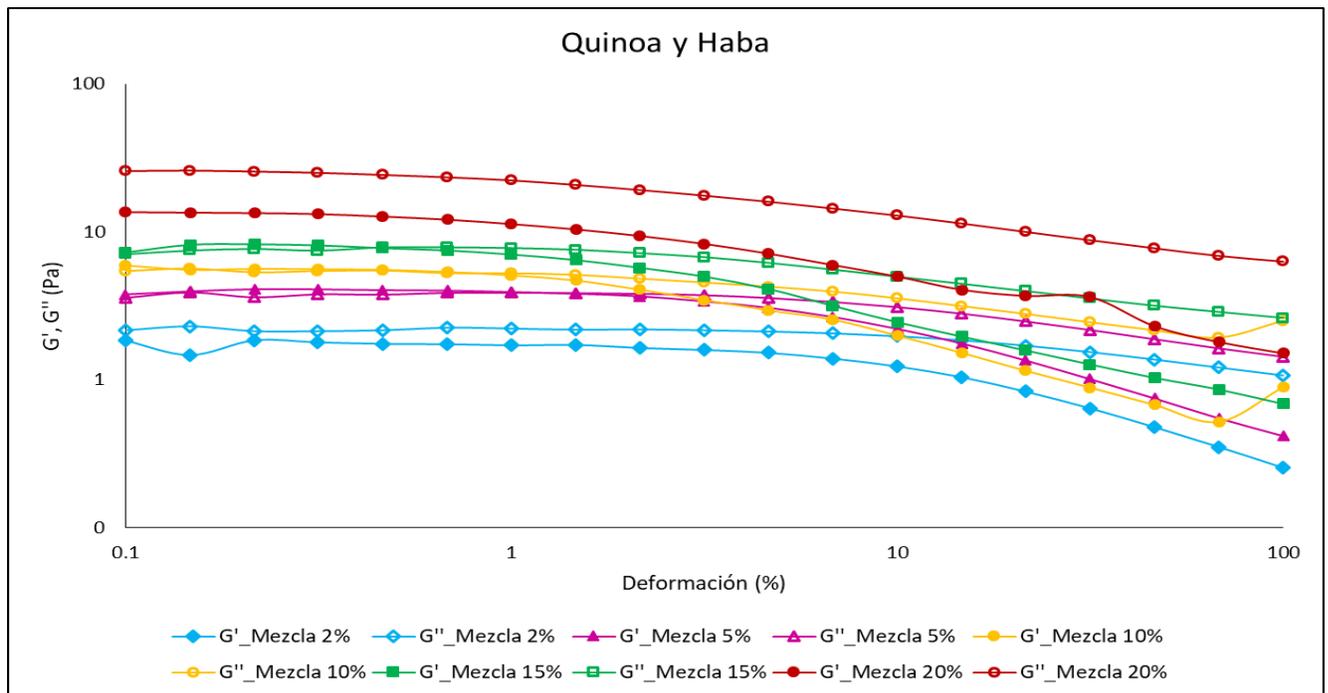


Figura 23. Módulos dinámicos de almacenamiento (G') y pérdida (G'') en función del porcentaje de deformación a frecuencia de 1Hz, para diferentes concentraciones de la mezcla quinoa-haba y mucílago de nopal.

G' _Mezcla 2%: módulo elástico o de almacenamiento de la mezcla al 2% de cereal (1%) y leguminosa (1%) en leche.

G'' _Mezcla 2%: módulo viscoso o de pérdida de la mezcla al 2% de cereal (1%) y leguminosa (1%) en leche.

G' _Mezcla 5%: módulo elástico o de almacenamiento de la mezcla al 5% de cereal (2.5%) y leguminosa (2.5%) en leche.

G'' _Mezcla 5%: módulo viscoso o de pérdida de la mezcla al 5% de cereal (2.5%) y leguminosa (2.5%) en leche.

G' _Mezcla 10%: módulo elástico o de almacenamiento de la mezcla al 10% de cereal (5%) y leguminosa (5%) en leche.

G'' _Mezcla 10%: módulo viscoso o de pérdida de la mezcla al 10% de cereal (5%) y leguminosa (5%) en leche.

G' _Mezcla 15%: módulo elástico o de almacenamiento de la mezcla al 15% de cereal (7.5%) y leguminosa (7.5%) en leche.

G'' _Mezcla 15%: módulo viscoso o de pérdida de la mezcla al 15% de cereal (7.5%) y leguminosa (7.5%) en leche.

G' _Mezcla 20%: módulo elástico o de almacenamiento de la mezcla al 20% de cereal (10%) y leguminosa (10%) en leche.

G'' _Mezcla 20%: módulo viscoso o de pérdida de la mezcla al 20% de cereal (10%) y leguminosa (10%) en leche.

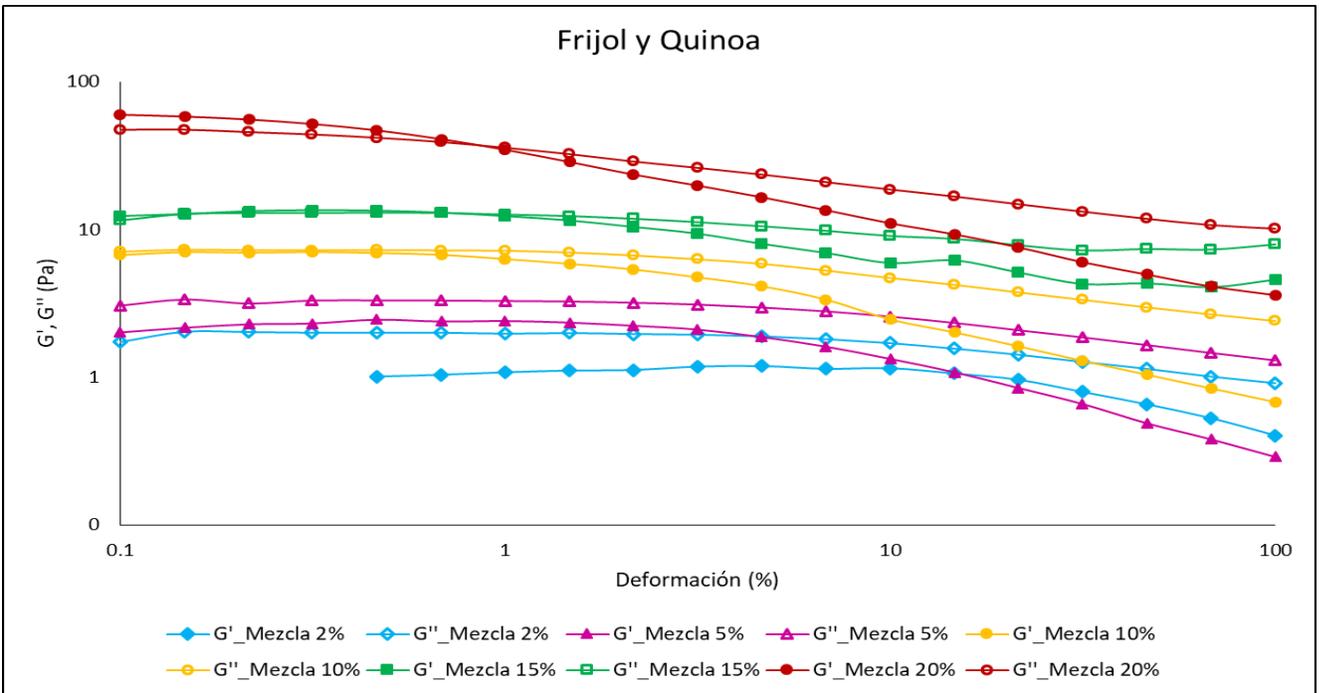


Figura 24. Módulos dinámicos de almacenamiento (G') y pérdida (G'') en función del porcentaje de deformación a frecuencia de 1Hz, para diferentes concentraciones de la mezcla quinoa-frijol y mucílago de nopal.

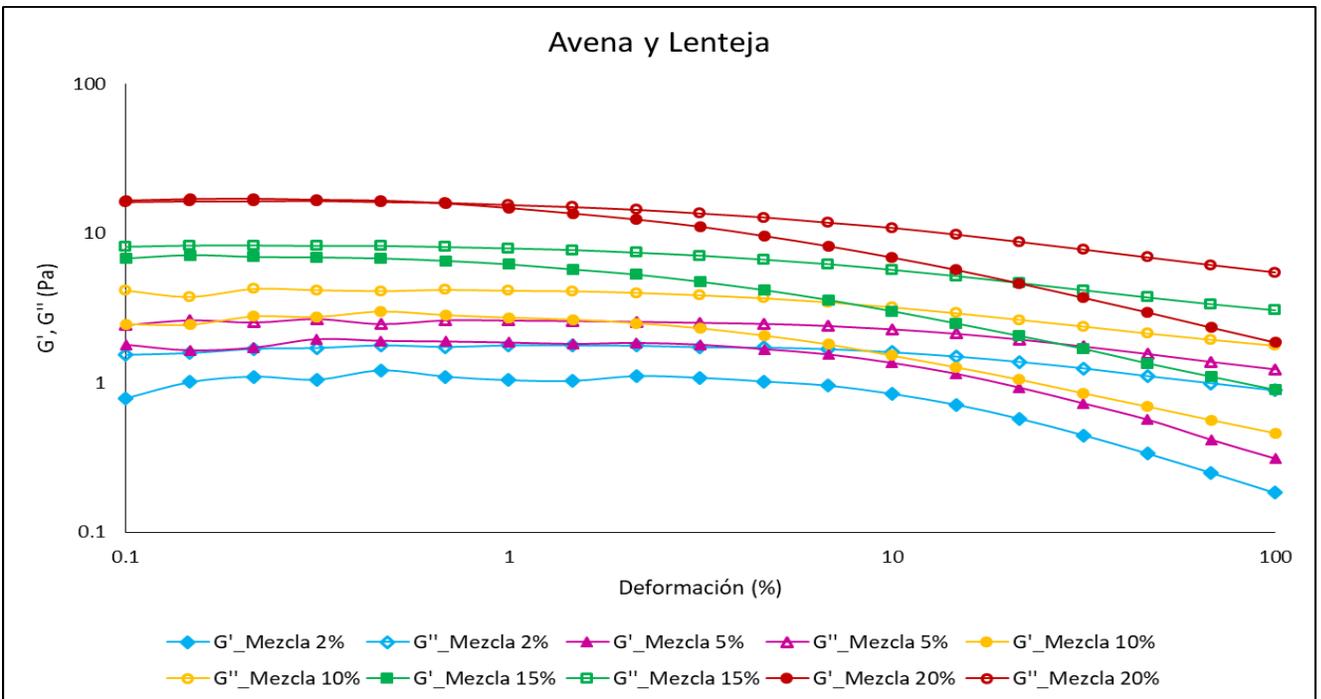


Figura 25. Módulos dinámicos de almacenamiento (G') y pérdida (G'') en función del porcentaje de deformación a frecuencia de 1Hz, para diferentes concentraciones de la mezcla avena-lenteja y mucílago de nopal.

Anexo 3. Extenso publicado en memorias del Congreso “Latin Food 2016”.

Mucilage of *Opuntia ficus indica* Production, Characterization and Application as a Dispersing Agent of Vegetable Protein Suspensions

III423

Salazar-Ramírez, P.P.¹, Sanvicente-Amaya, S.M.¹, Barajas-Montiel, M.A.¹, Blancas-Cabrera, A.², Reyes-Ocampo, I.¹, Durán, J.C.¹ and Córdova-Aguilar, M.S.^{1*}

¹Centro de Ciencias Aplicadas y Desarrollo Tecnológico, Universidad Nacional Autónoma de México, Circuito Exterior, Ciudad Universitaria, 04510 Ciudad de México, Apdo. Postal 70-186.

²Unidad de Bioprocesos, Departamento de Biología Molecular y Biotecnología, Instituto de Investigaciones Biomédicas, Circuito Mario de la Cueva, Ciudad Universitaria, Universidad Nacional Autónoma de México, 04510 Ciudad de México, Apdo. Postal 70228.

*Corresponding author.

e-mail: marisol.cordova@ccadet.unam.mx; teléfono: +52 (55) 56.22.86.02, ext. 1312. Fax: +52 (55) 56.22.86.20

1. Introduction

The mucilage obtained from *Opuntia ficus indica* is a high molecular weight heterogeneous polysaccharide that in view of its chemical composition may be used as dispersing agent in suspensions, since it has been found that this hydrocolloid modifies its viscous properties (1). These qualities make this hydrocolloid attractive for the formulation of certain alimentary products. However, as at the present time, it is obtained by precipitation with solvents, such as acetone or alcohols, with low yields and high production cost, this kind of mucilage may not be suitable for foodstuff processing (2). In this work, a solvent-free mechanical extraction method has been applied for the extraction of *Opuntia ficus indica* mucilage, in order to improve the yield, obtain a generally recognized as safe (GRAS) mucilage that would be used as dispersing agent in hypoenergetic suspensions of vegetable protein for patients with bariatric surgery in the second stage after the intervention (general liquids stage). The experimental strategy consisted of developing a high performance extraction method followed by chemical and rheological characterization of mucilage obtained and the evaluation as dispersing agent.

2. Materials and methods

2.1 Mucilage extraction and dry procedures

Fresh cladodes of *Opuntia ficus-indica* from Milpa Alta, Mexico, were washed with water, chopped into small slices and milled in a blender for 5 min. The cactus chaff was mechanically pressed and the juice obtained was filtered in several stages and refrigerated at 4°C in order to keep it fresh. It was filtered by gravity, simple vacuum filtering and with *Kieselguhr* filter aid. Finally, the mucilage solution was dried by a Niro Atomizer[®] spray dryer to obtain mucilage powder. The process flow diagram is illustrated in *Figure 1*.

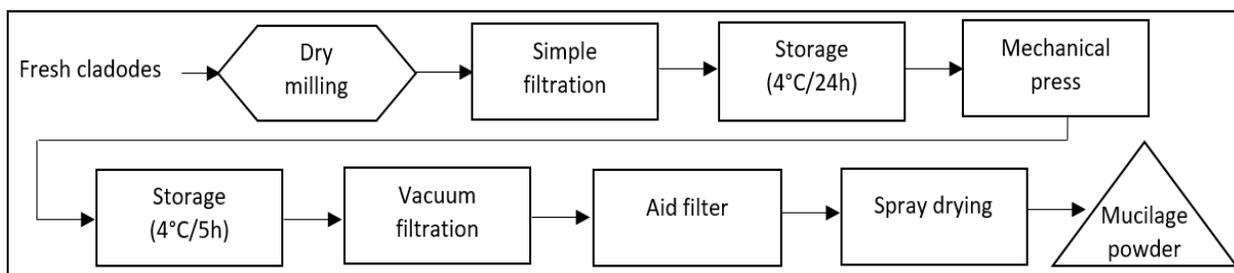


Figure 1. Flow diagram of *Opuntia ficus indica* mucilage production.

2.2 Chemical characterization

The proximate chemical analysis of the mucilage was performed according to the AOAC Method (3), while the chemical characterization was carried out by thin layer chromatography, doing some changes in regard to the reference such as the standard solution concentrations and the sample preparation instead of which it was used the hidrolized sample (4). Thin layer chromatography was performed after an acid hydrolysis with sulfuric acid 6% v/v, heated at 80°C and reflux. Chemical characterization was performed to elucidate the real composition of the mucilage polysaccharide. The stationary phase was glass plate with a thin layer of silica gel (Macherey-Nagel GmbH & Co. KG DC-Fertgplatten SIL G-25). Mucilage polysaccharide hidrolized samples of 50 µl (pH 4.0-5.0) were applied to the thin-layer chromatography plate with standardized micropipettes. The mobile phase was a 2:1:1 mixture of 1-butanol: acetic acid: distilled water and as developer: ethanol: distilled water: sulfuric acid ratio 20: 20: 1 was used and also the chromatography plate was heated at 100°C. Standard solutions of arabinose, galactose, rhamnose, xylose and galacturonic acid were prepared with a concentration of 1000 ppm.

2.3 Rheological measurements

Mucilage powder was suspended in water, apple juice and skim milk at 5, 10 and 20% (w/w). Such liquid matrixes were selected on the basis of the requirements of the early postsurgical scheme of bariatric patients, which indicates that at the second stage after surgery, it is imperative to consume only liquids such as water, skim milk or fruit juices. Steady-state viscous flow tests were carried out in a rotational rheometer (MCR101, Anton Paar Physica®, Austria) equipped with a cone and plate geometry (50 mm diameter, 0.1 mm gap). After obtaining the flow curves for each case, it was observed that they fitted into the power law model. All measurements were carried out at 25 °C and by triplicate. The statistical analysis was performed with an one-way analyses of variance (ANOVA, $\alpha=0.05$) using the software Graph Pad Prism®, version 6.07. The analysis looked for wether or not there were significant differences of the suspensions of mucilage powder with respect to the rheological properties of the reference fluids such as Thin and Nectar type, Barium Sulfate Suspensions (BSS) Varibar® from E-Z-EM, Canada Inc. (Lake Success, NY).

2.4 Sedimentation tests

Sedimentation tests were used to demonstrate that the mucilage could be used as dispersing agent in vegetal protein intakes of people who are nutritionally compromised as the postsurgical bariatric patients. The sedimentation test was composed by qualitative and quantitative evaluations. Four flour mixtures of cereals and legumes were tested: oats and lentils, broad beans and quinoa, lentils and quinoa, beans and quinoa (each one at 1% w/w).

It was selected 10% w/w of mucilage resuspended in skim milk as sample and skim milk without mucilage as control. Using these concentrations, energy and nutritional requirements of bariatric patients were covered consuming intakes of 50 mL every 30 minutes throughout one day. Milk is a complex food matrix which color difficults the observation of sedimentation, therefore an image analysis technique was implement to evaluate the sedimentation of flour mixtures. The qualitative evaluation consisted of stirring suspensions for 1 min, once stopped agitation, a video was recorded using a camera Logitech HD Pro[®] Webcam C920 with a duration of 30 min; finally the initial and last images were compared. In the quantitative test, after homogenizing for 1 min, the suspensions were centrifuged (BHG ROTO-UNI[®]) at 500 rpm, one minute and the percentage of sedimented flour (dried basis) was determined to evaluate the stability of the suspensions.

3. Results and Discussion

Extraction yields of mucilage was 98.90 % with reference to fresh cladodes after the dry milling step, whereas 85.90 % after mechanical press and 70.01%, after vacuum and filter aid steps. Extraction yield of mucilage after spry drying process was 1.60 % (measured on wet basis). This value that is significantly higher, than those reported for extraction with organic solvents: 0.07% (5), 1.0-1.2% (6) and 1.48 % (2).

The proximate analysis of the mucilage reports that the major part of the composition are carbohydrates (62.68 %) and ashes (25.93%), while low content of lipids (0.71%) and crude protein (7.65%) were also found. The ash content suggests a high mineral quantity, making feasible to use mucilage in formulations for bariatric patients, which require coverage deficiencies of selenium, copper, zinc and calcium. In the light of this data, it is worth to perform a more detailed analysis to identify and quantify the minerals in the mucilage samples. It is also important to consider the contents of lipids, crude protein and carbohydrates of the mucilage in the energy and nutritional formulations in order to accomplish the requirements of the hypocaloric bariatric diet which indicates the importance of the consumption of 600 kcal at most daily and also sets the percentage in which the macronutrients must cover such amount of energy (20-30% from lipids, 40-50% from carbohydrates of which it must be 5% simple sugars at most).

The thin layer chromatography showed that the main components of the mucilage polysaccharide extracted from *Opuntia ficus indica* of Milpa Alta, Mexico (*Figure 2*) are arabinose (R_f : 0.51) and galactose (R_f : 0.48). That results are consistent with those reported in the literature for the mucilage from different species of *Opuntia*, though different authors also reported the presence of other sugars such as xylose, rhamnose and also galacturonic acid (2, 7).



Figure 2. Thin layer chromatography plate with mixture of simple sugar standards and two samples of mucilage (from left to right): a) arabinose, xylose, mucilage 1 and mucilage 2; b) galacturonic acid, galactose, rhamnose, all standards.

The viscosity curves of all the mucilage powder suspensions showed shear-thinning behavior in all cases. While the concentration of suspended mucilage increased, viscosity also increased. This result is consistent with that reported before (8). The ANOVA showed significant differences of the mucilage suspensions in water and apple juice with respect to the rheological properties of the reference fluids (Varibar®), but mucilage powder suspended at a concentration of 10% w/w in skim milk had a similar behavior to Thin BSS (Figure 3). Therefore, this concentration was selected for the sedimentation tests.

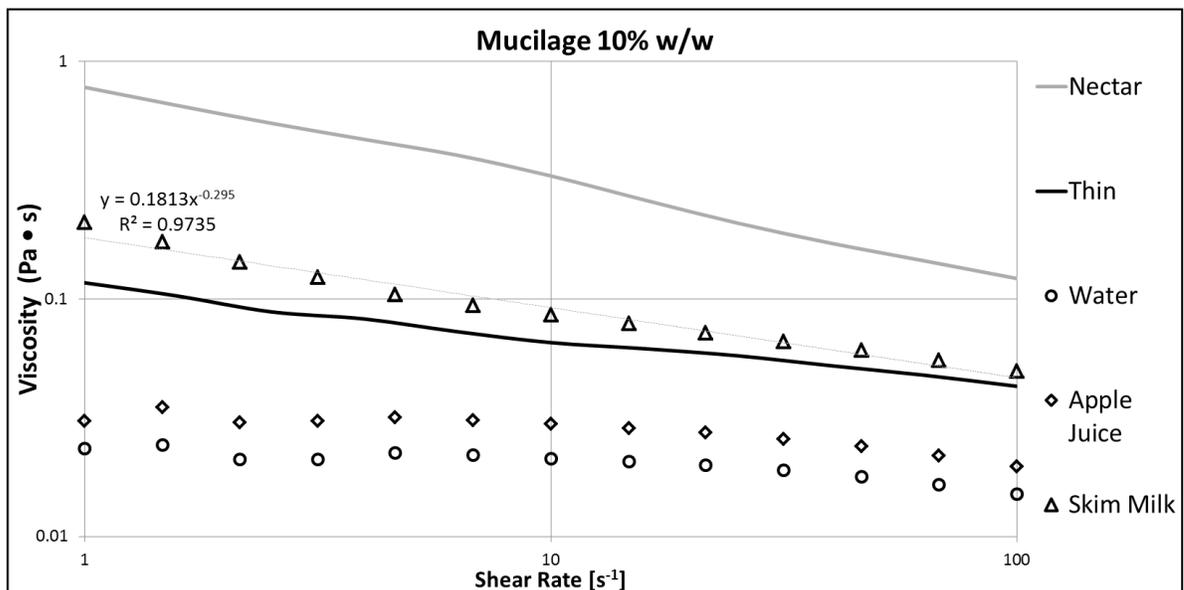


Figure 3. Steady-state viscous curves for mucilage powder suspended in water, apple juice and skim milk at 10% (w/w) compared with BSS Thin and Nectar type.

The dispersing capability of the mucilage was evaluated in the sedimentation tests. It was observed that after stopping agitation (Figure 4), in the control samples (without mucilage),

all the flour mixtures promptly sediment while in the samples with 10% w/w of mucilage no settling was observed, even after 30 min, time in which patients would consume the next intake.

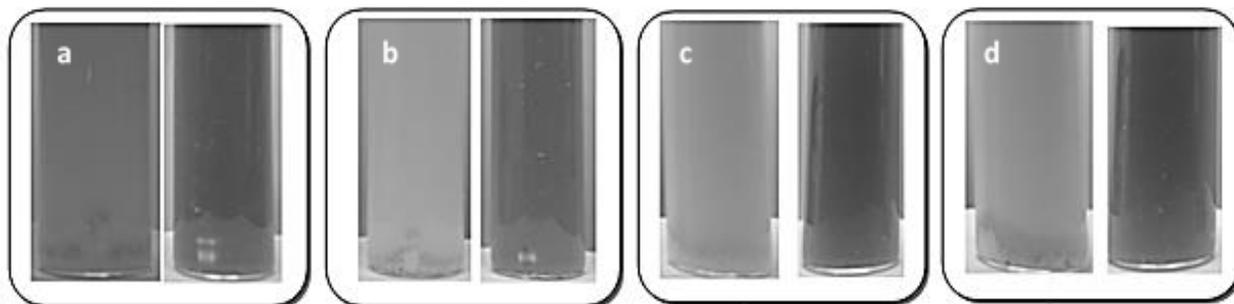


Figure 4. Sedimentation test: left tube corresponds to the control sample, without mucilage and the right one, the sample with mucilage 10% w/w for each image; from left to right: a) oats and lentils, b) broad beans and quinoa, c) lentils and quinoa, d) beans and quinoa.

Besides, the sedimentation test showed that after centrifugation, the sediment percentage were different in each mixture and also that such percentage was higher in control samples than those with mucilage. The latter behavior was expected because in regard to the image analysis, the mucilage of *Opuntia ficus indica* was an efficient dispersing agent of the suspensions, however the stability of them decreases when it is applied a mechanical effort such as the centrifugation. The sediment percentages for control samples were: 1.45% for oats and lentils, 1.39% broad beans and quinoa, 1.49% for lentils and quinoa and beans and quinoa mixture 1.45%; whereas in samples with mucilage: 0.85% oats and lentils mixture 0.73% for broad beans and quinoa, 1.08% lentils and quinoa, and 0.62% for beans and quinoa. These differences may be due to mixtures with the more dense flours have enlarged sedimentation. Therefore the highest sediment percentage was the one of the lentils and quinoa mixture in both cases.

4. Conclusions

A solvent-free mechanical extraction high performance process of mucilage was developed. This mucilage is feasible to be used in food processing as it is a GRAS product. The mucilage powder could be used as a dispersing agent in vegetable protein suspensions at the concentration of 10% w/w using skim milk, since it avoids sedimentation even for dense mixtures.

5. References

1. Sáenz, C., Sepúlveda, E., Matsuhiro B. (2004). *Opuntia spp.* mucilage's: A functional component with industrial perspectives. *Journal of Arid Environments*, 57, 275-290.
2. Sepúlveda, E., Sáenz, C., Aliaga, E., Aceituno C. (2007). Extraction and characterization of mucilage in *Opuntia spp.* *Journal of Arid Environments*, 68, 534-545.

3. Association of Official Analytical Chemists, (1990). *Official Methods of Analysis (Volume I)*. 15th ed. Virginia: Association of Official Analytical Chemists, Inc.
4. Pelayes, C., Garay, P. (2009). Cromatografía en capa fina para carbohidratos. Departamento de Fisicoquímica, Escuela de Química, Facultad de Ciencias Químicas y Farmacia, Universidad de San Carlos de Guatemala.
5. Cárdenas, A., Higuera-Ciapara, I., Goycoolea, F. (1997). Rheology and aggregation of cactus (*Opuntia ficus indica*) mucilage in solution. *Journal of the Professional Association for Cactus Development* 2, 152-157.
6. Sáenz, C., Sepúlveda, E. (1993). Alternativas de industrialización de la tuna (*Opuntia ficus indica*). *Alimentos* 18 (3), 29-32.
7. Rodríguez-González, S., Martínez-Flores, H., Chávez-Moreno, C., Macías-Rodríguez, L., Zavala-Mendoza, E., Garnica-Romo, M., Chacón-García, L., (2014). Extraction and characterization of mucilage from wild species of *Opuntia*. *Journal of Food Process Engineering*. 282-292.
8. Medina-Torres, L., Brito-De la Fuente, E., Torrestiana-Sánchez, B., Katthain, R., (2000). Rheological properties of the mucilage gum (*Opuntia ficus indica*). *Food Hydrocolloids* 14 (5), 417-424.

Anexo 4. Cartel expuesto en Congreso "Latin Food 2016".



Mucilage of *Opuntia ficus indica*

Production, Characterization and Application as a Dispersing Agent of Vegetable Protein Suspensions

Salazar-Ramírez, P.P.¹, Sanvicente-Amaya, S.M.¹, Barajas-Montiel, M.A.¹, Blancas-Cabrera, A.², Reyes-Ocampo, I.¹, Durán, J.C.¹ and Córdova-Aguilar, M.S.^{1*}



¹Centro de Ciencias Aplicadas y Desarrollo Tecnológico, Universidad Nacional Autónoma de México, Circuito Exterior, Ciudad Universitaria, 04510, México, Apdo. Postal 70-186.
²Unidad de Biotecnología, Departamento de Biología Molecular y Biotecnología, Instituto de Investigaciones Biomédicas, Universidad Nacional Autónoma de México, AP 70228, México, D.F., CP 04510, México.
 *Corresponding author. E-mail: marisol.cordova@ccadet.unam.mx; Teléfono: +52 (55) 56.22.86.02, Ext 1312; Fax: +52 (55) 56.22.86.20

INTRODUCTION

The mucilage obtained from *Opuntia ficus indica* is a high molecular weight heterogeneous polysaccharide that in view of its chemical composition may be used as stabilizing agent in suspensions, since this hydrocolloid has been found that modifies the viscous properties. These qualities make this hydrocolloid attractive for the formulation of certain food products. However, at the present time the mucilage is obtained by precipitation with organic solvents, with low yields and high production cost. In this work, a solvent-free mechanical extraction method has been applied for the extraction of *Opuntia ficus indica* mucilage, in order to improve the extraction yield and to use it as dispersing agent in hyponeutric suspensions of vegetable protein for patients with bariatric surgery in the second stage after the intervention (general liquids stage). The experimental strategy consisted of developing a high performance extraction method including the chemical and a rheological characterization of mucilage obtained and the evaluation as dispersing agent.

METHODOLOGY

a) Mucilage extraction and dry procedures



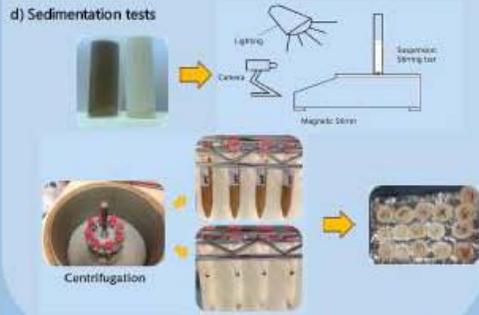
b) Chemical characterization



c) Rheological measurements



d) Sedimentation tests



RESULTS

a) Mucilage extraction and dry procedures

Table 1. Yields and products of the mechanical extraction process of *Opuntia ficus indica* mucilage.

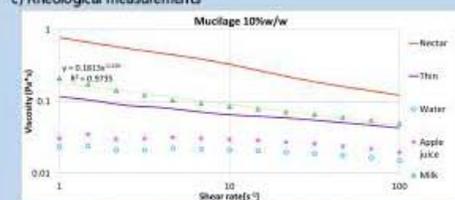
Operation	Products	Yield (%)
Dry milling	Milled cladodes	98.90 ± 0.34
Mechanical press	Cactus chaff Cactus juice	85.90 ± 1.10
Vacuum and aid filtration	Mucilage	70.01 ± 2.87
Spray drying	Mucilage powder	1.60 ± 0.36

b) Proximal Analysis

Table 2. Proximal Analysis of *Opuntia ficus indica* mucilage powder.

Determination	Content (%)
Dry matter	95.98
Moisture	3.03
Crude Protein (Nitrogen x 6.25)	7.46
Ether extract	0.71
Ash	25.93
Crude fiber	0.02
Carbohydrates	62.66

c) Rheological measurements



d) Sedimentation test



CONCLUSIONS

A solvent-free mechanical extraction high performance process of mucilage was obtained. This mucilage is feasible to be used in food processing as it is GRAS product. The mucilage powder could be used as a dispersing agent in vegetable protein suspensions at the concentration of 10% w/w using skim milk, since it avoids sedimentation even for dense mixtures.

REFERENCES

Saenz, C., Sepúlveda, E., Matsuhira S. (2004). *Opuntia* spp. mucilage: A functional component with industrial perspectives. *Journal of Food Engineering*, 57, 225-240.
 Sepúlveda, E., Saenz, C., Allaga, E., Acetuno C. (2007). Extraction and characterization of mucilage in *Opuntia* spp. *Journal of Food Engineering*, 68, 534-545.
 Rodríguez-Geaquer, S., Martínez-Flores, M., Chávez-Moreno, C., Méndez-Rodríguez, L., Zavala-Mendoza, E., Gallardo-Romero, M., Chelón-García, L. (2014). Extraction and characterization of mucilage from wild species of *Opuntia*. *Journal of Food Process Engineering*, 282-292.