



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA METROPOLITANA

UNIDAD IZTAPALAPA

DIVISIÓN DE CIENCIAS BIOLÓGICAS Y DE LA SALUD

POSGRADO EN BIOTECNOLOGÍA

“Caracterización fisicoquímica de las fracciones de fibra soluble de jícama (*Pachyrhizuz erosus* L. Urban): efecto en la estructuración y funcionalidad de yogurt”

TESIS

PARA OBTENER EL GRADO DE

DOCTOR EN BIOTECNOLOGÍA

PRESENTA

CESAR RAMÍREZ SANTIAGO

CoDirección:

DR. EDUARDO JAIME VERNON CARTER

DRA. CONSUELO SILVIA OLIVIA LOBATO CALLEROS

Asesor:

DR. JOSÉ DE JESÚS ÁLVAREZ RAMÍREZ

México, D.F. enero 2013

El Doctorado en Biotecnología de la Universidad Autónoma Metropolitana está incluido en el Programa Nacional de Posgrados de Calidad (PNPC) del CONACYT, con la referencia 001466

México, D.F. enero de 2013

El jurado designado por la División de Ciencias Biológicas y de la Salud de la Unidad Iztapalapa aprobó la tesis:

“Caracterización fisicoquímica de las fracciones de fibra soluble de jicama (*Pachyrhizus erosus* L. Urban): efecto en la estructuración y funcionalidad de yogurt”

Que presentó

Cesar Ramirez Santiago

Comité Tutorial:

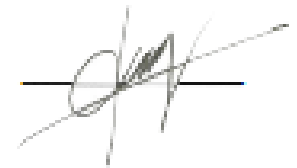
Codirector: Dr. Eduardo Jaime Vernon Carter
Universidad Autónoma Metropolitana Iztapalapa



Codirectora: Dra. Consuelo Silvia Olivia Lobato Calleros
Universidad Autónoma de Chapingo

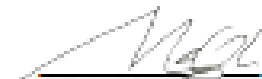


Asesor: Dr. José de Jesús Álvarez Ramírez
Universidad Autónoma Metropolitana Iztapalapa



Comité Evaluador:

Presidente: Dr. Francisco Cruz Sosa



Secretario: Dra. Alma Cruz Guerrero



Vocal: Dra. Diana Jaqueline Pimentel González



Vocal: Dra. Angélica Román Guerrero



México, D.F. enero de 2013

El jurado designado por la División de Ciencias Biológicas y de la Salud de la Unidad Iztapalapa aprobó la tesis:

“Caracterización fisicoquímica de las fracciones de fibra soluble de jícama (*Pachyrhizuz erosus* L. Urban): efecto en la estructuración y funcionalidad de yogurt”

Que presentó

Cesar Ramírez Santiago

Comité Tutorial:

Codirector: Dr. Eduardo Jaime Vernon Carter
Universidad Autónoma Metropolitana Iztapalapa

Codirectora: Dra. Consuelo Silvia Olivia Lobato Calleros
Universidad Autónoma de Chapingo

Asesor: Dr. José de Jesús Álvarez Ramírez
Universidad Autónoma Metropolitana Iztapalapa

Comité Evaluador:

Presidente: Dr. Francisco Cruz Sosa

Secretario: Dra. Alma Cruz Guerrero

Vocal: Dra. Diana Jaqueline Pimentel González

Vocal: Dra. Angélica Román Guerrero

AGRADECIMIENTOS

A DIOS, por darme la salud, la fortaleza para lograr mis objetivos y la perseverancia para culminar este proyecto.

Al Dr. Eduardo Jaime Vernon Carter, por su confianza, por su apoyo en la realización de este proyecto y porque sé que siempre recibiré su apoyo incondicional, gracias.

A la Dra. Consuelo Silvia Olivia Lobato Calleros, porque siempre ha caminado a mi lado en mi formación académica, motivándome; por su preocupación, por estar siempre disponible, por sus consejos y paciencia en la escritura de la tesis y por ser una gran amiga.

A mi Ofe, porque siempre estás conmigo, porque apoyas mis decisiones, soportas la discusión, mi mal humor y me haces sonreír cuando estoy triste.....¡Te amo!.

A la Bióloga Yolanda Hornelas Orozco del Instituto de Ciencias del Mar y Limnología por su apoyo en el análisis de la microestructura, por su disposición y paciencia en todos y cada uno de los intentos.

Al Dr. Jesús Álvarez Ramírez, por su apoyo en este proyecto y la escritura del artículo.

Al comité evaluador, por su interés en la revisión del documento, valiosas aportaciones y acertadas correcciones.

A la Universidad Autónoma Metropolitana Iztapalapa por mantener la calidad de enseñanza, por la dedicación de su profesorado y abrirme sus puertas.

A la Universidad Autónoma Chapingo por facilitarme las instalaciones para el desarrollo de la fase experimental de este proyecto.

A CONACYT, por el apoyo brindado a través de la beca del Posgrado en Biotecnología de la Universidad Autónoma Metropolitana.

A TODOS, GRACIAS.

Dedicada en especial a

A mi padre, mi madre, hermanos, sobrinos y a mi hijo.

A ti Ofelia, porque eres mi fortaleza

y a mis amigos por su lealtad.

ÍNDICE DE GENERAL

ÍNDICE GENERAL.....	i
ÍNDICE DE FIGURAS.....	iv
ÍNDICE DE TABLAS.....	v
RESUMEN.....	vi
ABSTRACT.....	vii
1 INTRODUCCIÓN.....	1
2 ANTECEDENTES.....	4
2.1 Fibra Dietética.....	4
2.2 Clasificación de la fibra dietética.....	4
2.2.1 Fibra Soluble.....	5
2.2.2 Fibra Insoluble.....	6
2.2.3 Polisacáridos no almidonados (PNA) ó no amiláceos.....	6
2.3 Celulosa.....	6
2.4 Hemicelulosa.....	7
2.4.1 Aplicaciones biotecnológicas de los galactomananos y xiloclucanos.....	10
2.5 Pectina.....	12
2.6 Gelación de proteínas con hidrocoloides.....	15
2.7 Interacción de pectinas con lactoproteínas.....	17
2.8 Jícama (<i>Pachyrhizus erosus</i> L. urban)	20
2.8.1 Composición.....	21

2.8.2 Producción.....	22
2.9 Yogurt.....	24
2.9.1 Tipos de yogurt.....	24
2.10 Aplicación de fibras en la estructuración de yogurt.....	25
2.11 Reología	28
3 OBJETIVOS.....	30
3.1 Objetivo general.....	30
3.2 Objetivos particulares.....	30
4 HIPÓTESIS.....	31
5 MATERIALES Y MÉTODOS.....	31
5.1 Materiales.....	31
5.2 Métodos.....	33
5.2.1 Extracción y purificación de las fracciones de fibra soluble de jícama (<i>Pachyrhizus erosus</i> L. Urban).....	33
5.2.2 Contenido de proteína de la Pectina de <i>P erosus</i> L. Urban.....	35
5.2.3 Grado de esterificación de la pectina de jícama.....	35
5.2.4 Variaciones y proceso de manufactura del yogurt batido.....	36
5.2.5 Determinación de composición química y sinéresis de los yogures.....	37
5.2.6 Determinación de la microestructura de la jícama y de los yogures.....	37
5.2.7 Determinación de las propiedades reológicas de los yogures.....	39
5.2.8 Evaluación sensorial de los yogures.....	40
5.2.9 Análisis de datos.....	41

6 RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	41
6.1 Microestructura de tubérculos de <i>Pachyrhizus erosus</i> L. Urban.....	41
6.2 Contenidos de fibra soluble e insoluble de <i>Pachyrhizus erosus</i> L. Urban.....	43
6.3 Grado de esterificación y contenido de proteína de pectina de <i>P. erosus</i> L. Urban.....	45
6.4 Composición química y grado de sinéresis de los yogures.....	46
6.5 Microestructura de los yogures.....	50
6.6 Comportamiento reológico de los yogures.....	54
6.6.1 Reología dinámica.....	54
6.6.2 Comportamiento de flujo.....	58
6.7 Evaluación sensorial.....	63
7 CONCLUSIONES.....	64
8 REFERENCIAS.....	65
9 ANEXOS.....	84
9.1 Anexo 1: Enrichment of stirred yogurt with soluble dietary fiber from <i>Pachyrhizus erosus</i> L. Urban: Effect on syneresis, microstructure and rheological properties.....	84

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Unidad estructural básica de la celulosa, compuesta de restos de β - glucopiranosos unidos por enlaces ((β -1-4-O).....	7
Figura 2. Estructura básica de hemicelulosa.....	8
Figura 3. Estructura de la pectina.....	12
Fig 4. Micrográficas electrónicas de barrido del corte transversal de <i>Pachyrhizus erosus</i> liofilizado: (a) y (b) células de jícama (ce), paredes celulares delgadas (pc), gránulos de almidón (ga), a magnificaciones de $200 \times$ y $500 \times$, respectivamente; (c) acercamiento de la estructura de la pared celular, magnificación de $5000 \times$ y (d) gránulos de almidón (ga) $1500 \times$	42
Figura 5. Micrografía electrónica de barrido de SY _C , en la que puede apreciarse la formación de una red tridimensional de agregados de micelas de caseína (c); la estructura de un glóbulo de grasa láctea (g) embebido en la red de proteína y la presencia de lactobacilos (l) y de estreptococos (s): a) Magnificación $1\ 000 \times$, barra de escala = $10\ \mu\text{m}$ y b) $5\ 000 \times$, barra de escala = $5\ \mu\text{m}$	51
Figura 6. Micrografía electrónica de barrido de SY _{YSF} , en la que puede observarse una red de proteína (c), formada por agregados de micelas de caseína, cubierta por estructuras filamentosas atribuidas a la fibra de jícama (f) y la presencia de estreptococos (s). Magnificación $1\ 000 \times$, barra de escala= $10\ \mu\text{m}$	53
Figura 7. Micrografía electrónica de barrido de SY _{YSF} , en la que se aprecia una red proteínica (c) formada por la agregación de micelas de caseína y cubierta por otra red, constituida por estructuras filamentosas atribuidas a la fibra de jícama (f), así como la presencia de	

lactobacilos (I) y estreptococos (s). Magnificación 5 000×, barra de escala = 5 μm	54
Figura 8. Variación del módulo G' (símbolos rellenos) y del módulo de pérdida G'' (símbolos vacíos) de los yogures como función del % de deformación y el tiempo de almacenamiento.....	56
Figura 9. Variación de $\text{Tan } \delta$ de los yogures como función de la deformación y el tiempo de almacenamiento.....	58
Figura 10. Variación de la viscosidad aparente (η) como función de la tasa de corte (γ) y el tiempo de almacenamiento.....	59

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Aplicaciones de los xiloglucanos y galactomananos.....	11
Tabla 2. Producción agrícola de jícama en México.....	23
Tabla 3. Contenidos de fibra dietética total, fibra insoluble y fibra soluble en base seca en <i>P. erosus</i> L. Urban.....	44
Tabla 4. Composición química de los tratamientos de yogurt batido	48
Tabla 5. Grado de sinéresis y acidez de los tratamientos de yogurt batido	48
Tabla 6. Valores de los módulos de almacenamiento (G') y de pérdida (G'') y factor de cedencia ($\text{Tan } \delta$) de los yogures en la región viscoelástica lineal.....	57
Tabla 7. Valores medios de los parámetros del modelo de Herschel – Bulkley que obedecieron los yogures.....	60

RESUMEN

Fibra soluble extraída de jícama (YSF) *Pachyrhizus erosus* L. Urban fue adicionada (1 g por 100 mL) a un yogurt batido (SY_{YSF}). La microestructura y la sinéresis fueron evaluadas y comparadas con los de un yogurt batido control (SY_C) sin adición de YSF. El yogurt batido SY_C exhibió una red de agregados de micelas de caseína más compacta que aquella del yogurt batido SY_{YSF}, la cual fue más abierta, relajada y se encontró cubierta con estructuras fibrosas atribuidas a los componentes de YSF. El análisis reológico mostró que el yogurt batido SY_{YSF} presentó valores menores de módulo de almacenamiento (G') y módulo de pérdida (G'') en la región viscoelástica lineal que el yogurt batido SY_C, y su comportamiento de flujo se caracterizó por un índice de flujo inferior (n), mayor índice de consistencia (k), y un mayor esfuerzo de fluencia (σ_0) que el yogurt batido SY_C. La incorporación de YSF redujo significativamente la sinéresis y produjo una sensación bucal más aceptable en el yogurt batido SY_{YSF} en comparación a la del yogurt batido SY_C, indicando la viabilidad del proceso para obtener un producto comercial.

Palabras clave: *Pachyrhizus erosus*; Sinéresis; Microestructura; Reología; Yogurt batido, Fibra soluble de jícama.

ABSTRACT

Yam soluble fiber (YSF) extracted from *Pachyrhizus erosus* L. Urban was added (1 g per 100 mL) to a stirred yogurt (SY_{YSF}). Its syneresis and microstructure properties were evaluated and compared to those of a stirred yogurt (SY_C) without added YSF. The SY_C yogurt exhibited a more compact casein micelle aggregates network than that of the SY_{YSF} yogurt which was more open, relaxed and covered with fibrous structures attributed to the YSF components. The rheological analysis showed that the SY_{YSF} yogurt had lower storage modulus (G') and loss modulus (G'') values in the linear viscoelastic region than the SY_C yogurt, but its flow behavior was characterized by a lower flow index (n), higher consistency index (k), and higher yield stress (σ_0) than the SY_C stirred yogurt. The incorporation of the YSF into stirred yogurt reduced significantly the syneresis and produced a more acceptable mouthfeel in the SY_{YSF} stirred yogurt in comparison to the SY_C stirred yogurt, indicating the viability of the process to obtain a commercial product.

Keywords: *Pachyrhizus erosus*; Syneresis; Microstructure; Rheology; Stirred yogurt; Yam soluble fiber.

1 INTRODUCCIÓN

En los últimos años ha crecido el interés por la aplicación de diversos polisacáridos extraídos de fuentes vegetales regionales con fines biotecnológicos, como aditivos alimentarios o en la formulación de fármacos; así como también en la elaboración de plásticos parcialmente biodegradables con diversas aplicaciones. Entre los polisacáridos estudiados para dichos fines se encuentran las hemicelulosas y las pectinas, las cuales representan una atractiva alternativa para su uso en distintos procesos biotecnológicos por su origen natural, fácil obtención, propiedades funcionales exhibidas en los sistemas alimenticios y contribuciones a la salud del ser humano (Sousa *et al.*, 2010).

Diversos estudios epidemiológicos han establecido que existe una relación entre el consumo de fibra dietética y la reducción de riesgo de varias enfermedades crónicas, incluyendo cáncer de colon, enfermedades cardiovasculares, obesidad, diabetes, diverticulosis de colon y constipación, entre otras (Alvarado-Osuna *et al.*, 2001; WHO, 2003; Olaiz-Fernández *et al.*, 2006; Secretaría de Salud, 2007). Dietas altas en fibra generalmente reflejan un estilo de vida más saludable; sin embargo, a nivel mundial la ingesta de este componente dietético es menor respecto a la cantidad recomendada de 38 g para los hombres y 25 g para las mujeres (Trumbo *et al.*, 2002; Beristain *et al.*, 2006). Incrementos en el consumo de fibra en la dieta ha sido un reto difícil, ya que las fuentes de fibra comúnmente usadas en la formulación y preparación de alimentos altos en fibra, no contribuyen a la calidad de su sabor y propiedades texturales (Beristain *et al.*, 2006). Es importante entonces, que los ingredientes con altos contenidos en

fibra participen no solamente en la obtención de alimentos fortificados o enriquecidos en este componente, sino que también exhiban ciertas propiedades funcionales que mejoren la calidad de los alimentos a los que son incorporados (Tunland y Meyer, 2002). La fibra dietética ha sido definida por la American Association of Cereal Chemist (2001), como la parte comestible de las plantas o carbohidratos análogos que son resistentes a la digestión y absorción en el intestino delgado de los seres humanos, con fermentación completa o parcial en el intestino grueso. La fibra dietética incluye polisacáridos, oligosacáridos, lignina y sustancias asociadas a las plantas (Tunland y Meyer, 2002). La fibra está presente en todas las plantas que son ingeridas como alimentos, incluyendo frutas, hortalizas, granos y legumbres; sin embargo, sus componentes varían de acuerdo a su fuente; así la celulosa se encuentra principalmente en los granos de cereales, mientras que las pectinas son constituyentes importantes de la fibra proveniente de frutas, papa y betabel (Grain, 2006). Estas diferencias en composición de la fibra son importantes al considerar las propiedades funcionales que se desea generar en el alimento a desarrollar, puesto que durante el procesamiento los componentes de la fibra pueden interaccionar con aquellos originalmente contenidos en el alimento y así causar cambios en el sabor y textura del producto (Sendra *et al.*, 2008). Es conveniente investigar la composición de fibras obtenidas a partir de vegetales distintos a los convencionalmente usados, tal es el caso de la fibra de jícama, de esta manera se contribuirá a una mayor diversidad de propiedades funcionales en los alimentos altos en fibra a desarrollar.

Los yogures son considerados como positivos para la salud debido a la acción benéfica de sus bacterias viables y representan una buena opción para ser enriquecidas con fibra dietética.

Además, los componentes de la fibra pueden prevenir la agregación de la proteína de estos durante su vida de anaquel, la cual es debida a la inestabilidad de las caseínas en el intervalo de pH (3.4-4.6) (Nakamura *et al.*, 2006). Es necesario conocer la influencia de la incorporación de nuevos constituyentes en un alimento, tal como el yogurt, sobre sus características mecánicas, sensoriales y de estabilidad, así como los mecanismos involucrados en ello. Con base en lo antes expuesto, los objetivos de este trabajo fueron: (1) caracterizar la fracción de fibra soluble de *Pachyrhizus erosus* L. Urban y (2) evaluar y comparar la sinéresis, arreglo estructural y propiedades reológicas de yogurt batido con y sin fibra soluble de *Pachyrhizus erosus* L. Urban.

2 ANTECEDENTES

2.1 Fibra Dietética

La fibra es la suma de la lignina y polisacáridos no almidonados (PNA) ó no amiláceos (celulosa, hemicelulosa, pectinas, gomas y mucílagos) de las plantas. Es la fracción de la pared celular de las plantas, resistente a la hidrólisis por las enzimas digestivas del ser humano, pero fermentable por la microflora colónica y excretados por las heces (Anguera, 2007).

Escudero (2006) añade a la definición de la fibra dietética el nuevo concepto de fibra funcional, que incluye otros carbohidratos de carbono resistentes a la digestión de las enzimas del tracto intestinal humano, como el almidón resistente, la inulina, diversos oligosacáridos (fructooligosacáridos, galactooligosacáridos y xilooligosacáridos) y disacáridos sintéticos como la lactulosa, definiendo como fibra total a la suma de fibra dietética y fibra funcional. Es decir, que ésta contenga componentes o elementos fisiológicamente activos (García *et al.*, 2008).

2.2 Clasificación de la fibra dietética

La fibra dietética puede clasificarse de acuerdo a su solubilidad en agua como soluble e insoluble. Sus propiedades y efectos fisiológicos están determinados principalmente por las proporciones que guardan estas dos fracciones, sin importar su origen (Sánchez, 2005). De

acuerdo con el Comité de Expertos FAO/OMS, se estima que el consumo diario de fibra dietética en el mundo va desde una cifra tan baja como es 14 g/día hasta 29 g/día (Institute of Medicine of the National Academies, 2005; FAO/OMS, 2007). Aún tomando la cifra más alta de consumo de fibra, en México estamos por debajo de las recomendaciones de los expertos por ejemplo, en cuanto a las mujeres de comunidades rurales consumen en promedio 23.6 g al día; las mujeres en el medio urbano (15.5 g), y a nivel nacional (17.3 g), es decir, consumen más fibra las del medio rural (Barquera *et al.*, 2002).

2.2.1 Fibra Soluble

La fibra soluble (FS) forma una dispersión en agua; la cual conlleva a la formación de geles viscosos en el tracto gastrointestinal, que tienen la propiedad de retardar la evacuación gástrica, puede ser saludable en algunos casos, haciendo más eficiente la digestión y absorción de alimentos y generando mayor saciedad. Este tipo de fibra es altamente fermentable y se asocia con el metabolismo de carbohidratos y lípidos (De la Llave, 2004). La fibra soluble contiene mayoritariamente, polisacáridos no-celulósicos tales como la pectina, gomas, algunas hemicelulosas (arabinoxilanos y arabinogalactanos) y mucílagos (Córdoba, 2005). Esta fibra se encuentra en altas concentraciones en frutas y algas marinas (Lajolo *et al.*, 2001).

2.2.2 Fibra Insoluble.

La fibra insoluble (FI) aumenta el volumen de las heces hasta 20 veces su peso, debido a su capacidad de retención de agua, y se relaciona con la protección y alivio de algunos trastornos digestivos como estreñimiento y constipación (Zambrano *et. al.*, 1998). Esta fibra no se dispersa en agua, está compuesta de celulosa, hemicelulosas (arabinosilanos y arabinogalactanos) y ligninas (Priego, 2007). Las fuentes de este tipo de fibra se pueden encontrar mayoritariamente en verduras, cereales, leguminosas y frutas (Zúñiga, 2005).

2.2.3 Polisacáridos no almidonados (PNA) ó no amiláceos

Los polisacáridos no almidonados (PNA) ó no amiláceos están constituidos por cientos de unidades de monosacáridos. Varían dependiendo del número y la variedad de monosacáridos, del orden en las cadenas de polímeros y del tipo de enlaces (García *et. al.*, 2008).

2.3 Celulosa.

Está compuesta de restos de β -glucopiranososa (Figura 1) y es el componente principal de las paredes de las células vegetales, donde se encuentra asociada a la hemicelulosa, pectina y lignina (Córdoba, 2005).

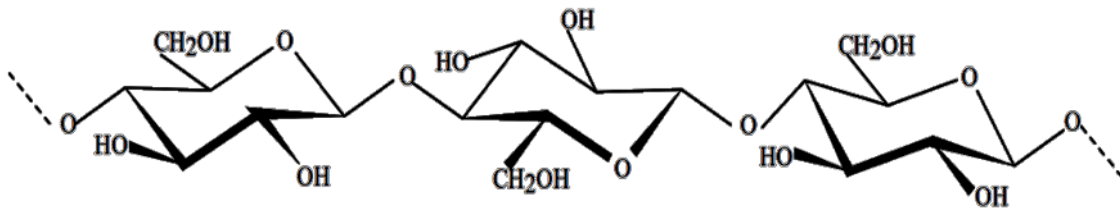


Figura 1. Unidad estructural básica de la celulosa, compuesta de restos de β - glucopiranososa unidos por enlaces (β -1-4-O) (Córdoba, 2005)

Tomando en cuenta la gran variedad de polisacáridos existentes, la celulosa es considerada el polisacárido de mayor abundancia en la tierra, ya que ésta conforma la mayor parte de los tejidos de las plantas.

2.4 Hemicelulosa.

Es ampliamente distribuida en las plantas, incluye las sustancias que rellenan los espacios existentes entre las fibrillas de celulosa en las paredes celulares vegetales, por lo que actúan como material de soporte para mantener las células juntas. La hemicelulosa está constituida por pentosas y hexosas distribuidas de forma ramificada y lineal conformando polímeros tipo polisacáridos denominados no-celulósicos (Figura 2). La hemicelulosa tiene un peso molecular menor que la celulosa y contiene como azúcares constitutivos a la xilosa, arabinosa, galactosa, manosa, glucosa, ácido glucurónico y ácido galacturónico (Córdoba, 2005). Normalmente es insoluble, pero en condiciones especiales puede ser parcialmente soluble. Se clasifican de acuerdo al monómero del carbohidrato con mayor predominio.

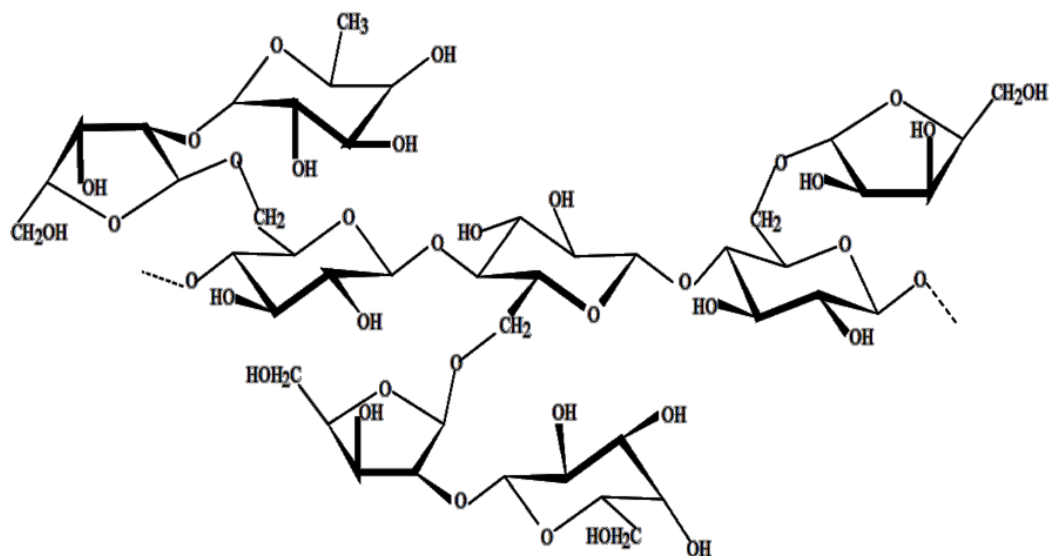


Figura 2. Estructura básica de hemicelulosa (Belitz y Grosch, 1997).

Las hemicelulosas representan diferentes grupos de polisacáridos, clasificados de acuerdo a su composición química y estructural: así el L-arabinano es un polímero compuesto por unidades de L-arabinosa, el D-galactano de unidades de D- galactosa, el D-manano por unidades de D-manosa y el D-xilano por unidades de D-xilosa. En la naturaleza las hemicelulosas no están presentes como homopolisacáridos; es decir, su estructura no se basa en un sólo residuo de azúcar, Sino que normalmente se encuentran en forma de heteropolisacáridos, compuestos por dos o hasta cuatro residuos de azúcar diferentes (Timell, 1964 y 1965; Aspinall, 1970). Los D-mananos por ejemplo, presentan estructuras químicas muy variadas.

Dependiendo del método de extracción de las hemicelulosas (ácido o básico), se obtienen dos fracciones con características fisicoquímicas diferentes: la hemicelulosa A tiene un alto peso molecular, es insoluble en agua y tiene bajo contenido de ácido glucurónico y arabinosa. La hemicelulosa B contiene moléculas fuertemente enlazadas entre sí, de bajo peso molecular,

solubles en agua y con una alta concentración de ácido glucurónico y arabinosa. Los D-mananos se extraen comúnmente por métodos alcalinos, seguidos de lavados y precipitación con alcohol (Shcherbukhin, 1993).

La extracción alcalina se basa en una hidrólisis, separación y recuperación de las fracciones de hemicelulosas obtenidas en las diferentes concentraciones de hidróxido de potasio, las hemicelulosas son hidrolizadas en soluciones de hidróxido de potasio (KOH) a dos distintas concentraciones: aquella hemicelulosa extraída en la fracción soluble en KOH al 4 % corresponden a altas proporciones de polisacáridos hemicelulósicos de tipo B, mientras que a 24 % de KOH se requiere para extraer polímeros ricos en hemicelulosas de tipo A que están unidos fuertemente a la pared celular y a las microfibras de celulosa particularmente. El material residual de la extracción con KOH a 24 % corresponde primordialmente a celulosa y a pequeñas cantidades de polisacáridos asociados (Rose *et al.*, 1998).

Las hemicelulosas poseen grandes aplicaciones en la industria alimentaria. Algunas veces están presentes como auxiliares tecnológicos dentro del proceso de elaboración de los alimentos, ya que son utilizados como estabilizadores de emulsiones o suspensiones; así como para dar resistencia a los materiales utilizados en el empaquetamiento, facilitar la distribución de los mismos, y de esa manera mejorar y estandarizar la calidad de los alimentos procesados (Sousa *et al.*, 2010).

2.4.1 Aplicaciones biotecnológicas de los galactomananos y xiloglucanos

En la actualidad se llevan a cabo estudios de los componentes de las hemicelulosas tanto en la extracción como en la caracterización de xiloglucanos y galactomananos de fuentes alternativas a las comerciales como por ejemplo: algarrobo (*Hymenaea courbaril*) y tabachin (*Caesalpinia pulcherrima*). Los cuales tienen posibles usos en la industria alimentaria en la elaboración de embutidos, formulación de recubrimientos comestibles o como estabilizantes de sopas y bebidas lácteas. La Tabla 1 muestra algunas de las aplicaciones biotecnológicas que se han dado a los xiloglucanos y galactomananos constituyentes de las hemicelulosas. Recientemente se han llevado a cabo algunos estudios de mezclas entre polisacáridos en busca de un sinergismo entre ellos con el fin de obtener una mejora en las características fisicoquímicas en comparación a las presentadas por los polímeros por separado. Algunos polisacáridos helicoidales tales como xiloglucanos han sido ampliamente utilizados en la industria con el fin de mejorar la retención de humedad y mantener la calidad durante el almacenamiento y distribución de los alimentos, controlando así las propiedades sensoriales de los mismos. Los resultados obtenidos por Pongsawatmanit *et al.* (2007), sugieren que la interacción del almidón de la tapioca con los xiloglucanos de tamarindo es capaz de aumentar la resistencia del gel formado en presencia de sacarosa.

Tabla 1. Aplicaciones de los xiloglucanos y galactomananos

Polisacárido	Origen	Aplicación	Referencia
Xiloglucano	<i>Hymenaea stigonocarpa</i> Mart., (<i>Hymenaea stilbocarpa</i> Mart.)	Elaboración de galletas ricas en fibra alimentaria y libres de azúcares	Silva <i>et al.</i> (2001)
	<i>Hymenaea courbaril</i>	Películas	Redeschi, (2006)
Galactomanano	<i>Mimosa scabrella</i>	Liberación controlada de fármacos	Vendruscolo, (2005)
	<i>Dimorphandra gardneriana</i>	Soluciones oftalmológicas	Pires <i>et al.</i> (2010)
	<i>Adenanthera pavonina</i> y	Recubrimientos comestibles en frutos	Lima <i>et al.</i> (2008)
	<i>Caesalpinia pulcherrima</i> <i>Prosopis sp</i>	Elaboración de quesos hipocalóricos	Hernández-Tinoco <i>et al.</i> (2004)

Los galactomananos, al igual que los xiloglucanos han sido empleados por su capacidad de interaccionar con otras moléculas. Se ha descrito su uso como matriz para cromatografía de afinidad para el aislamiento de muestras de lectina, reportándose algunas diferencias entre los porcentajes de lectina retenida en las columnas a base de galactomananos tratados con epiclorhidrina, donde dichas diferencias dependieron del origen de las muestras empleadas y de las ramificaciones de los galactomananos (Moreira *et al.*, 1998, Garros-Rosa *et al.*, 2006). Además se ha demostrado que los galactomananos pueden interaccionar con las proteínas de la leche, por lo que este tipo de polisacáridos también han sido empleados para evitar la formación de cristales en los helados y aumentar de esta manera su calidad (Patmore *et al.*, 2003). Además, se han llevado a cabo estudios para la obtención de queso bajo en grasa sustituyendo parcialmente la grasa butírica por los galactomananos, observándose un aumento en el contenido de humedad y una disminución en los parámetros reológicos G' y G'' y su microestructura se presenta mucho más cavernosa (Hernández-Tinoco *et al.*, 2004).

2.5 Pectina

La pectina es uno de los principales componentes de la pared celular de tejidos vegetales parenquimatosos. Este polisacárido se encuentra en los espacios intercelulares de los tejidos vegetales y les confiere propiedades específicas de firmeza y textura (Waldron y Faulds, 2007). Estructuralmente las pectinas se describen como alternaciones de regiones “lisas” (Homogalacturonanos, HG) y regiones “ramificadas” (Ramnogalacturonanos tipo I, RGI) (Koubala *et al.*, 2008; Schols *et al.*, 2009). La región HG comprende una cadena lineal de enlaces (α -1,4-O) de -D- ácido galacturónico parcialmente esterificado con alcohol metílico en el C6 y posiblemente parcialmente acetilesterificado en el C2 ó C3 en algunas especies vegetales (Figura 3). La región RGI contiene una cadena principal de alternaciones de -L-ramnosa unida a la posición C4 de ácido -D- galacturónico, el cual a su vez se une a la posición C2 de la -L-ramnosa. Entre el 20 y 80 % de la ramnosa está sustituida en el C4 con cadenas laterales de azúcares neutros, principalmente arabinosa y galactosa (Waldron y Faulds, 2007; Koubala *et al.*, 2008; Schols *et al.*, 2009).

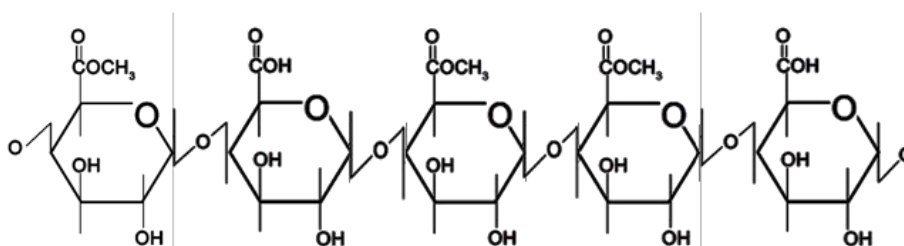


Figura 3. Estructura de la pectina (Córdoba, 2005).

La pectina tiene numerosas aplicaciones en la industria alimentaria como espesante, texturizador, emulsionante y estabilizante (Liu *et al.*, 2006; Koubala *et al.*, 2008). También tiene un importante campo de aplicación en productos de la industria farmacéutica y de cosméticos (Fishman *et al.*,

2000; Contreras-Esquivel *et al.*, 2006). El polímero puede extraerse a partir de subproductos de la industria alimentaria y una de las fuentes principales son las cáscaras de cítricos y la manzana (Contreras-Esquivel *et al.*, 2006; Koubala *et al.*, 2008). Sin embargo, se han identificado fuentes alternativas para la obtención de pectina entre las que se encuentra el tejocote (Contreras-Esquivel *et al.*, 2006), el nopal y el maracuyá (Kliemann *et al.*, 2009).

Las pectinas de uso comercial se clasifican en pectinas de alto y bajo metoxilo según su porcentaje de grupos carboxilo metil esterificado, las de alto metoxilo tienen más del 50%; mientras que, las de bajo metoxilo tienen menos del 50 %. El grado de metoxilación influye en las propiedades funcionales de la pectina, por ejemplo en la capacidad para formar geles (Contreras-Esquivel *et al.*, 2006). Las pectinas de alto metoxilo gelifican en medio ácido y altas concentraciones de azúcar. Por otro lado las pectinas de bajo metoxilo lo hacen por su interacción con cationes divalentes, particularmente Ca^{2+} (Correa *et al.*, 1999). El rendimiento, composición, grado de esterificación y fuerza de gelificación de las pectinas varía dependiendo de la fuente y las condiciones aplicadas para su extracción (Iagher *et al.*, 2002; Contreras-Esquivel *et al.*, 2006; Fishman *et al.*, 2008; Koubala *et al.*, 2008).

La habilidad del calcio para formar complejos con pectina está asociada con los grupos carboxilo libres de las cadenas de pectina observándose un incremento de tendencia a la formación de gel mientras decrece el grado de esterificación (Anyas y Deuel, 1950). Los enlaces de calcio implican otros grupos funcionales aparte de los grupos carboxilos (Deuel *et al.*, 1950), la fuerte interacción entre el calcio con otros átomos de oxígeno han sido

descritos por Rees *et al.* (1982) como también los complejos de calcio con carbohidratos, tanto neutros como ácidos (Angyal, 1989). Estos complejos implican enlaces de coordinación utilizando los orbitales vacíos del ión calcio. El ión calcio es particularmente efectivo formando complejos con carbohidratos (Angyal, 1989) en gran parte debido a que su radio iónico de 0.1 nm es lo suficientemente largo como para coordinar con átomos de oxígeno espaciados que corresponden a muchos azúcares.

Para la coagulación inducida por el calcio ha sido propuesta una llamada estructura de "cajón de huevo" (Rees *et al.*, 1982) en la que los iones calcio interactúan iónicamente y están coordinados con funciones oxigenadas de dos cadenas adyacentes, originando un cruzamiento de cadenas. Los enlaces cruzados de calcio llegan a ser más estables por la presencia de enlaces cruzados vecinales cooperativos. La máxima estabilidad de los enlaces cruzados se alcanza cuando están presentes de 7 a 14 enlaces consecutivos (Kohn y Luknar, 1977). El cloruro de calcio no coagula las pectinas con grado de esterificación mayor del 60% y las concentraciones necesarias para coagular pectinas con bajo grado de esterificación se incrementa a medida que el peso molecular disminuye (Anvas y Deuel, 1950).

Aunque existen diversos métodos de extracción de pectina como lo son la extracción química, física y enzimática, esta se realiza convencionalmente de forma química. La extracción ácida se basa en una hidrólisis, separación y recuperación de la pectina; la protopectina se hidroliza en medio ácido diluido (pH 1.5-3.0), y alta temperatura, removiendo no sólo la pectina, sino también otros productos tales como polisacáridos neutros y gomas. El grado de esterificación final,

depende de la temperatura (95 °C- 100 °C), del pH y de la duración del tratamiento ácido (1-3 h); pudiendo obtenerse pectinas fuertemente metiladas o pectinas débilmente metiladas (Sudhakar and Maini, 2000; Berardini *et al.*, 2005). Otro método utilizado para la liberación de pectina, es el método biológico (Contreras-Esquivel *et al.*, 2003), considerado un método alternativo que no tienen efectos tan dañinos con el medio ambiente como los métodos químicos y las condiciones de reacción no son tan severas (Contreras-Esquivel *et al.*, 2006). A pesar de esto, tiene la desventaja de ser muy caro y tardado debido al aislamiento enzimático y a los largos tiempos de extracción requeridos para solubilizar la pectina.

2.6 Gelación de proteínas con hidrocoloides.

Los polisacáridos cargados negativamente pueden formar complejos con las proteínas cargadas positivamente (regulando el pH), en el caso de que se incremente la fuerza iónica, el pH para la formación de complejos en solución cambiará a valores menores. Y cuando el complejo alcanza la neutralidad de sus cargas, ocurre una separación de fase por la escasez de repulsión electrostática (Ye, 2008; Voragen *et al.*, 2009).

Al disminuir el pH por debajo del punto isoeléctrico de las proteínas (pH β -Lg = 4.8 y pH caseína = 4.6 para el caso de proteínas lácteas), la carga positiva y su interacción con un polisacárido aniónico genera una máxima interacción electrostática. Sin embargo, algunos complejos formados al parecer no tienen relevancia en la formación de geles lácteos, ya que inhiben la agregación y precipitación de proteínas al intentar desnaturalizarlas por tratamiento

térmico. Un ejemplo de los polisacáridos que tienen esta cualidad son la carragenina y la pectina, que son adsorbidos en la superficie de las micelas de caseína, protegiéndolas de la interacción entre sí (Ye, 2008) como en el yogurt.

Otra característica de los polisacáridos es que tienen grupos carboxilo ionizables, como los son los alginatos, la goma arábica, los pectatos y la carboximetilcelulosa. Tanto los alginatos como los pectatos forman redes enteramente por la unión de iones metálicos divalentes entre las uniones de las cadenas de los polisacáridos (Stainsby, 1980).

Los grupos éster de las pectinas pueden formar entrecruzamiento con moléculas pequeñas, sin éxito de crear geles con proteínas. Mientras que los alginatos no presentan dificultad para formar geles y lo hacen con más facilidad en conjunto con grenetina. También, generan reacciones de entrecruzamiento que pueden proceder suavemente cuando soluciones acuosas de los ésteres y proteínas son mezclados. Lamentablemente estas reacciones se llevan a cabo a valores de pH por encima de 8, siendo no adecuado para su uso en geles de proteínas lácteas como lo es el yogurt (Stainsby, 1980).

En el caso de los geles lácteos a base de renina, el tiempo de coagulación puede reducirse e incrementar la firmeza de la cuajada con pectina de bajo metoxilo, mientras que la xantana reduce la firmeza del gel formado (Olsen, 1989). Además, existe sinergia a pH neutro entre

las proteínas de suero de leche y varios polisacáridos como la xantana, pectina y carragenina (Stainsby, 1980; Rocha *et al.*, 2009).

2.7 Interacción de pectinas con lactoproteínas

La pectina puede prevenir la agregación de las micelas de caseína en sistemas con pH por debajo de 5.3, en donde el tamaño de las micelas incrementa debido a la adsorción de pectina en la superficie (complejos de naturaleza electrostática), estabilizando a las partículas estéricamente en bebidas lácteas acidificadas. Una vez que la pectina se ha adsorbido, esta puede desorberse nuevamente al incrementar el pH, indicando que el proceso es reversible (Marozienne y de Kruif, 2000).

Por otra parte, en sistemas de pectina/micelas de caseína con pH 6.7, la pectina es incapaz de adsorberse en las micelas de caseína, y a concentraciones cercanas a 0.1 % (bajo metoxilo) y 0.2 % (alto metoxilo y bajo metoxilo amidada) del hidrocólide, se produce una separación de fase atribuida a la floculación por agotamiento del volumen ocupado (Marozienne y de Kruif, 2000).

Dicha floculación de las micelas de caseína por agotamiento puede apreciarse por un sistema bifásico, en la cual, una pequeña fase del volumen total es abarcada por las moléculas de pectina cuando ésta se encuentra a bajas concentraciones. Al incrementar la concentración de

pectina, el volumen ocupado y la presión osmótica de la pectina incrementa, induciendo una fuerte floculación de las micelas de caseína en la fase inferior del volumen ocupado (Marozziene y de Kruif, 2000). A pesar de que la adición de calcio puede favorecer su interacción con caseínas a valores más elevados de pH, no es suficiente como para hacer interactuar a las moléculas de pectina en la formación de la estructura tridimensional de gel de caseínas a base de renina.

Tanto la pectina de bajo metoxilo, como la de alto metoxilo son capaces de formar complejos solubles con la β -lactoglobulina por encima del punto isoeléctrico de la proteína en un intervalo de pH entre 5.2 y 6.3). Para que esto suceda, es necesario un incremento de la fuerza iónica que apantalle las cargas negativas presentes entre las moléculas de β -lactoglobulina y pectina. De esta forma, el tamaño de partícula de los complejos solubles comienza a incrementar, aumentando también la turbidez del sistema (Voragen *et al.*, 2009).

En el caso de que la fuerza iónica en el sistema sea pequeña, el pH para la formación de complejos solubles estará por debajo de 6.3 y hasta antes de acercarse al punto isoeléctrico de la proteína, por arriba de este pH los polímeros serán solubles y por debajo los complejos serán insolubles. Al incrementar la concentración de iones, el intervalo de pH para la formación de complejos solubles comienza a disminuir junto con el límite inferior, así que se requerirá un menor pH (por debajo del punto isoeléctrico de la proteína cuando la

concentración iónica es demasiado elevada) para alcanzar la formación de complejos insolubles (Voragen *et al.*, 2009).

Es probable que al utilizar pectina durante la elaboración de geles inducidos por renina en un pH cercano a 6.7, no se tenga alguna interacción significativa entre la pectina y las proteínas séricas, aún con una mínima concentración de calcio.

Se ha informado que pectinas de LM secuestran iones calcio presentes en la leche, formando partículas de pectato de calcio de tamaño relativamente grande, que disminuyen la agregación de caseínas en queso tipo Manchego, resultando así una red de proteína más abierta (Lobato-Calleros *et al.*, 2001). La pectina de bajo metoxilo también ha sido usada como sustituto de grasa en queso Mozzarella, promoviendo la formación de una red proteínica abierta y relajada, semejante a una esponja (McMahon *et al.*, 1996).

La pectina es un hidrocoloide aniónico capaz de interactuar con las cargas positivas de la superficie de las proteínas, reforzando la red proteína y controlando la sinéresis (Soukoulis *et al.*, 2007). Las moléculas de pectina pueden interactuar con la caseína a través de iones calcio, previniendo la agregación, sedimentación y en consecuencia la separación del suero a través de efectos de estabilización iónica y estérica (Lucey *et al.*, 1999).

2.8 Jícama (*Pachyrhizus erosus* L. Urban)

Actualmente se tiene la necesidad de ampliar el conocimiento acerca de la utilización de especies vegetales alimenticias producidas en nuestro país, esto traería como consecuencia un incremento en la demanda de cultivos mexicanos, tal es el caso de la jícama y a su vez mejoraría el mercado y generando mayores inquietudes para el aprovechamiento de los recursos vegetales del país.

La jícama es una hortaliza originaria y cultivada en México y América Central e introducida al sudeste de Asia (Sorensen, 1996). Pertenece al género *Pachyrhizus*, subtribu Dicotiledonea, tribu Phaseoleae, familia leguminosas (Fabaceae) (Sorensen, 1988). Es un cultivo tropical, susceptible al frío, tolerante a la sequía, sensible al fotoperíodo. Se desarrolla hasta los 2000 msnm, las temperaturas óptimas de cultivo están entre 18 y 30 °C y los suelos deben ser ligeros o arenosos. La parte importante de la jícama es la raíz tuberosa y se cosecha entre 150 a 190 días, influidos por la variedad (Heredia, 1998).

En cuanto a los usos, Kundu (1969) menciona que en la India el tubérculo de *P. erosus* es utilizado para producir harina de buena calidad y se produce un almidón que sirve para preparar natillas y pudines (Allen y Allen, 1981). La jícama puede ser utilizada como un producto atractivo en diversos platillos y como botana (Mudahar y Jen, 1991), en Estados

Unidos de Norteamérica y Japón la han incorporado en algunos platillos orientales, ante la escasez de castaña de agua de procedencia de China, y como bocadillo bajo en calorías (Taméz, 1987). En la India se usa el tubérculo y leche en la preparación de una bebida con sabor agradable llamada Kheer (Bhag Mal y Kawalkar, 1982). En Malasia se prepara con otros vegetales tiernos y una salsa picante, en un tradicional platillo llamado "rujak" (Sorensen, 1996), en Tailandia no solamente el tubérculo de la jícama es usado como comida, sino además las vainas inmaduras, son consumidas como sustituto de frijoles de Francia. Nutricionalmente las vainas son comparadas con vainas de frijol de soya (Broadbent y Shone, 1963) Bhag Mal y Kawalkar (1982) de la India también informan que algunas veces son cocinadas las vainas inmaduras.

Estudios recientes reportan que el análisis de las semillas maduras se han encontrado desde 0.03 a 0.11 % de rotenona (Lackhan, 1994) a su vez Deshaprabhu (1966) reporta contenidos de 0.5 a 1 %, el cual se utiliza como polvo contra pulgas. El análisis químico de este producto nos indica la existencia de dos compuestos: glucósido pachyrrhizido y glucósido pachyrrhizina (Sorensen, 1990).

2.8.1 Composición

Desde el aspecto nutricio el tubérculo de la jícama es bajo en calorías (una porción de 100 g aporta aproximadamente 55 calorías, es buena fuente de vitamina C (21 mg/100 g de jícama)

contiene calcio, fósforo y agua (90 g de agua/100 g de jícama) (Sorensen, 1996) Su concentración de azúcares de bajo peso molecular es baja (2 a 3 mg/100 g), en cambio el contenido de almidón es mayor (10.5 %) (Casanueva, 1995). Además posee un contenido en fibra cruda de 1.4 g/100 g en base húmeda, este valor representa más de 5 veces el valor de otros productos como la papa (0.13 g/100 g) y el camote (0.29 g/100 g) (Noman *et al.*, 2007).

2.8.2 Producción

La producción de jícama en México tiene gran importancia; en el año 2011 se sembraron 6 583.70 Has, que produjeron 174 702.33 Ton, con un valor comercial de 440 863.06 miles de pesos (SIAP, 2011). Aunque la producción de jícama se encuentra ampliamente distribuida en la República Mexicana, los estados de Nayarit, Veracruz, Morelos, Puebla, y Guanajuato, aportaron el 89.5 % de la producción en 2011, seguidos de los estados de Guerrero, Michoacán, Sinaloa, Jalisco y Colima, en orden de importancia (Tabla 2).

Tabla 2. Producción agrícola de jícama en México

Ciclo: Cíclicos y Perennes 2011						
Modalidad: Riego + Temporal						
JÍCAMA						
Estado	Sup. Sembrada	Sup. Cosechada	Producción	Rendimiento	*PMR	Valor Producción
	(Ha)	(Ha)	(Ton)	(Ton/Ha)	(\$/Ton)	(Miles de Pesos)
BAJA CALIFORNIA SUR	3	3	60	20	3 000.00	180
CAMPECHE	30	0	0	0	0	0
COLIMA	80	80	2 310.00	28.88	4 127.27	9 534.00
GUANAJUATO	450.5	450.5	11 694.00	25.96	1,689.42	19 756.11
GUERRERO	309	309	9 824.50	31.79	1 766.06	17 350.62
JALISCO	163.3	163.3	4 180.78	25.6	2 759.28	11 535.93
MÉXICO	20	20	254.3	12.72	5 233.19	1 330.80
MICHOACÁN	1 204.00	1 204.00	26 152.30	21.72	4 040.59	105 670.75
MORELOS	606	606	19 808.26	32.69	3 656.61	72 431.08
NAYARIT	1 664.00	1 657.00	54 291.24	32.76	2 067.79	112 262.88
PUEBLA	717.4	717.4	14 019.20	19.54	2 083.09	29 203.20
QUERÉTARO	15	15	600	40	2 000.00	1 200.00
QUINTANA ROO	3	3	9	3	3 500.00	31.5
SAN LUIS POTOSÍ	14	14	308	22	4 200.00	1 293.60
SINALOA	15	15	107.25	7.15	2 350.00	252.04
VERACRUZ	1 227.00	1 227.00	30 521.00	24.87	1 836.39	56 048.55
YUCATÁN	62.5	62.5	562.5	9	4 945.78	2 782.00
	6 583.70	6 546.70	174 702.33	26.69	2 523.51	440 863.06

*PMR: precio medio rural

Fuente: Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera, México (SIAP), Agosto 2011

2.9 Yogurt

El consumo y mercado del yogurt ha aumentado rápidamente. Los beneficios nutricionales y de salud de este alimento incluyen: efectos antibióticos, reducción de la intolerancia a la lactosa y malestares gastro intestinales (Labell, 1989). La industria del yogurt ha desarrollado productos nuevos como yogurt bajo en grasa y sin grasa y con mejoramiento de sus propiedades nutricionales (Rash, 1990). Durante los últimos años la adición de nutrimentos en los alimentos ha tenido gran impacto. Los productos lácteos son comúnmente fortificados con vitamina A y D y sólidos de leche no grasos; recientemente se han fortificado con hierro y calcio (Boccio y Monteiro, 2004).

2.9.1 Tipos de yogurt

El yogurt se encuentra en el mercado, generalmente en dos presentaciones, como yogurt asentado y como yogurt batido. Aunque Benezech y Maingonnat (1994) incluyen el yogurt bebible como un tercer tipo, este último será incluido dentro del tipo batido. En el primero, la estructura del gel es desarrollada durante la fermentación llevada a cabo dentro del envase, lo que determina un gel continuo semisólido; mientras que en el yogurt batido la estructura es formada durante la incubación a granel y desintegrada en los procesos posteriores para producir yogurt semiviscoso. El yogurt batido-bebible, es un yogurt de baja viscosidad, consumido normalmente como bebida refrescante (Tamime y Robinson, 1991). Su consumo está incrementando notoriamente en Norte América, por lo general contiene preparados de fruta, sustancias saborizantes y pectina (Basak y Ramaswamy, 1994).

Otra variante es el yogurt congelado, el cuál puede ser duro o suave (Tamime y Robinson, 1991), cuyas características físicas son muy similares a las del helado, pero similar al yogurt en cuanto a su composición, este requiere de altas cantidades de azúcar y estabilizantes para mantener la estructura durante el proceso de congelación y almacenamiento (Tamime y Robinson, 1985).

Actualmente el yogurt congelado es un producto novedosos cuya característica es su de baja acidez, si bien no existen estándares para este producto la industria maneja en general un 0.30 % de acidez titulable con un mínimo de 0.15 % proveniente de la fermentación de las bacterias *Lactobacillus bulgaricus* y *Streptococcus thermophilus* (Davidson *et al.*, 2000). Otro tipo de yogurt es el deshidratado obtenido por procesos de secado por aspersion o liofilización, el objetivo es poder mantener a la leche en forma de un producto estable y fácilmente utilizable (Kumar y Mishra, 2004).

2.10 Aplicación de fibras en la estructuración de yogurt

Sendra *et al.* (2010), estudiaron el efecto de la adición de fibra de naranja sobre las propiedades viscoelásticas de yogurt, evaluaron: (i) dosis de fibra, (ii) tamaño de partícula. Encontraron que en yogures adicionados con fibra, los valores de G' , G'' y viscosidad compleja aumentaron con el contenido de fibra, la estructura vio afectada por tamaños de partícula grande, sin embargo cuando se tiene contenidos altos de fibra la absorción de agua de ésta compensa el efecto de debilitamiento. Los módulos G' , G'' y viscosidad aparente fueron mayores en los yogures con partículas grandes que en los yogures con fibra de menor tamaño.

Wei y Xin-huai (2006) evaluaron la influencia de diferentes espesantes (0.1 % w / w) sobre las características texturales y organolépticas de yogurt; encontraron que al utilizar pectina, gelatina y alginato de sodio incrementaron la viscosidad del yogurt e incrementaron la capacidad de retención de agua y mejora en la textura del yogurt para los dos primeros, comparados con el uso de algunas gomas como de algarrobo, guar y konjac, las cuales disminuyeron la viscosidad y por lo tanto no favorecieron las propiedades de textura.

Ensayos realizados en yogurt por Staffolo *et al.* (2004) donde utilizaron fibras de inulina, bambú, trigo y manzana (1.3 %), en un medio lácteo con un pH entre 4.4 a 4.6 se observó un comportamiento pseudoplástico y que fue descrito con buenos coeficientes de correlación utilizando la ley de potencia (Harte *et al.*, 2005) Las fuerzas de compresión mecánicas mostraron diferencias significativas ($p < 0.05$) entre el yogurt control (sin fibra) y los fortificados, siendo los de trigo y bambú los de mayor valor debido a su mayor carácter insoluble. Además, esta propiedad de acuerdo a Staffolo *et al.* (2004) se vio reflejada en la alta aceptación de los yogures con fibra en las respuestas sensoriales llevadas a cabo de acuerdo a una respuesta hedónica y en la cual la propiedad de textura tuvo una mayor aceptación con más del 50 % del panel de evaluación.

Alatraste (2002) incorporó fibra de coco e higo y observó mejoras en las propiedades fisicoquímicas y de flujo del yogurt, así como del valor nutritivo y grado de aceptación; con lo cual varias de las características de este producto como acidez, color, consistencia, humedad, pH, sólidos totales y viscosidad fueron modificadas en función de la adición de fibra.

Castillo *et al.* (2004), estudiaron la influencia del uso de pectina sobre las propiedades reológicas del yogurt, y obtuvieron que la aplicación de pectina a la concentración de 0.15 % es adecuada, ya que presenta una mejora en las propiedades reológicas, químicas y sensoriales del yogurt.

Díaz *et al.* (2004), mencionan que la adición de fibra y el control del nivel de grasa del yogurt, tiene un efecto en ciertas propiedades fisicoquímicas: mostrando aumentos en acidez, en color se observó un incremento en el valor de L, el valor de a mostró tendencias al color rojo y el valor de b a colores amarillos. También hubo incremento en el pH, menor contenido de sinéresis y los parámetros en textura en función de la consistencia mostraron niveles más altos. La viscosidad aparente y las propiedades reológicas también fueron afectadas de manera importante por la adición de fibra, mostrando valores mayores de coeficiente de consistencia y también aumentó la pseudoplasticidad.

Ramaswamy y Basak (1991), mencionan que la adición de pectina (0.0 a 0.5 %) tiene influencia sobre las propiedades de flujo del yogurt con una tendencia al aumento de dichas propiedades por la adición de la pectina.

En cuanto al uso de la fibra como ingrediente funcional cabe destacar como diversos estudios evalúan el uso de fibras de frutas para la elaboración de alimentos procesados. Tales son los casos de fibras de naranja (Grigelmo-Miguel y Martín-Belloso, 1999b), melocotón (Grigelmo-

Miguel y Martín-Belloso, 1999) y mango (Larrauri *et al.*, 1996), obtenidas como subproductos de la extracción y procesamiento de la pulpa, y que en los tres casos su alta capacidad de retención de agua, entre 7.3 y 12.1 g agua/g fibra, permite su uso para evitar problemas de sinéresis, modificar la viscosidad y textura en los productos formulados, y reducir las calorías si se utilizan como sustitutos totales o parciales de ingredientes con un alto valor energético. También se ha descrito el uso de fibra de manzana y de piel de cítricos como el pomelo, el limón y la naranja (Figuerola *et al.*, 2005).

2.11 Reología

La reología es el estudio físico del comportamiento de los materiales, es una rama de la física que puede definirse como la ciencia de la deformación y de las propiedades de flujo. Se ocupa preferentemente de la deformación de los cuerpos aparentemente continuos y coherentes, pero con frecuencia, trata también de la fricción entre sólidos, del flujo de polvos, e incluso de la reducción a partículas, o molturación (Muller, 1977).

La industria de alimentos utiliza con frecuencia medidas reológicas, pero las obtiene por procedimientos susceptibles de ser considerablemente mejorados. Los alimentos, además de ofrecer un olor, un color y un sabor característicos, exhiben determinado comportamiento mecánico: reaccionan de un cierto modo, cuando se intenta deformarlos (Muller, 1977).

Las propiedades reológicas de los alimentos son importantes para diseñar el proceso del fluido, control de calidad, almacenamiento, procesamiento y predecir la textura del

alimento. La textura que se da durante la coagulación del yogurt es una característica importante que determina la aceptabilidad del producto (Shaker *et al.*, 2000).

De acuerdo a Muller (1977), existen 4 razones fundamentales para justificar el estudio del comportamiento reológico de los cuerpos:

1. Contribuye al conocimiento de su estructura; por ejemplo, existe cierta relación entre el tamaño y forma molecular de las sustancias en disolución y su viscosidad.
2. En la industria se efectúan medidas reológicas en las materias primas y los productos en elaboración, para el control de los procesos.
3. La reología presta una valiosa ayuda al diseño de las máquinas.
4. Las características reológicas influyen en la aceptación de un producto

3 OBJETIVOS

3.1 Objetivo general

Caracterizar las fracciones de fibra soluble de jícama (*Pachyrhizus erosus* L. Urban), evaluar y comparar la sinéresis, arreglo estructural y propiedades reológicas de yogurt batido con y sin fibra soluble.

3.2 Objetivos particulares

- Extraer y cuantificar el contenido de las diferentes fracciones de fibra soluble de jícama (*Pachyrhizus erosus* L. Urban).
- Determinar las propiedades reológicas: módulo de almacenamiento (G'), módulo de pérdida (G'') y factor de cedencia ($\tan \delta$) del yogurt batido con y sin la adición de fibra soluble de jícama.
- Evaluar el cambio en el arreglo microestructural generado por la adición de fibra soluble de jícama en el yogurt batido
- Medir el grado de sinéresis de los yogures durante el tiempo de almacenamiento.

4 HIPÓTESIS

La incorporación de fibra soluble de jícama (*Pachyrhizus erosus* L. Urban) en la elaboración de yogurt batido rendirá un arreglo estructural de la red proteínica distinto al del yogurt batido tradicional, con la ventaja de exhibir propiedades funcionales benéficas para la salud, estabilidad mejorada y características mecánico-sensoriales comparables a aquellas presentadas por un yogurt batido tradicional.

5 MATERIALES Y MÉTODOS

5.1 Materiales.

- Jícama: Tubérculos de *P. erosus* L. Urban se obtuvieron en el mes de febrero, en mercado local de Yautepec, Estado de Morelos, México, este municipio se encuentra en la zona norte del estado de Morelos, localizado en las coordenadas geográficas 18°53' N de latitud y 99°04' O de longitud, a una altura aproximada de 1 210 msnm.
- Oxalato de amonio ($C_2H_8N_2O_4 \cdot H_2O$) (quelante) (Reasol^{MR}, México, D. F.).
- Hidróxido de potasio (KOH) (Reasol^{MR}, México, D. F.).

- Ácido clorhídrico concentrado (HCl) (JT Baker[®], México, D. F.).
- Hidróxido de sodio (NaOH) (JT Baker[®], México, D. F.).
- Membranas tubulares de diálisis de 18 mm de ancho, con un diámetro nominal de corte de 15 kD (Spectrum Laboratories, Inc., CA).
- Leche entera en polvo (NIDO[®], Nestle, S.A. de C.V. México)
- Leche descremada (Lactomix[®], DILAC, S.A. de C.V. México).
- Cultivo láctico liofilizado de inoculación directa (constituido por *Streptococcus thermophilus*, *Lactobacillus bulgaricus* y *Lactobacillus lactis* (CHOOZIT MY 800 – 5 DCU, Danisco Francia SAS 220 Dange Saint Romain, Francia)}
- Agar estéril (código Oxoid L13, Oxoid Limited, Inglaterra).
- Glutaraldehído al 2.0 % (v/v); en una solución amortiguadora de fosfatos (0.1 M, pH 7.2-7.3). (Electron Microscopy Sciences, Washington, EUA.).

5.2 Métodos.

5.2.1 Extracción y purificación de las fracciones de fibra soluble de jícama (*Pachyrhizus erosus* L. Urban).

Previamente a la extracción de la fibra, se determinó el contenido de humedad de la jícama, (AOAC, 2000); con base en los resultados obtenidos se calculó la concentración de sólidos de este tubérculo. Los tubérculos se lavaron con agua caliente para eliminar restos de impurezas, después de lo cual fueron pelados y triturados usando una licuadora industrial hasta obtener una pasta (modelo CB-6, Waring Products Division, New Hartford, CT), esta pasta se secó a 40 °C hasta peso constante.

La extracción y cuantificación de los polisacáridos constituyentes de la fibra de jícama se logró con la combinación de métodos de extracción en secuencia, purificación por diálisis y liofilizado. La pectina, hemicelulosas débilmente fueron extraídas con la metodología descrita por Peña-Valdivia y Ortega-Delgado (1986).

De acuerdo a la metodología señalada, se realizó una extracción secuencial de los polisacáridos a partir del polvo obtenido de la jícama, la cual consistió en lo siguiente: Para la determinación de las pectinas se pesaron muestras de 15 g, se les colocó 30 mL de una solución de $C_2H_8N_2O_4 \cdot H_2O$ (0.5 g/100 mL). La mezcla se calentó en un baño de agua (92 °C, 30 minutos) para la solubilización de la pectina. Posteriormente esta mezcla se colocó en tubos

para centrifuga y fueron puestos en baño maria durante 0.5 horas posteriormente fueron centrifugados (1 400 g, 5 minutos), el sobrenadante fue separado y a la parte solida del centrifugado se le adiciona nuevamente la solución de $C_2H_8N_2O_4 \cdot H_2O$, el procedimiento en la parte solida es repetido hasta obtener tres extracciones.

Las hemicelulosas débilmente unidas fueron extraídas del resto del tejido sin pectina con una disolución acuosa de KOH en una concentración de 5 g/100 mL a 23 ± 3 °C durante 12 h con agitación constante (826 g) en un baño Scientific 360 orbital shaker bath (West Cortland St., Chicago,E.U.A). el sobrenadante fue separado y a la parte solida del centrifugado se le adiciona nuevamente la solución de KOH, el procedimiento en la parte solida es repetido hasta obtener tres extracciones.

Las fracciones de pectina y hemicelulosas débilmente unidas se precipitaron a partir de los sobrenadantes respectivos mediante la adición de cuatro volúmenes de etanol frío (- 20 °C) manteniendo la mezcla a 5 ± 2 °C durante 12 h. La precipitación de las hemicelulosas se complementó con la adición de 4-5 gotas de HCl concentrado. Las fracciones de polisacáridos se recuperaron por centrifugación (1 400 g, 5 minutos), se purificaron por diálisis durante 72 h usando membranas tubulares de diálisis y agua destilada (Álvarez y Peña-Valdivia, 2009) y posteriormente fueron liofilizadas (Lyph Lock® 4.5, Labconco Corporation, MO) a una temperatura de - 49 °C y una presión de 0.420 mbar. A partir de los pesos de la pectina y hemicelulosas débilmente unidas liofilizadas, se calculó su composición porcentual.

5.2.2 Contenido de proteína de la Pectina de *P erosus* L. Urban.

El contenido de proteína asociado a la Pectina de *P erosus* L. Urban se determinó mediante el método Kjeldahl (978.04, AOAC, 1995).

5.2.3 Grado de esterificación de la pectina de jícama

El grado de esterificación (DE) de la fracción de pectina de jícama se determinó por el método de titulación del Food Chemical Codex (FCC, 1981) y USP 26 NF 21 (2003) con ligeras modificaciones (Singthong, *et. al.*, 2004). 500 mg de pectina seca se transfirieron a un matraz de 250 mL, humedecido con 2 mL de etanol y disolvieron en 100 mL de agua libre de dióxido de carbono. Después de que la muestra se disolvió por completo, se añadieron 5 gotas de fenolftaleína y se tituló con NaOH 0.5 M y el resultado fue registrado como el título inicial. Entonces 10 mL de NaOH 0.5 M se adicionaron, la muestra fue agitada vigorosamente y se dejó en reposo durante 15 min; 10 mL de HCl 0.5 M se adicionaron y la muestra fue agitada nuevamente hasta que el color rosa desapareció. Se adicionaron 5 gotas de fenolftaleína y la solución se tituló con NaOH 0.5 M hasta obtener un color rosa pálido que se mantuvo después de agitación (punto final). Este volumen de titulación fue registrado como el título final. El DE fue calculado mediante la siguiente fórmula:

$$\%DE = \text{título final} / (\text{título inicial} + \text{título final}) \times 100$$

5.2.4 Variaciones y proceso de manufactura del yogurt batido

Se elaboraron dos variaciones de yogurt batido (SY): uno sin YSF usado como control (SY_C) y otro conteniendo 1.0 g de YSF (pectina-hemicelulosas débilmente unidas en una relación 1:1) por 100 mL (SY_{YSF}). Lotes de 10 L de cada una de las variaciones de los yogures fueron preparados por triplicado usando un diseño completamente al azar. Mezclas de leche entera en polvo y leche descremada (0.01% de grasa láctea) en polvo se rehidrataron a 40 ± 1 °C con agitación moderada (4 000 rpm, durante 3 minutos) con un homogenizador Ultra-Turra T-50 basic. (IKA Works, Inc., Wilmington, DE) para obtener 22 ± 0.1 g de grasa láctea/L y 120 ± 1 g de sólidos totales/L. Las dispersiones de leche se refrigeraron a 4 °C durante 24 h para completa hidratación de los polvos antes de su uso. Los lotes de leche rehidratada se calentaron a 40 ± 1 °C y se adicionaron con 60 g de sacarosa/L. En este punto la pectina y las hemicelulosas débilmente unidas se incorporaron a los lotes de leche usados para preparar las variaciones de yogurt batido. Previamente, los polisacáridos solubles de *P. erosus* L. Urban se hidrataron a 35 °C aplicando agitación magnética durante 30 min. Ambas leches se pasteurizaron (85 ± 1 °C, 15 min), enfriaron a 45 ± 1 °C e inocularon con un cultivo láctico liofilizado de inoculación directa (0.03 g/L). La fermentación de la leche se llevó a cabo a 45 ± 1 °C hasta obtener una acidez titulable de 80-85 °D. Una vez obtenida la acidez requerida, las variaciones de yogurt batido se enfriaron y almacenaron a 4 °C durante 24 h; después de este tiempo se retiraron de refrigeración y se agitaron suavemente con la ayuda de un mezclador mecánico (Caframo, RZR1, Cole-Parmer, Vernon Hills, IL) a 500 rpm durante 1 min.

Ambas variaciones de yogurt batido se almacenaron bajo refrigeración (4 ± 1 °C) hasta su caracterización química, de sinéresis, microestructural y reológica.

5.2.5 Determinación de composición química y sinéresis de los yogures

Después de tres días de elaborados los yogures se sometieron a determinaciones de proteína por el método Kjeldahl (factor de conversión de 6.25), grasa por el método Gerber y humedad por secado en estufa (AOAC, 2000). La determinación de sinéresis se realizó utilizando el método propuesto por Keogh y Kennedy O' (1998), después de 1 y 14 días de almacenamiento, cuarenta gramos de yogurt batido (4 ± 1 °C) se colocaron en tubos y fueron centrifugados a 222 g durante 10 min a 4 ± 1 °C. El sobrenadante fue decantado, pesado y expresado como porcentaje en peso relativo al peso original del yogurt. Todos los análisis se efectuaron por triplicado.

5.2.6 Determinación de la microestructura de la jícama y de los yogures

Rodajas de jícama, de aproximadamente 2 cm de altura, 1 cm de grosor y 5 cm de largo, se liofilizaron durante 5 días a una temperatura de -49 °C y una presión de 0.420 mBar. Posteriormente, las rodajas de jícama liofilizadas se cortaron en cuadros de 1 cm^2 y fueron recubiertas con una capa delgada de oro en un Fine Coat Ion Sputter JFC1100 (Jeol Ltd., Akishima, Japón) (Sandoval-Castilla *et al.*, 2004) y observaron en un microscopio electrónico de barrido de alto vacío, JEOL Scanning Microscope -5410, (Jeol Ltd., Akishima, Japón), a 10

KV. Se tomaron micrografías representativas de muestras correspondientes al menos a tres piezas de jícama, a ampliaciones de 200, 500, 1500 y 5000×.

Muestras de yogurt batido (≈ 0.3 g) fueron tomadas de aproximadamente 1 cm debajo de la superficie y su arreglo estructural se fijó mediante el uso de una dispersión acuosa (3 g/100) de agar estéril. En cajas Petri se colocó una capa de ≈ 1 cm de grosor de agar a 30 °C, seguida de una capa de yogurt batido de ≈ 1.5 cm de grosor y nuevamente una capa de agar de ≈ 1 cm de grosor (Tamime *et al.*, 1995). Las mezclas de yogurt batido y agar se agitaron suavemente, se dejaron gelificar a temperatura ambiente (20 ± 1 °C) y cortaron en cubos de ≈ 1 cm³, usando una navaja de acero inoxidable. Las muestras geladas se fijaron en una disolución de glutaraldehído por 6 h y deshidrataron mediante su inmersión en disoluciones acuosas de etanol de concentraciones crecientes (50, 60, 70, 80, 90 y 100 %), permaneciendo en cada una por 30 min. Al finalizar el proceso de deshidratación, las muestras se secaron a punto crítico en un equipo Sample Drying at Critical Point Samdri 780 A (Tousimis, Rockville Research Corporation, MD) y se recubrieron con una capa delgada de oro en un Fine Coat Ion Sputter JFC1100 (Jeol Ltd., Akishima, Japón) (Sandoval-Castilla *et al.*, 2004). Finalmente, las muestras se observaron en un microscopio electrónico de barrido de alto vacío, JEOL Scanning Microscope -5410, (Jeol Ltd., Akishima, Japón), a 10 KV. Se tomaron micrografías representativas de tres muestras de cada variación, a dos grados de ampliación 1000 y 5000×. Las micrografías más representativas fueron seleccionadas para su presentación.

5.2.7 Determinación de las propiedades reológicas de los yogures

Mediciones oscilatorias dinámicas de los yogures se llevaron a cabo usando un reómetro (Physica MCR 301 Dynamic Shear Rheometer, Anton Paar Messtechnik, Stuttgart, Alemania), con una geometría de cono-plato, con un cono rotatorio de 50 mm de diámetro y un ángulo de 1° (CP50-1-SN5550), con un gap de 0.05 mm. Las muestras de yogurt batido (≈ 3.8 mL) se colocaron cuidadosamente en el plato y se dejaron reposar por 30 min a 4°C para la recuperación de su estructura y la estabilización de la temperatura. Posteriormente, las muestras de yogurt batido se sometieron a una deformación en el intervalo de 0.05 a 100 %, a una frecuencia de 1 Hz y una temperatura de 4°C para caracterizar la región viscoelástica lineal de estos sistemas alimenticios (Recillas-Mota, 2005). El mantenimiento de la temperatura se logró mediante un sistema de medición y control de temperatura Physica TEK 150P (Physica Messtechnik, Stuttgart, Alemania). Para todos los casos, los valores del módulo de almacenamiento o elástico (G'), módulo de pérdida o viscoso (G'') y factor de cedencia ($\tan \delta$) (G''/G') se obtuvieron mediante el software RheoPlus/32 V2.62. Las curvas de flujo de los yogures fueron obtenidas variando la tasa de corte ($\dot{\gamma}$) de 1 a 300 s^{-1} y los correspondientes valores de esfuerzo de corte (σ) y viscosidad aparente (η_{ap}) fueron medidos. Los datos de las curvas de flujo se fijaron usando el paquete RheoPlus/32 V2.62 a los modelos reológicos de Carreau, Casson, Cross, Herschel-Bulkley y Ellis (Steffe, 1996) que describen el comportamiento de los fluidos independientes del tiempo. Las determinaciones reológicas se realizaron por triplicado a los yogures después de 1 y 14 días de almacenamiento respectivamente.

5.2.8 Evaluación sensorial de los yogures

Para determinar la existencia de diferencias en los atributos sensoriales de los yogures SY_C y SY_{YSF} se realizó una prueba triangular con 80 consumidores de yogurt (38 hombres y 42 mujeres, de 18 a 53 años de edad), los cuales fueron académicos, trabajadores administrativos y estudiantes de la Universidad Autónoma de Chapingo (Texcoco, Estado de México) y establecieron que eran consumidores habituales de yogurt.

Treinta gramos de las variaciones de yogurt batido almacenados durante 12 días fueron colocados en vasos de plástico y codificados al azar usando números de tres dígitos. Cada consumidor recibió tres muestras codificadas de yogurt batido al azar, dos de las cuales eran la misma variación y una era diferente. Se les solicitó a los consumidores elegir la muestra impar de cada conjunto y comentar libremente sobre la diferencia sensorial identificada. El número de consumidores que correctamente seleccionó la muestra impar fue registrado. El análisis de resultados de las pruebas de triángulo se basó en las tablas preparadas por Roessler *et al.* (1948), las cuales proporcionan el número de respuestas correctas necesarias para significancia usando varios números de consumidores.

5.2.9 Análisis de datos

Los datos de composición química, sinéresis y características reológicas de las variaciones de los yogures se sometieron a Análisis de Varianza de Clasificación Simple ($p \leq 0.05$); y en los casos pertinentes se aplicó prueba de Tukey de comparación de medias ($p \leq 0.05$). El análisis de datos se realizó utilizando el software Statgraphics Plus (Statistical Graphics Corp., Manugistics, Inc., Cambridge, MA).

6 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

6.1 Microestructura de tubérculos de *Pachyrhizus erosus* L. Urban.

La microestructura del tubérculo de *P. erosus* L: Urban consistió de células de tamaños variables con paredes celulares delgadas (Figuras 4a y 4b) (Mudahar y Jen, 2006), con superficies lisas y uniformes (Figura 4c). Macia (2006), menciona que la composición de la pared celular de las fibras vegetales está constituida principalmente por celulosa, pectina, lignina y hemicelulosas; dicha composición confiere características de rigidez y dureza a los tejidos, las cadenas de fibras, se encuentran unidas en el seno de los filamentos celulósicos constituyentes de las fibrillas mediante fuerzas atractivas a través de los grupos funcionales hidroxilo de las macromoléculas de fibra a partir de las cuales se extrajeron las fracciones de fibra soluble para esta investigación.

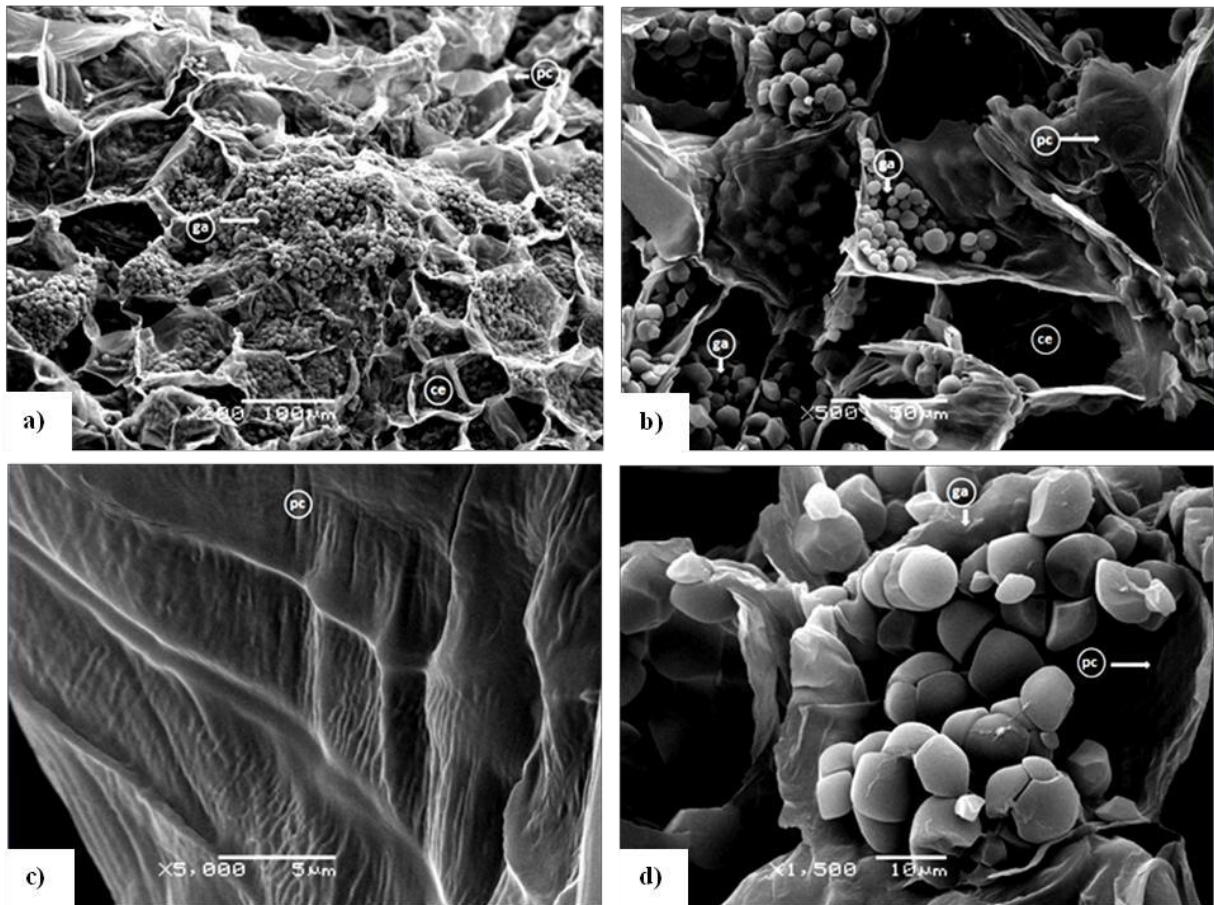


Figura 4. Micrografías electrónicas de barrido del corte transversal de *P. erosus* L. Urban liofilizado: (a) y (b) células de jícama (ce), paredes celulares delgadas (pc), gránulos de almidón (ga), a magnificaciones de 200× y 500×, respectivamente; (c) acercamiento de la estructura de la pared celular, magnificación de 5000× y (d) gránulos de almidón (ga) 1500×.

Se observa en el interior de las células numerosos gránulos de almidón (Figuras 4b y 4d), los cuales tuvieron en general forma poligonal y mostraron diámetros transversal y longitudinal que variaron de 2.1 a 8.2 μm y de 2.5 a 9.6 μm , respectivamente. Stevenson *et al.* (2007), informaron que los gránulos de almidón de jícama cultivada en Texas y en dos localidades de México, presentaron formas esféricas o poligonales, con diámetros que variaron de 1 a 13 μm . El tamaño y forma de los gránulos de almidón son característicos de cada especie y su estructura rígida está formada por capas concéntricas de amilosa y amilopectina, que se

encuentran radialmente distribuidas y que permanecen inalterables durante la molienda, el procesamiento y la obtención de los almidones comerciales utilizados en alimentos (Espín *et al.*, 2004).

6.2 Contenidos en fibra soluble e insoluble de *Pachyrhizus erosus* L. Urban

Los tubérculos de *P. erosus* L. Urban mostraron un contenido de humedad de 87.6 ± 0.8 g por 100 g de jícama (i.e. 12.4 ± 0.2 g de sólidos secos por 100 g de jícama). Sørensen (1990) y Heredia (1998) señalaron que *P. erosus* puede exhibir contenidos de humedad de 78 a 94 %, dependiendo de la región, el clima y la variedad cultivada. El contenido total de fibra dietética de los tubérculos *P. erosus* en base seca fue de 12.6 g/100 g (i.e. 3.5 g /100 g en base húmeda) (Tabla 3), valor acorde a aquél de 3.3 g/100 g en base húmeda informado por Brito y Espín (1999). Variaciones en los contenidos de fibra dietética de *P. erosus* L. Urban han sido atribuidas a diferencias en su contenido de humedad y en consecuencia a su contenido en materia seca; pudiendo variar este último de 8.89 a 13.72 g/100 g dependiendo de la variedad (Espín *et al.*, 2004).

En base seca, la fibra de *P. erosus* L. Urban estuvo constituida por 5.7 % de fibra insoluble y 4.2 % de fibra soluble (Tabla 3). La fibra insoluble comprendió hemicelulosas fuertemente unidas y celulosas en menor proporción; mientras que la fibra soluble estuvo compuesta por pectinas y hemicelulosas débilmente unidas.

El mayor contenido de fibra insoluble con respecto al de fibra soluble en *P. erosus* L. Urban, es acorde a lo informado para la composición de la fibra de vegetales. Li *et al.* (2002), determinaron los contenidos de fibra total dietética, fibra soluble y fibra insoluble de varios vegetales crudos; entre ellos brócoli, coliflor, zanahoria, lechuga y espinaca. En todos los casos el contenido de fibra insoluble fue mayor al contenido de fibra soluble; por ejemplo, la zanahoria contuvo 79.5 % de fibra insoluble y 20.5 % de fibra soluble.

Tabla 3. Contenido de fibra insoluble y fibra soluble en base seca en *P. erosus* L. Urban.

Tipo de fibra	g/100 g de jícama	Fracción de fibra	g/100 g
Soluble	4.2±0.4	Pectina	1.6±0.5
		Hemicelulosas débiles	2.7±0.3
Insoluble	5.7±0.3	Hemicelulosas fuertes	4.08±0.03
		Celulosas	1.63±0.04

Aunque se considera que deben desaparecer de la nomenclatura sobre fibra términos como soluble/insoluble, fermentable/no fermentable y viscosa/no viscosa, estas propiedades son base de su funcionalidad, por lo que desde un punto de vista práctico continúan utilizándose. Los componentes de la fibra soluble en contacto con el agua forman un retículo donde queda atrapada ésta última, originándose dispersiones de gran viscosidad, los efectos derivados de la viscosidad de este tipo de dispersiones son los responsables de sus acciones sobre el metabolismo lipídico, hidrocarbonado y en parte de su potencial anticarcinogénico. (Escudero

y González, 2006). Los componentes de la fibra insoluble por su parte, son capaces de retener el agua en su matriz estructural formando mezclas de baja viscosidad aumentando el volumen del contenido intestinal; produciendo un aumento de la masa fecal que acelera el tránsito intestinal; es la base para utilizar la fibra insoluble en el tratamiento y prevención de la constipación crónica, también contribuye a disminuir la concentración y el tiempo de contacto de potenciales carcinogénicos con la mucosa del colon (Kim, 2000).

Los contenidos de pectina y hemicelulosas débilmente unidas de *P. erosus* L. Urban en base seca fueron 1.6 ± 0.5 g/100 g de jícama y 2.7 ± 0.3 g/100 g respectivamente, en una relación en el tubérculo de 1:1.7, (Tabla 3) comparable a lo informado por Florence *et. al.*, (2006) para remolacha azucarera, con una relación de 1:1.2. Las hemicelulosas débilmente unidas son un grupo de sustancias asociadas con la celulosa, y son generalmente una mezcla de xilanos o xiloglucanos, arabinogalactanos, glucomananos y galactoglucomananos (Carpita, 1996), solubles en agua que tienen una importancia funcional por su capacidad de “ligar” agua y la habilidad de incrementar la viscosidad (Lineback, 1999)

6.3 Grado de esterificación y contenido de proteína de pectina de *P. erosus* L.

Urban

El grado de esterificación (DE) de la pectina de *P. erosus* fue de 46.9 ± 0.4 %, lo que indica que menos del 50 por ciento de los grupos carboxilos de la pectina se encontraban esterificados, clasificándose como pectina de bajo metoxilo (LM; DE < 50%). Teóricamente, el grado de esterificación puede variar desde 0 hasta 100 %. Las pectinas con un grado de

esterificación $DE > 50 \%$ se conocen como pectinas de alto metoxilo (HM) y consecuentemente pectinas de bajo metoxilo (LM) tienen un $DE < 50 \%$ (Van Buren, 1991). El grado de esterificación y por lo tanto la carga de una molécula de la pectina es importante para las propiedades funcionales que imparten a los alimentos. También afecta de manera significativa su uso comercial como agentes gelificantes y espesantes (Morris *et al.*, 2000). El contenido de proteína asociada con la pectina de *P. erosus* L. Urban fue de 0.11 ± 0.10 g/100 g en base seca en comparación con la pectina de melocotón con contenidos en la proteína asociada a la pectina varían de 1.35-6.94 g/100g (Pagan i Gilabert J., 1996), o para pectina de remolacha azucarera que varía desde 2-10.4 g/100g mencionan además que este contenido variara dependiendo del pH y temperatura de extracción (Thibault, 1988; Leroux, *et. al.*, 2003; Williams, *et. al.*, 2005).

6.4 Composición química y grado de sinéresis de los yogures

La composición química proximal de los yogures evaluados en este estudio se presenta en la Tabla 4. El SY_C y SY_{YSF} conteniendo fibra soluble, mostraron contenidos de humedad similares ($p > 0.05$), pero difirieron significativamente en sus contenidos de proteína y de grasa. La adición de los sólidos correspondientes a la fibra soluble (hemicelulosas débilmente unidas y pectina) causó la disminución porcentual en los contenidos de proteína y de grasa del yogurt SY_{YSF} en comparación SY_C (Tabla 4).

Los yogures SY_C , SY_{YSF} después de un día de elaborados, presentaron valores de acidez similares ($p > 0.05$): (Tabla 5); sin embargo, después de 14 días de almacenamiento, los

yogures SY_{YSF} alcanzaron una acidez significativamente mayor a la encontrada en el yogurt SY_C (90.8 ± 0.5 °D) (Tabla 5). Los resultados antes expuestos, indicaron mayor acidez desarrollada en los yogures conteniendo fibra soluble de jícama, respecto a aquella observada en SY_C sin fibra durante el tiempo de almacenamiento. Aumentos en la acidez de yogurt durante su almacenamiento, se relacionan directamente con la transformación progresiva de la lactosa en ácido láctico (Beal *et al.*, 1999). Ramírez-Santiago (2008) informó que los valores de acidez de yogures, en los que se sustituyó la grasa láctea por emulsiones múltiples y la sacarosa por un esteviósido, aumentaron de 88.7 a 90.3 °D después de 15 días de almacenamiento. La acidez de un yogurt debe oscilar entre 80 y 180 °D, la producción de ácido láctico es importante para obtener un yogurt de alta calidad, con sabor propio, cuerpo y textura, esto es para que el producto tenga el mínimo de porcentaje de sinéresis durante el almacenamiento (Ankenman, 1996).

Sin embargo, en los yogures adicionados con componentes de fibra soluble, otros mecanismos pueden ocurrir que promuevan un mayor incremento en los valores de acidez. Soukoulis *et al.* (2007), mostraron que los yogures con goma guar o pectina como estabilizantes tuvieron mayor acidez que las que contienen goma xantana o carragenina. Sendra *et al.* (2008), encontraron que la adición de fibra de cítricos en leches fermentadas mejora el crecimiento y la supervivencia de las bacterias probióticas, que probablemente se vea reflejado por una transformación más rápida de la lactosa en ácido láctico funcionando esta como ingrediente prebiótico.

Tabla 4. Composición química de los tratamientos de yogurt batido

Código	Humedad (g/100 g)	Proteína _{bs} (g/100 g)	Grasa _{bs} (g/100 g)
SY _C	83.5±0.2 ^a	3.1±0.1 ^b	2.2±0.1 ^b
SY _{YSF}	83.1±0.5 ^a	2.6±0.2 ^a	1.9±0.1 ^a

SY_C: yogurt control sin fibra; SY_{YSF}: yogurt con 1 % de fibra soluble de jícama. Superíndices distintos en una misma columna indican diferencia significativa entre las medias. Subíndice bs indican base seca.

Tabla 5. Grado de sinéresis y acidez de los tratamientos de yogurt batido.

Código	Sinéresis (g/100 g)		Acidez (°D)	
	(día 1)	(día 14)	(día 1)	(día 14)
SY _C	17.5±0.1 ^b	23.3±0.4 ^b	84.3±0.6 ^a	90.8±0.5 ^a
SY _{YSF}	11.3±0.3 ^a	15.4±0.2 ^a	84.7±0.7 ^a	93.0±0.2 ^b

SY_C: yogurt control sin fibra; SY_{YSF}: yogurt con 1 % de fibra soluble de jícama. Superíndices distintos en una misma columna indican diferencia significativa entre las medias.

En ambos yogures se observaron incrementos en sinéresis con el tiempo de almacenamiento. Aunque el fenómeno ocurrido durante la sinéresis no es completamente entendido, los incrementos en sinéresis durante el almacenamiento se han asociado con la presencia de reestructuraciones en la red de caseína (van Vliet *et al.*, 1997), que promueven la expulsión del lactosuero. Conforme el pH disminuye en la leche durante la fermentación de la lactosa, la repulsión electrostática y la estérica entre las micelas de caseína adyacentes disminuyen, ocasionando la floculación-agregación de dichas micelas (Fox y McSweeney, 1998; de Kruif, 1999). Aportela-Palacios *et al.* (2005), determinaron el grado de sinéresis de yogures

adicionados con 1.5, 3.0 y 4.5 g de fibra de salvado natural y tostado/100 mL y 50 mg de citrato de calcio/100 mL y compararon los valores obtenidos con el correspondiente a un yogurt control exento de fibra y de citrato de calcio. Estos autores informaron que en un inicio todos los yogures exhibieron sinéresis satisfactoria (menor de 39 %), mostrando además la presencia de fibra un efecto de reducción en la sinéresis de los yogures; sin embargo, con el tiempo de almacenamiento el grado de sinéresis incrementó.

Los valores de sinéresis fueron significativamente menores para el yogurt batido SY_{YSF} que para el SY_C después de 1 y 14 días de almacenamiento (Tabla 5). Los resultados obtenidos indican que la presencia de fibra soluble de *P. erosus* L. Urban contribuyó a disminuir el grado de sinéresis de SY_{YSF}, tanto al inicio como al final del tiempo de almacenamiento. Lo anterior se debe principalmente a la habilidad de este tipo de hidrocoloides para enlazar agua, interactuar con los constituyentes de la leche (principalmente proteínas) y estabilizar la red proteínica, previniendo el libre movimiento del agua (Tamime y Robinson, 1991). En particular es conocido que la pectina es un hidrocoloide aniónico capaz de interactuar con las cargas positivas de la superficie de las proteínas, reforzando la red proteína y controlando la sinéresis (Soukoulis *et al.*, 2007). Las moléculas de pectina pueden interactuar con la caseína a través de iones calcio, previniendo la agregación, sedimentación y en consecuencia la separación del suero a través de efectos de estabilización iónica y estérica (Lucey *et al.*, 1999).

La efectividad observada de la fibra soluble de jícama para disminuir el grado de sinéresis en yogurt batido fue elevada, considerando por una parte, que su concentración en SY_{YSF}, fue de tan solo 1.0 g/100mL y por otra parte, que su acción estabilizante se conservó durante el

tiempo de almacenamiento. Díaz *et al.* (2004), estudiaron el efecto de fibra de salvado, en concentraciones que variaron de 3 a 9 g/100 mL, sobre el grado de sinéresis en yogures, cuyos contenidos grasos estuvieron en el intervalo rango de 2 a 4 g/100 mL, encontrando porcentajes de sinéresis en el intervalo de 45 y 65 %, asimismo informaron que entre mayor fue el contenido de grasa láctea y el de fibra, menor fue el grado de sinéresis; de esta forma, el yogurt batido conteniendo 4 g de grasa/100 mL y niveles de 7 y 9 g de fibra/100 mL presentó valores de sinéresis menores que en el resto de los sistemas.

6.5 Microestructura de los yogures

La microestructura del yogurt batido SY_C (Figura 5) consistió de una red tridimensional de agregados de micelas de caseína, en los que la forma globular de estas últimas es detectable (Figura 5), separados por espacios vacíos que originalmente estuvieron ocupados por el lactosuero. La presencia de bacterias lácticas involucradas en el proceso de fermentación láctica puede ser también observada. Los lactobacilos son los principales responsables de la acidez de las bebidas y se les atribuyen propiedades funcionales para el mejoramiento y la conservación de la salud humana; mientras que los estreptococos confieren textura y sabor a las bebidas lácteas fermentadas (Baron, *et al.*, 2000). Las observaciones estructurales mencionadas, son acordes con lo informado por otros autores en relación a bebidas lácteas fermentadas y yogurt (Kalab *et al.*, 1975; Sandoval-Castilla *et al.*, 2004; Lobato-Calleros *et al.*, 2009.). En la Figura 5, puede observarse la estructura de un glóbulo de grasa integrado a la matriz proteínica del yogurt SY_C, en cuya superficie se depositaron algunas micelas de caseína, probablemente durante el tratamiento térmico aplicado a la leche (Lobato-Calleros *et al.*, 2007).

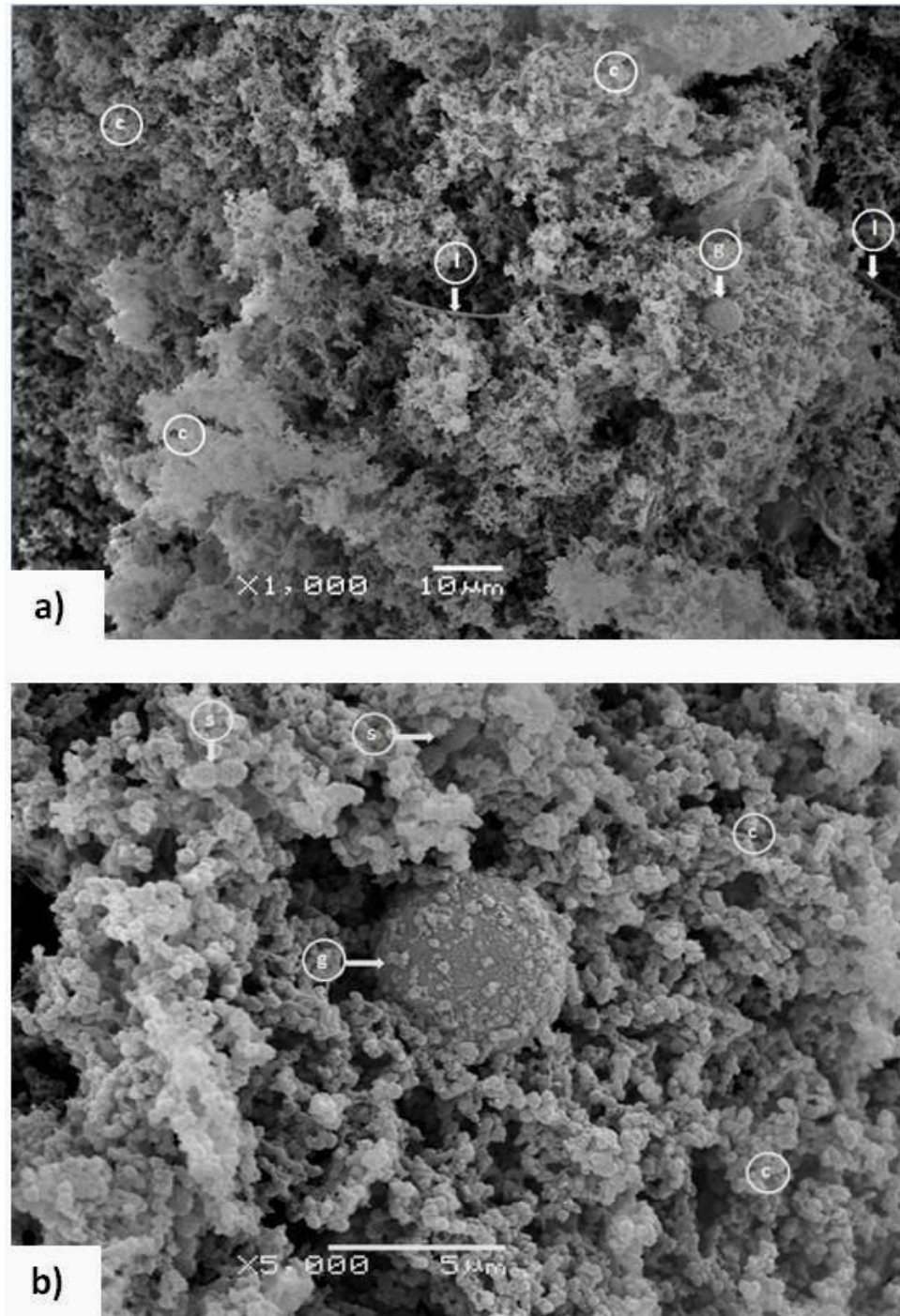


Figura 5. Micrografía electrónica de barrido de SYC, en la que puede apreciarse la formación de una red tridimensional de agregados de micelas de caseína (c); la estructura de un glóbulo de grasa láctea (g) embebido en la red de proteína y la presencia de lactobacilos (l) y de estreptococos (s): a) Magnificación 1 000 ×, barra de escala = 10 μm y b) 5 000 ×, barra de escala = 5 μm

La microestructura del yogurt SY_{YSF} (Figuras 6 y 7) fue muy distinta a la del yogurt SY_C (Figura 5). La microestructura del yogurt SY_{YSF} puede observarse a magnificaciones de 1000× (Figura 6) y 5000× (Figura 7). Es evidente a partir de la Figura 7 que la red proteínica del yogurt SY_{YSF} estuvo formada por agregados de micelas de caseína, pero la red proteínica fue más abierta y relajada que aquella del yogurt SY_C (Figura 5), Marozziene y de Kruif (2000) señalaron que la adsorción e interconexión de micelas de caseína con pectina de bajo metoxilo puede ocurrir a concentraciones bajas de esta última a pH de 5.3. Tromp *et al.* (2004) estudiaron el mecanismo de estabilización de bebidas lácteas, al adicionar 1 g de pectina HM/100 mL después de la fermentación y homogenización, concluyendo que: (a) agregados de complejos de micelas de caseína con pectina adsorbida forman unas redes extensas que proporcionan estabilidad a las bebidas; (b) la pectina no adsorbida contenida en el lactosuero es incorporada dentro de la red por lo que reduce su movilidad y (c) la adsorción de pectina es irreversible, podemos mencionar que se obtuvieron observaciones similares el SY_{YSF} con la adición de pectina de *P. erosus* L. Urban (Figura 7).

En adición, se encontró la presencia de estreptococos y también de estructuras semejantes a algodón de dulce cubriendo la red proteínica, estas estructuras pueden ser atribuidas a la fibra soluble de *P. erosus* L. Urban. La Figura 7 permite distinguir claramente las supra-estructuras semejantes a algodón de dulce y también lactobacilos, no fácilmente detectables en la Figura 6.

Tuinier *et al.* (2002), establecieron que la pectina se adsorbe a la superficie micelar de las caseínas a valores de pH entre 3.5 y 4.8, a través de la combinación de interacciones electrostáticas e hidrofóbicas.

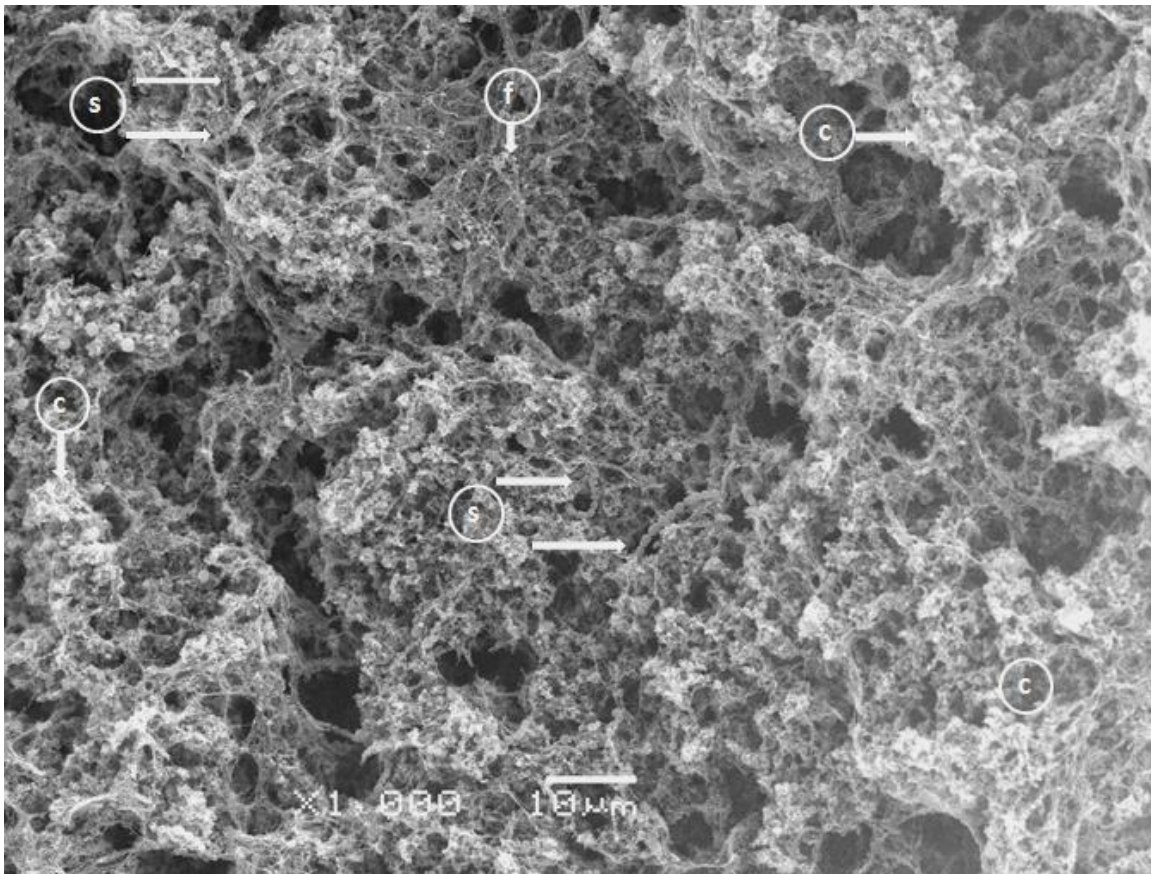


Figura 6. Micrografía electrónica de barrido de SY_{YSF}, en la que puede observarse una red de proteína (c), formada por agregados de micelas de caseína, cubierta por estructuras filamentosas atribuidas a la fibra de jícama (f) y la presencia de estreptococos (s). Magnificación 1 000 ×, barra de escala=10 μm.

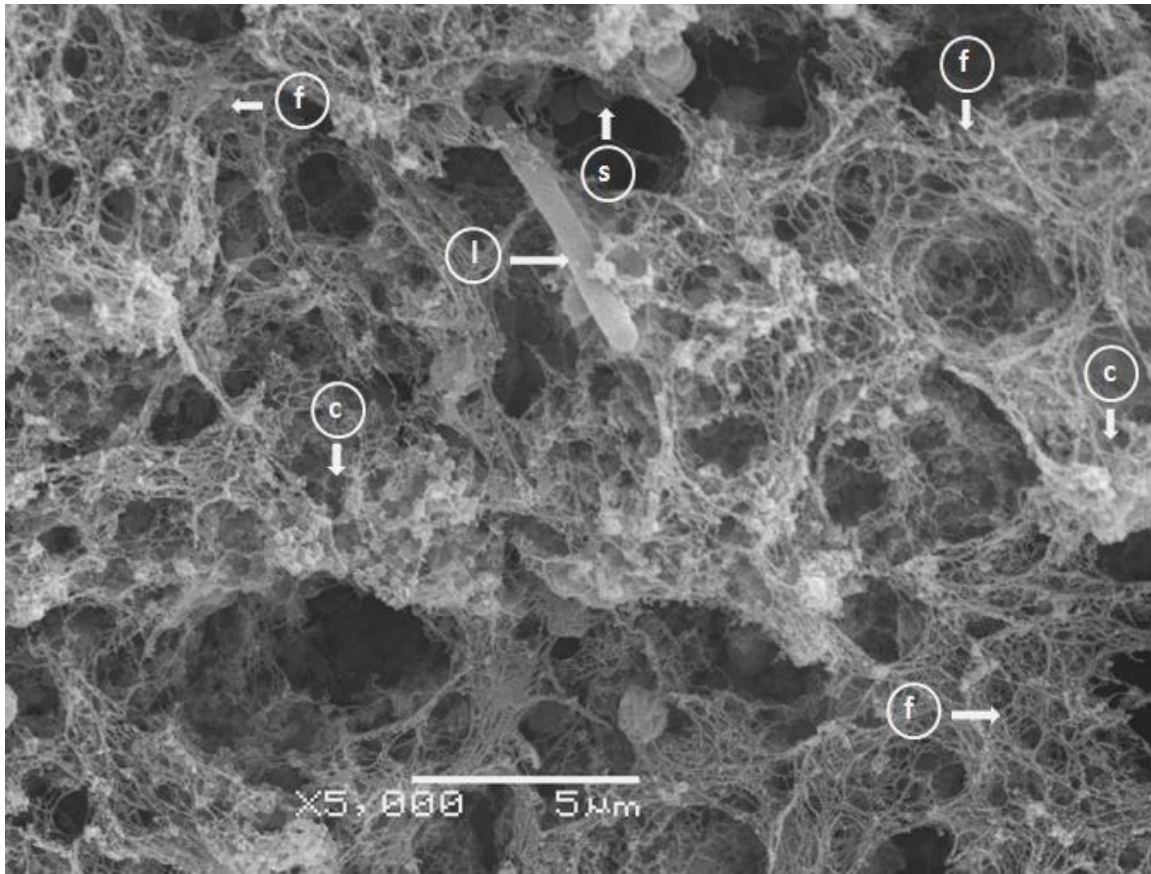


Figura 7. Micrografía electrónica de barrido de SY_{YSF}, en la que se aprecia una red proteínica (c) formada por la agregación de micelas de caseína y cubierta por otra red, constituida por estructuras filamentosas atribuidas a la fibra de jícama (f), así como la presencia de lactobacilos (l) y estreptococos (s). Magnificación 5 000×, barra de escala = 5 μm.

6.6 Comportamiento reológico de los yogures

6.6.1 Reología dinámica

El yogurt es un material viscoelástico, por lo que su comportamiento reológico puede ser descrito por dos parámetros: el módulo de almacenamiento o elástico (G' , el cual es una medida de su elasticidad) y el módulo de pérdida o viscoso (G'' , el cual es una medida de su naturaleza viscosa) (Penna *et al.*, 2001). La Figura 8 muestra las variaciones en los valores de

G' y G'' de los yogures SY_C , y SY_{YSF} en función de la deformación aplicada y el tiempo de almacenamiento (1 y 14 días). Ambos yogures exhibieron comportamiento viscoelástico lineal en el rango de 0.15 a 0.25 por ciento de deformación. Las curvas G' y G'' para ambos yogures mostraron tendencia similar como una función del porcentaje de deformación, caracterizado por una región lineal a bajas deformaciones (menores que 0.30 %) exhibiendo estos parámetros los valores más altos (Tabla 6), seguida por una disminución pronunciada en sus valores a deformación mayores. El inicio de la inflexión pronunciada de los valores de G' y G'' tomó lugar aproximadamente a 0.9 % de deformación en SY_C y 0.7 % en SY_{YSF} (Figura 8).

En todos los casos, G' mostró valores superiores a G'' hasta aproximadamente 40 % de deformación, después de lo cual los valores de G' y G'' se cruzaron. Así, este comportamiento sugiere que ambos yogures exhibieron una naturaleza predominantemente elástica a pequeños porcentajes de deformación, pero conforme el porcentaje de deformación incrementó tomó lugar la ruptura de su estructura hasta que la naturaleza viscosa de los yogures predominó sobre su naturaleza elástica. El comportamiento de ambos yogures es característico de aquellos que exhiben estructuras de gel débiles (Castillo *et al.*, 2004).

Los valores de G' del yogurt SY_C fueron mayores que aquellos mostrados por el yogurt SY_{YSF} bajo cualquier porcentaje de deformación y tiempo de almacenamiento. Estos resultados sugieren que debe existir una relación estrecha entre la composición y microestructura de los yogures con su respuesta reológica. Tunick *et al.*, (1990) sugirieron que la inflexión de los valores de G' en queso puede estar relacionada al rompimiento de su estructura, y que el punto de inflexión corresponde a la cantidad de esfuerzo que la muestra puede soportar antes de su

ruptura. El máximo gradiente en la pendiente de la inflexión de G' con el porcentaje de deformación ocurre cuando se establece un equilibrio entre la ruptura y la reformación de enlaces (Lobato-Calleros *et al.* 2006). De esta manera, parece que una densidad proteínica más elevada y grado de agregación del yogurt batido SY_C (Figura 8) le permite soportar mayores deformaciones que la estructura más relajada y abierta del yogurt batido SY_{YSF} (Fig. 6).

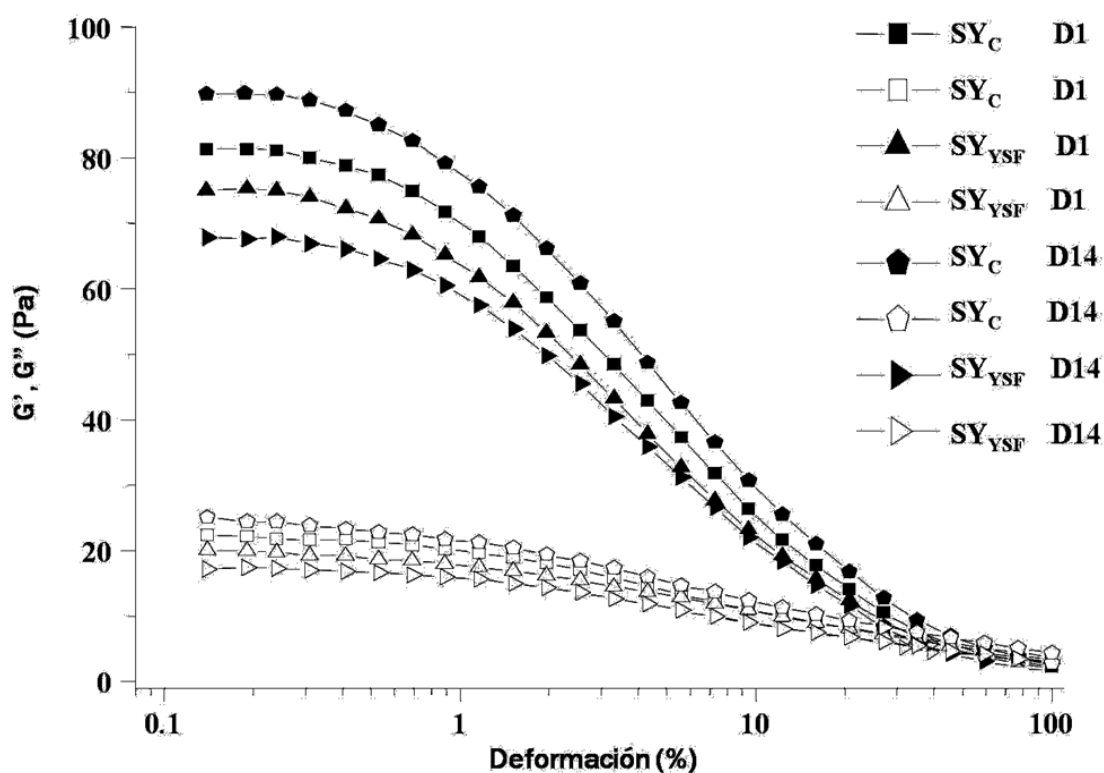


Figura 8. Variación del módulo G' (símbolos rellenos) y del módulo de pérdida G'' (símbolos vacíos) de los yogures como función del % de deformación y el tiempo de almacenamiento.

Tabla 6. Valores de los módulos de almacenamiento (G') y de pérdida (G'') y factor de cedencia ($\text{Tan } \delta$) de los yogures en la región viscoelástica lineal.

Código	G'	G''	$\text{Tan } \delta$	G'	G''	$\text{Tan } \delta$
	(Pa)	(Pa)	(adim)	(Pa)	(Pa)	(adim)
1 día de almacenamiento			14 días de almacenamiento			
SY_C	87.9±0.2 ^b	22.8±0.6 ^b	0.27±0.0 ^a	90.4±0.1 ^a	26.3±0.5 ^b	0.26±0.0 ^a
SY_{YSF}	74.7±0.6 ^a	19.8±0.3 ^a	0.27±0.0 ^a	78.2±0.4 ^a	21.5±0.3 ^a	0.27±0.0 ^a

SY_C: yogurt control sin fibra; SY_{YSF}: yogurt con 1 % de fibra soluble de jícama. Superíndices distintos en una misma columna indican diferencia significativa ($p \leq 0.05$) entre las medias.

La Figura 9 muestra la evolución de $\text{Tan } \delta$ con el porcentaje de deformación y el tiempo de almacenamiento. Inesperadamente, la tendencia general y los valores de $\text{Tan } \delta$ fueron prácticamente los mismos para ambos yogures. Para deformaciones debajo de 1 %, los valores de $\text{Tan } \delta$ fueron casi constantes, pero conforme el % de deformación se incrementó los valores de $\text{Tan } \delta$ incrementaron exponencialmente. Esto significa que ocurrió una conversión continua de la estructura del material en una dispersión viscosa de partículas de caseína (Lee y Lucey, 2006), y bajo estas condiciones los valores del módulo viscoso (G'') progresivamente predominó sobre los valores del módulo elástico (G'). En la Tabla 6, puede observarse que los valores de $\text{Tan } \delta$ en la zona viscoelástica lineal para los yogures batidos SY_C y SY_{YSF} variaron de 0.26 a 0.27.

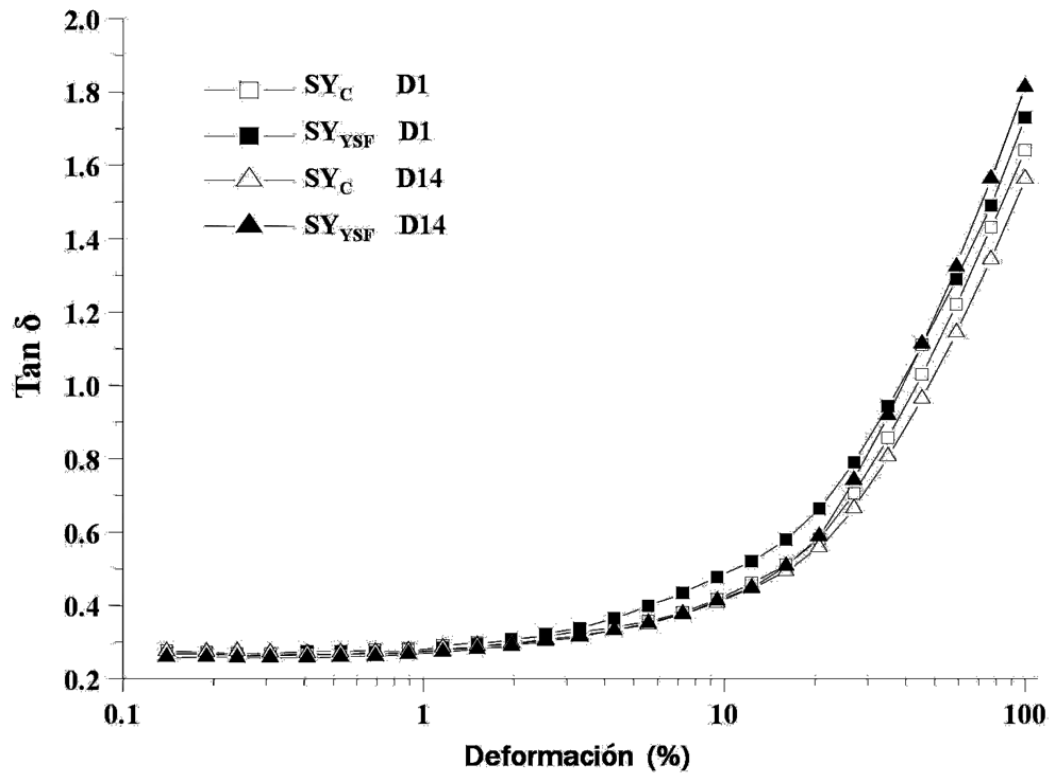


Figura 9. Variación de Tan δ de las variaciones de yogurt como función del porcentaje de deformación y el tiempo de almacenamiento.

6.6.2 Comportamiento de flujo

La Figura 10 muestra las variaciones en la viscosidad aparente (η_{ap}) de los yogures batidos SY_C y SY_{YSF}, como función de la tasa de corte y el tiempo de almacenamiento. Los datos de esfuerzo cortante (σ) contra tasa de corte (γ) de los yogures fueron ajustados a diferentes modelos matemáticos. El modelo que ajustó mejor los datos experimentales ($R^2 = 0.97-0.99$) fue en todos los casos el de Herschel–Bulkley (Steffe, 1996).

$$\sigma = \sigma_0 + K(\gamma)^n$$

Donde: σ es el esfuerzo cortante (Pa); γ es la tasa de corte (s^{-1}); K es el índice de consistencia ($Pa s^n$); n es un número adimensional que indica la cercanía al flujo Newtoniano ($n=1$ para el flujo newtoniano), también llamado como índice de comportamiento de flujo y σ_0 es el esfuerzo de fluencia (Pa) y es el valor mínimo de esfuerzo para detectar una deformación del material (Prentice, 1992).

Los materiales que obedecen este modelo son no newtonianos, en los que la relación entre esfuerzo cortante y la velocidad de deformación no es lineal, que requieren de un esfuerzo mínimo para fluir, llamado esfuerzo de fluencia. Una definición práctica del esfuerzo de fluencia es aquella que lo considera como el esfuerzo debajo del cual no ocurre deformación observable durante el tiempo disponible para tal efecto (Prentice, 1992).

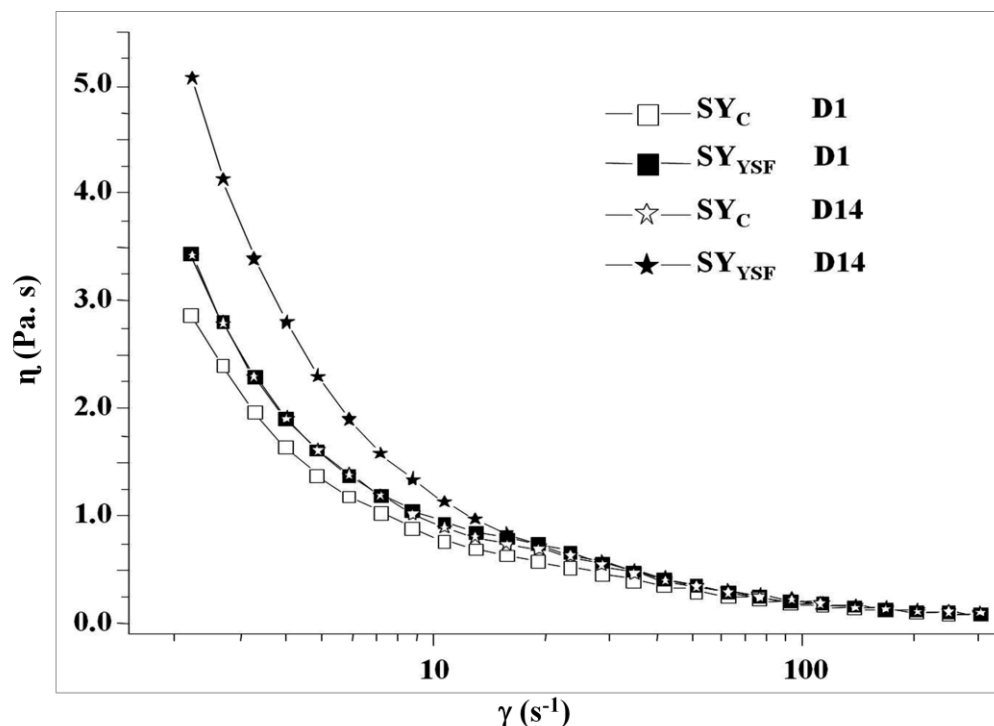


Figura 10. Variación de la viscosidad aparente (η) como función de la tasa de corte (γ) y el tiempo de almacenamiento.

La Tabla 7 muestra los parámetros del modelo Herschel-Bulkley estimados a partir de los datos experimentales. Estos datos indicaron en términos generales que el yogurt batido SY_{YSF} tuvo más consistencia (cuerpo), pero requirió menor esfuerzo para comenzar a fluir y exhibió una desviación mayor del flujo newtoniano que el yogurt batido SY_C, durante todo el tiempo de almacenamiento. Janhøj *et al.* (2008), encontraron que la presencia de pectina y/o carboximetilcelulosa incrementó los valores del índice de consistencia (K) en yogures. Keogh y Kennedy (1998) informaron que K y el grado de sinéresis de yogures batidos fueron afectados en mayor extensión por la adición de grasa láctea, proteína e hidrocoloides (gelatina y goma de xantana) que el índice de comportamiento de flujo (n).

Tabla 7. Valores medios de los parámetros del modelo de Herschel – Bulkley que obedecieron los yogures batidos

Código	Tiempo de almacenamiento							
	1 día				14 días			
	R ²	k (Pa s ⁿ)	n (-)	σ ₀ (Pa)	R ²	k (Pa s ⁿ)	n (-)	σ ₀ (Pa)
SY _C	0.99	1.4±0.0 ^a	0.5±0.0 ^b	4.1±0.0 ^a	0.99	1.4±0.1 ^a	0.5±0.0 ^d	8.8±0.1 ^b
SY _{YSF}	0.97	2.8±0.6 ^b	0.4±0.0 ^a	4.0±0.7 ^a	0.98	2.4±0.2 ^b	0.4±0.0 ^b	4.3±0.3 ^a

SY_C: yogurt control sin fibra; SY_{YSF}: yogurt con 1 g de fibra soluble de jícama /100 mL. Superíndices distintos en una misma columna indican diferencia significativa ($p \leq 0.05$) entre las medias.

van Marle *et al.* (1999), informaron que la adsorción de exopolisacáridos producidos por los microorganismos utilizados en las variaciones de yogurt a las micelas de caseína incrementó

la viscosidad del lactosuero de yogurt batido. La pectina LM es un hidrocoloide aniónico que se adsorbe en la superficie de las micelas de caseína cargadas positivamente, por lo que tiene la capacidad de modificar la fracción del volumen de los agregados de caseína y así contribuir a la viscosidad del sistema (Everett y McLeod, 2005). Lo anterior se refiere a la habilidad de la pectina para rodearse de moléculas de agua y así incrementar la fracción del volumen “efectivo” de los agregados de caseína (volumen ocupado cuando las moléculas o agregados se encuentran rodeados de agua). Cuando el volumen “efectivo” de las moléculas o agregados es mucho mayor que el volumen “actual” de los mismos (volumen ocupado por las moléculas o agregados cuando no se encuentran rodeados de agua) se observan aumentos importantes en la viscosidad del sistema (McClements, 1999).

El yogurt batido SY_{YSF} presentó un carácter pseudoplástico ($n=0.2$) significativamente mayor que el yogurt batido SY_C ($n = 0.25$) con una significancia de $p \leq 0.05$.

La variación de los datos de viscosidad aparente (Figura 10) ($\eta_{+}^K \dot{\gamma}^{n-1}$) confirmó que ambos yogures exhibieron un comportamiento adelgazante al corte. El mecanismo adelgazante para sistemas estructurados, como redes de biopolímeros, involucra la separación de los agregados o cadenas de los biopolímeros (McClements, 1999). El comportamiento adelgazante al corte fue más pronunciado para el yogurt batido SY_{YSF} conforme el tiempo de almacenamiento incrementó. Con base en lo expuesto se puede inferir que en el arreglo estructural del yogurt batido SY_{YSF} intervinieron uniones más débiles y con menor grado de reformación entre biopolímeros en comparación con aquellas que conformaron la estructura de la matriz

proteínica del yogurt batido SY_C. A bajas tasas de corte, donde existe tiempo suficiente para la formación de nuevas uniones entre diferentes patrones de cadenas de biopolímeros, la densidad de entrecruzamiento de la red permanece constante y la viscosidad también permanece constante en un valor máximo denominado viscosidad de corte cero (η_0). A tasas de corte mayores sin embargo, donde la velocidad de re-entrecruzamientos es menor que la velocidad de ruptura de los entrecruzamientos ya existentes, la extensión de las redes disminuye progresivamente al igual que la viscosidad, típicamente por dos o tres órdenes de magnitud sobre el intervalo de tasa de corte de importancia práctica (Morris, 1995; Rao y Rizvi, 1985). La adición de fibra soluble de *P. erosus* L. Urban tuvo el efecto de incrementar la viscosidad y de producir un efecto adelgazante al corte más pronunciado en el yogurt batido, eventualmente ayudando a desarrollar una mejor sensación bucal. (Fig. 10). Ramaswamy y Basak (1991), comentaron que para varios materiales poliméricos, incluyendo yogurt, el índice de comportamiento de flujo decrece conforme el índice de consistencia se incrementa. Penna *et al.* (2001), señalaron que elevados índices de consistencia y alta pseudoplasticidad de bebidas lácteas fermentadas comerciales, incrementaron su grado de aceptación sensorial. Se ha demostrado que soluciones de fibras viscosas como las gomas, con altos valores de n tienden a sentirse “limosas” en la boca. Así, cuando elevadas viscosidades y una sensación bucal limpia son deseadas, la elección debería ser un sistema con gomas teniendo un valor bajo de n (Szczesniak, 1986).

6.7 Evaluación sensorial

Los resultados de las pruebas de triángulo realizadas a los 12 días de elaborados los yogures batidos mostraron que 36 consumidores de 80 fueron capaces de distinguir entre ambos yogures en un nivel de significancia del 5 %. De los 36 consumidores, 6 indicaron que el yogurt batido SY_{YSF} tuvo como atributo distintivo una mayor acidez y una sensación bucal más agradable que el yogurt batido SY_C. La percepción sensorial de estos 6 consumidores concuerda con los niveles experimentales de acidez y las variaciones en viscosidad aparente exhibidas por los yogures después de 14 días de almacenamiento. Hashim *et al.* (2009), informaron que el yogurt incorporado con un máximo de 3 g de fibra dietética/100 g de yogurt tuvieron calificaciones similares de acidez, dulzura, firmeza, lisura y aceptación global que el yogurt control (sin fibra dietética adicionada), pero las calificaciones de apariencia, color, sabor y aceptabilidad del yogurt decreció significativamente cuando la fibra dietética se incrementó a 4.5 g/100 g.

7 CONCLUSIONES

El yogurt batido conteniendo fibra soluble de *P. erosus* mostró menor porcentaje de sinéresis, una red proteínica más abierta y relajada, módulos elástico y viscoso menores, pero más alto índice de consistencia y menor índice de flujo que el yogurt batido control sin la adición de fibra.

Un número significativo de consumidores fueron capaces de distinguir correctamente entre las variaciones de yogurt batido y más aún, unos pocos de los consumidores pudieron identificar los atributos sensoriales que les permitieron distinguirlos, siendo estos el de mayor acidez y mejor sensación bucal del yogurt batido adicionado con fibra, en comparación con el yogurt batido control.

8 REFERENCIAS

1. Alatríste, K. (2002). Efecto de la adición de fibra y calcio en un yogurt con sabor. Tesis de Licenciatura. Universidad de las Américas-Puebla, México.
2. Alvarado-Osuna C, Milian-Suazo F, Valles-Sánchez V. (2001). Prevalencia de diabetes mellitus e hiperlipidemias en indígenas otomíes. *Salud Pública Mexicana*. 43: 459-463.
3. Allen, O.N. and E.K. Allen. (1981). *The Leguminosae. A source book of characteristics, uses and nodulation*. The University of Wisconsin Press. Madison, Wisconsin. USA. pp. 486-487.
4. Álvarez, A. R. and Peña-Valdivia, C. B. (2009). Structural polysaccharides in xoconostle (*Opuntia matudae*) fruits with different ripening stages. *Journal of Professional Association for Cactus Development*. 11: 26-44.
5. American Association of Cereal Chemists. (2001). AACC Dietary Fiber Technical Committee. The definition of dietary fiber. *Cereal Foods World* 2001. 46:112.
6. Anguera, A. (2007). Efectos de la fibra soluble cáscaras de *Plantago ovata* sobre factores lipídicos de riesgo cardiovascular. (Tesis Doctoral en Nutrición y Metabolismo Unidad de Lípidos y Arteriosclerosis). Reus. España. Facultad de Medicina y Ciencias de la Salud. Departamento de Medicina y Cirugía. Universidad Rovira I Virgili. 205 p.
7. Angyal, S. J. (1989). Complexes of metal cations with carbohydrates in solution. *Advances in Carbohydrate Chemistry and Biochemistry*. 47: 1-43
8. Anyas W. L. y Deuel, H. (1950). Uber de Koagulation von Natriumpektinaten. *Helvetica Chimica Acta*. 33: 559-562

9. AOAC. Association of Official Analytical Chemist. (2000). Official Methods of Analysis. Arlington, Virgilia. E. U. A. Ed. The William Byrd.
10. Aportela-Palacios, A., Sosa-Morales, M.E., Vélez-Ruiz, J.F. (2005). Rheological and physicochemical behavior of fortified yogurt, with fiber and calcium. *Journal of Texture Studies*. 36: 333-349.
11. Aspinall, G.O. 1970. Polysaccharides. Pergamon Press, Oxford
12. Baron, M., Roy, D., Vuilleumard, J. (2000). Biochemical characteristics of fermented milk produced by mixed-cultures of lactic starters and bifidobacteria. *Lait*, 80: 465-478.
13. Barquera S, Rivera-Dommarco J, Campos I, Espinoza J, Monterrubio E. (2002). Consumo de fibra y sobrepeso en mujeres mexicanas en edad adulta. *Nutrición Clínica*. 5(4):206-12
14. Basak, S. y Ramaswamy, H. S. (1994). Simultaneous evaluation of shear rate and time dependency of stirred yogurt rheology as influenced by added pectin and strawberry concentrate. *Journal Food Engineering*. 21:385-393.
15. Beal C., Skokanova J., Latrille E., Martin N. y Corrieu. G. (1999). Combined effects of culture conditions and storage time on acidification and viscosity of stirred yogurt. *Journal of Dairy Science*. 82 (4): 673–681.
16. Bhag Mal and T. G. Kawalkar. (1982). Maharastra Farmers can try yam bean. *Indian Farming*. 31 (10): 13-14.
17. Belitz H, y Grosch W. (1997). *Química de Alimentos*. 2da Ed. Editorial Acribia, S.A. Zaragoza. 884 p.
18. Benezech, T. y Maingonnat, J. F. (1994). Characterization of the rheological properties of yogurt – A review. *Journal of Food Engineering*. 21 (4):447-472.
19. Berardini N., Knödler M., Schieber A. y Carle R. (2005). “Utilization of mango peels as a

- source of pectin and poly phenolics”. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*. 6: 442-452.
20. Beristain, C.I., Cruz-Sosa, F., Lobato-Calleros, C, Pedroza-Islas, R., Rodríguez-Huezo, M.E. y Verde-Calvo, J.R. (2006). Applications of soluble dietary fibers in beverages. *Revista Mexicana de Ingeniería Química*, 5(1), 81-95.
21. Boccio, J. y Monteiro, B. J. (2004). Food fortification with iron and zinc: pros and cons from a dietary and nutritional viewpoint. *Revista de Nutrição*. 17(1) pp.71-78.
22. Brito, B. y S. Espín. (1999). Variabilidad en la composición química de raíces y tubérculos andinos del Ecuador. Pp. 13–23 in *Raíces y tubérculos andinos. Avances de investigación*, Vol.1 (T. Fairlie, M. Morales Bermúdez, and M. Holle, eds.). CIPCONDESAN, Lima, Peru.
23. Broadbent, J. H. y G, Shone. (1963). The composition of *Pachyrhizus erosus* (Yam Bean) seed oil. *Journal of the Science of Food and Agriculture*. 14(7): 524-527.
24. Carpita N. C. (1996). Structure and biogenesis of the cell wall of grasses. *Annual Review of Plant Physiology and Plant Molecular Biology*. 47: 445–476
25. Casanueva, E. Ramírez, I., y Alvares, R. (1995). La osteoporosis, una enfermedad silenciosa. *Cuadernos de Nutrición*. 18(6): 21-25.
26. Castillo M. B., Borregales C. y Sanchez M., (2004). Influencia de la pectina sobre las propiedades reológicas del yogur. *Revista de la Facultad de Farmacia*. 46 (2): 33-37.
27. Contreras-Esquivel J. C., Banda-Reyes L., Montañéz- Saenz J.C. (2003). “Extracción enzimática de pectina de mango”. *Memorias del X Congreso Nacional de Biotecnología y Bioingeniería*. Sociedad Mexicana de Biotecnología y Bioingeniería.
28. Contreras-Esquivel J.C., Espinoza-Pérez J.D., Montañéz-Saenz J.C., Charles-Rodríguez

- A.V., Renovato J., Aguilar C.N., Rodríguez- Herrera R. and Wicker L. (2006). "Extraction and characterization of pectin from novel sources". *Advances in Biopolymers*. ACS Symposium Series. 935 (14): 215-229.
29. Córdoba A. (2005). *Caracterización de propiedades relacionadas con la textura de suspensiones de fibras alimentarias*. (Tesis de Doctorado). Valencia. Universidad Politécnica de Valencia. Departamento de Tecnología de Alimentos. 205 p.
30. Correa C., Garza Y., Rodríguez J., Aguilar C.N. y Contreras-Esquivel J. (1999). "Geles de pectina de bajo metoxilo modificadas enzimáticamente". *Revista de la Sociedad Química de México*. 43 (1): 15-17.
31. Davidson, R. H., Duncan, S. E., Hackney, C. R., Eigel, W. N. y Boling, W. J. (2000). Probiotic culture, survival and applications in fermented frozen yogurt characteristics. *Journal of Dairy Science*. 83: 666-673.
32. de Kruif, C.G. (1999). Casein micelles interactions. *International Dairy Journal*. 9: 183-188.
33. De La Llave A. (2004). *Efecto de la adición de fibra soluble sobre las características fisicoquímicas y sensoriales en un producto de panificación*. (Tesis en Licenciatura de Ingeniería de Alimentos). Cholula, Puebla, México. Departamento de Ingeniería Química y Alimentos. Universidad de las Américas Puebla. 86 p.
34. Deshaprabhu, S.B. (1966). *Pachyrhizus spp*. The Wealth of India: Raw Material, Vol. 7. Publ. Inf. Dir. Council of Scientific and Industrial Research. New Delhi. pp 208-210.
35. Deuel, H.; Huber, G.; y Anyas-Weisz, L. (1950). Uber "Salzbrucken" zwischen Makromolekullen von Polyelectrolyten, besonders bei Calciumpektaten. *Helvetica Chemical Acta* 33: 563-567

36. Díaz, J.B., Sosa, M.M.E., Vélez, R.J.F. (2004). Efecto de la adición de fibra y la disminución de grasas en las propiedades fisicoquímicas de yogur. *Revista Mexicana de Ingeniería Química*, 3: 287-305.
37. Espín, S., Villacrés, E., Brito, B. (2004). Caracterización físico-química, nutricional y funcional de raíces y tubérculos andinos. En *Raíces y tubérculos andinos: alternativas para la conservación y uso sostenible en el Ecuador* (Barrera, V., Tapia, C. y Monteros, A. Eds.). Instituto nacional de investigaciones agropecuarias. INIAP - Centro internacional de la papa, Lima, Perú. Capítulo IV: 91-126.
38. Escudero A, Gonzales P. (2006). La fibra dietética. (Artículo científico en línea). *Nutrición Hospitalaria*. (Sup. 2) 61-72 pp. (Consultado el 14 de abril del 2009). Formato pdf. Disponibilidad libre en: <<http://scielo.isciii.es/pdf/nh/v21s2/original6.pdf>>. ISSN 0212-1611.
39. Everett, D.W., McLeod, R.E. (2005). Interactions of polysaccharide stabilizers with casein aggregates in stirred skim-milk yoghurt. *International Dairy Journal*. 15: 1175-1183.
40. F. C. C. (1981). *Food Chemical Codex*. Washington, DC: National Academy of Sciences pp. 283–286.
41. Figuerola, F., Hurtado, M.L., Estévez A.M., Chiffelle, I. y Asenjo, F. (2005). Fiber concentrates from apple pomace and citrus peel as potential fiber sources for food enrichment. *Food Chemistry*. 91: 395-401.
42. Fishman M. L., Chau H.K., Hoagland P. y Ayyad K. (2000). Characterization of pectin, flash-extracted from orange albedo by microwave heating, under pressure. *Carbohydrate Research*. 323: 126-138.

43. Florence, M., Jean-François, T., Jean-Luc, B., and Régis de Baynast. (2006). Preparation and characterization of dietary fiber from sugar beet pulp. *Journal of the Science of Food and Agriculture*. 42(1):77–85.
44. Fox, P.F y McSweeney, P. 1998. *Dairy Chemistry and Biochemistry*. Springer Blackie Academic and Professional. Tullamore. Irlanda. Pp. 56-62.
45. García E, Benito R, Rivera C. (2008). Hacia una definición de la fibra alimentaria. *Escuela de Nutrición. Facultad de Medicina. Universidad Central de Venezuela*. 21 (1): 25-30.
46. Garros-Rosa I, Reicher F, Petkowicz CLO, Sierakowski MR y Moreira RA. (2006). Characterization of the Galactomannans from *Parkinsonia Aculeata* seeds and their application on affinity chromatography. *Polímeros: Ciência e Tecnologia*. 16: 99-103.
47. Grain, J. (2006). Dietary fiber. Definition, analysis, physiology & health. ILSI Europe concise monograph series. International Life Sciences Institute (ILSI). Bélgica, 38 pp.
48. Grigelmo-Miguel, N., y Martín-Belloso, O. (1999). Characterization of dietary fiber from orange juice extraction. *Food Research International*. 31 (5): 355-361.
49. Grigelmo-Miguel N., Ibarz-Ribas A., Martín-Belloso O. (1999b). Rheology of peach dietary fiber suspensions. *Journal of Food Engineering*. 39: 91-99.
50. Hashim I.B., Khalil A.H. and Afifi H.S. (2009). Quality characteristics and consumer acceptance of yogurt fortified with date fiber. *Journal of Dairy Science*. 92(11): 5403–5407
51. Heredia, Z. A. (1998). El cultivo de la jícama (*Pachyrhizus erosus* L. Urban) en la región del Bajío en el estado de Guanajuato, México. In: *Proceedings of 2nd International Symposium on Tuberous Legumes*

52. Hernández-Tinoco A, Ramos-Ramírez EG, Falcony-Guajardo C. y Salazar-Montoya JA. (2004). Rheometry and scanning electron microscopy study of casein curds added with mezquite seed gum and soy proteins. *Latin American Applied Research*. 34:195-202.
53. Iagher F., Reicher F. and Ganter J.L.M.S. (2002). Structural and rheological properties of poly saccharides from mango (*Mangifera indica* L.) pulp. *International Journal of Biological Macromolecules*. 31: 9-17.
54. Institute of Medicine. of the national academies (2005). Dietary Reference Intakes for Energy, Carbohydrate, Fiber, Fat, Fatty Acids, Cholesterol, Protein and Amino Acids (macronutrients). National Academies Press.
55. Janhøj, T., Frøst, M.B., Ipsen, R. (2008). Sensory and rheological characterization of acidified milk drinks. *Food Hydrocolloids*. 22: 798-806.
56. JOINT FAO/WHO Food standards programme codex committee on nutrition and foods for special dietary uses. 29th Session- 2007. ftp://ftp.fao.org/codex/ccnfsdu29/nf29_03e.pdf
57. Kalab, M., Emmons, D.B., Sargant, A.G. (1975). Milk gel structure IV. Microstructure of yoghurts in relation to the presence of thickening agents. *Journal of Dairy Research*. 42: 453-458.
58. Keogh, M. K. and O'Kennedy, B.T. (1998). Rheology of stirred yogurt as affected by milk fat, protein and hydrocolloids. *Journal of Food Science*. 53 (1): 108-112.
59. Kim, Y.I. (2000). AGA technical review: Impact of dietary fiber on colon cancer occurrence. *Gastroenterology*. 118: 1235-1257.
60. Kliemann E., Nunes de Simas K., Amante E., Schwinden E., Teófilo R., Ferreira M., and Amboni R. (2009). " Optimization of pectin acid extraction from passion fruit peel

- (*Passiflora edulis* flavicarpa) using response surface methodology. International Journal of Food Science and Technology. 44: 476-483.
61. Kohn, R. y Luknar, O. (1977). Intermolecular calcium ion binding on polyuronates. Collection of Czechoslovak Chemical Communications. 42: 731-744
62. Kumar P. y Mishra H. N. (2004). Yoghurt Powder—A review of process technology, storage and utilization. Food and Bioproducts Processing. 82(2): 133–142.
63. Kundu, B.C. (1969). Some edible rhizomateous and tuberous crops of India. pp. 124-130 in Proceedings of the International Symposium on Tropical Root Crops (A. Tai, W.B. Charles, P.H. Haynes, E.F. Iton and K.A. Leslie, eds.), St. Augustine, Trinidad, April 2-8, 1967, Vol. 1.
64. Koubala B.B., Kansci G., Mbome L.I., Crépeau M.J., Thibault J.F. and Ralet M.C. (2008). Effect of extraction conditions on some physicochemical characteristics of pectins from “Améliorée” and “Mango” mango peels. Food Hydrocolloids. 22: 1345-1351.
65. Labell, F. (1989). Yogurt cultures offer health benefits – biotechnology to transform the yogurt of the future. Food Processing. 50:130-138.
66. Lackhan, N.K. (1994). Investigations on *in vitro* production of rotenona using *Pachyrhizus erosus* (L) Urban. MPh thesis, Dept. Plant Science, Fac. Nat. Sci., Univ. St. Augustine, Trinidad. 115.
67. Lineback, D. (1999). The Chemistry of complex carbohydrates. Complex carbohydrates in foods. Ed. Cho, S.S., Prosky, L., y Dreher, M., Marcel Dekker, Inc. Basel. pp. 115-129.
68. Martínez, M. 1959. Las plantas medicinales de México. Ed. Botas, México, D.F. pp 192-195

69. Lajolo M, Saura C, Witing P, Wenzel M. (2001). Fibra Dietética en Iberoamérica: Tecnología y salud. Obtención, caracterización, efecto fisiológico y aplicación en alimentos. Ed. Varela. Brasil. 84-358 p.
70. Lapasin R, Priel S. 1999. Rheology of Industrial Polysaccharides – theory and applications. Gaithersburg, Aspen Publishers. apud
71. Larrauri, J. A., Goni, I., Martín-Carron, N., Ruperez, P., y Saura-Calixto, F. (1996). Measurement of health-promoting properties in fruit dietary fibers: antioxidant capacity, fermentability and glucose retardation index. *Journal of Science of Food and Agriculture*. 71: 515-519.
72. Lee, W.J., Lucey, J.A. (2006). Impact of gelation conditions and structure breakdown on the physical and sensory properties of stirred yogurts. *Journal of Dairy Science*. 89: 2374-2385.
73. Leroux, J., Langendorff, V., Schick, G., Vaishnav, V. and Mazoyer, J. (2003). Emulsion stabilizing properties of pectin. *Food Hydrocolloids*. 17: 455
74. Li, B.W., Andrews, K.W., Pehrssonw, P.R. (2002). Individual sugars, soluble, and insoluble dietary fiber contents of 70 high consumption foods. *Journal of Food Composition and Analysis*. 15: 715–723.
75. Lima A. M. P., Cerqueira MA, Susa BW, Teixeira JA, Vicente AA. Moreira RA. (2008). Influence of galactomannans/collagen edible coatings in gas transfer rates in fruit. In: VALNATURA: A Europe-Latin American post-graduate research network in the Valorization of Natural Resources. Media Addict. Porto, Portugal. 82-88 p.
76. Liu Y., Shi J., and Langrish T.A.G. (2006). Water-based extraction of pectin from flavedo and albedo of orange peels. *Chemical Engineering Journal*. 120: 203-209.

77. Lobato-Calleros, C., Recillas-Mota, M. T., Espinosa-Solares, T., Alvarez-Ramirez, J., Vernon-Carter, E. J. (2009). Microstructural and rheological properties of low-fat stirred yogurts made with skim milk and multiple emulsions. *Journal of Texture Studies*. 40: 657-675.
78. Lobato-Calleros, C., Reyes-Hernández, J., Beristain, C.I., Hornelas-Uribe, Y., Sánchez-García, J. E., Vernon-Carter, E.J. (2007). Microstructure and texture of white fresh cheese made with canola oil and whey protein concentrate in partial or total replacement of milk fat. *Food Research International*. 40: 529-537.
79. Lobato-Calleros, C., Rodríguez, E., Sandoval-Castilla, O, Vernon-Carter, E.J. y Alvarez-Ramirez, J. (2006). Reduced-fat white fresh cheese-like products obtained from $W_1/O/W_2$ multiple emulsions: viscoelastic and high-resolution image analyses. *Food Research International*. 39: 678-685.
80. Lobato-Calleros, C., Robles-Martínez, J. C., Caballero-Pérez, J. F., Aguirre-Mandujano, E., Vernon-Carter, E. J. (2001). Fat replacers in low-fat mexican manchego cheese. *Journal of Texture Studies*. 32: 1–14.
81. Lucey, J.A.; Tamehana, M.; Singh, H. y Munro, P.A. (1999). Stability of model acid milk beverage: effect of pectin concentration, storage temperature and milk heat treatment. *Journal of Texture Studies*. 30 (3): 305-318.
82. Macia M. (2006). Las plantas de fibra. En: *Revista Botánica Económica de los Andes Centrales.*: p. 370-384.
83. Maroziane, A., de Kruif, C.G. (2000). Interaction of pectin and casein micelles. *Food Hydrocolloids*. 14: 391–394.

84. McClements, D. J. (1999). Food emulsions: Principles, practice and techniques. CRC Press, Boca Raton, FL, EUA.
85. McMahon, D. J., Alleyne, M. C., Fife, R. L., Oberg, C. J. (1996). Use of fat replacers in low fat Mozzarella cheese. *Journal of Dairy Science*. 79: 1911-1921.
86. Moreira, RA, Castelo-Branco CC, Monteiro ACO, Tavares RO, Beltramini LM. 1998. Isolation and partial characterization of a lectin from *Artocarpus incise* L. seeds. *Phytochemistry*. 47: 1183-1188.
87. Morris, G. A., Foster, T. J., Harding, S. E. (2000). The effect of the degree of esterification on the hydrodynamic properties of citrus pectin. *Food Hydrocolloids*, 14, 227–235.
88. Morris, E.R. (1995). Polysaccharide rheology and in-mouth perception. En: *Food Polysaccharides and their applications* (Stephen, A.M. Ed.). Marcel Dekker, Inc. NY, EUA. Capítulo 16: 517-546.
89. Mudahar, G.S., Jen, J.J. (2006). Texture of raw and canned jícama (*Pachyrrhizus tuberosus*) and Chinese water chestnut (*Eleocharis dulcis*). *Journal of Food Science*. 56 (4): 977-980.
90. Muller, H. G. 1977. *Introducción a la Reología de los Alimentos*. Ed. Acribia. Zaragoza, España. pp. 174-180.
91. Nakamura, A., Yoshida, R., Maeda, H., Corredig, M. (2006). The stabilizing behaviour of soybean soluble polysaccharide and pectin in acidified milk beverages. *International Dairy Journal*. 16: 361-369.
92. Noman, A. S. M., Hoque, M. A., Haque, M. M., Pervin, F., Karim, M. R. (2007). Nutritional and anti-nutritional components in *Pachyrrhizus erosus* L. tuber. *Food Chemistry*. 102: 1112-1118.

93. Olaiz-Fernández G, Rivera-Dommarco J, Shamah-Ley T, Rojas R, Villalpando- Hernández S, Hernández-Avila M, Sepúlveda-Amor J. (2006). Encuesta Nacional de Salud y Nutrición. Cuernavaca, México: Instituto Nacional de Salud Pública.
94. Olsen Robert L. (1989). Effects of polysaccharides on rennet coagulation of skim milk proteins. *Journal Dairy Science*. 72: 1695-1700.
95. Pagan i Gilabert J. (1996). Degradación enzimática y características físicas y químicas de la pectina del bagazo de melocotón. Universitat de Lleida. Departament de Tecnologia d'Aliments. Servei de Publicacions. I S B N: 89-89727-64-3. Depósito Legal: S. 54-98
96. Patmore J V, Goff H D y Fernandes S. (2003). Cryo-gelation of galactomannans in ice cream model systems. *Food Hydrocolloids*. 17: 161-169.
97. Penna, A., Sivieri, K., Oliveira, M. (2001). Relation between quality and rheological properties of lactic beverages. *Journal of Food Engineering*. 49: 7-13.
98. Pires N. R, da Cunha P. L. R, de Paula R. C. M y Feitosa J. P. A. (2010). Viscoelásticos oftálmicos: comparação entre os comerciais e formulações de galactomanana de *Dimorphandra gardneriana*. *Quimica Nova*. 33:1709-1713.
99. Pongsawatmanit P, Temsiripong T, Suwonsichon T. (2007). Thermal and rheological properties of tapioca starch and xyloglucan mixtures in the presence of sucrose. *Food Research International*. 40: 239–248.
100. Prentice, H. (1992). *Dairy Rheology. A concise guide*. VCH Publishers, Inc. NY, EUA.
101. Priego M. (2007). Obtención de Fibra Dietética a Partir de Sáculos de Naranja aplicando un Tratamiento con Vapor. (Tesis para optar el título de Ingeniero en Alimentos). Huajuapán de León. México. Universidad Tecnológica de la Mixteca. 64 p.

102. Ramaswamy H.S., y Basak S. (1992). Pectin and raspberry concentrate effects on the rheology of stirred commercial yogurt. *Journal of Food Science*. 57 (2): 357–360
103. Ramaswamy, H.S., Basak, S. (1991). Rheology of stirred yogurts. *Journal of Texture Studies*. 22: 231-241.
104. Ramírez Santiago, C. (2008). Propiedades estructurales, reológicas y sensoriales de yogur al sustituir la grasa láctea por emulsiones múltiples y la sacarosa por un esteviósido. Tesis para obtener el grado de Maestro en Ciencias en Ciencia y Tecnología Agroalimentaria. Universidad Autónoma Chapingo.
105. Rao, M. A., Rizvi, S. S. (1985). *Engineering properties of foods*. Marcel Dekker, Inc. NY, EUA.
106. Rash, K. 1990. Compositional elements affecting flavor of cultured dairy foods. *Journal of Dairy Science*. 73:3651-3656.
107. Recillas-Mota, M.T. (2005). Comportamiento reológico y estructural de bebidas lácteas fermentadas conteniendo emulsiones aceite-en-agua y agua–aceite–en–agua formuladas con diferentes agentes emulsificantes y estabilizantes. Tesis para obtener el grado de Maestro en Ciencias en Ciencia y Tecnología Agroalimentaria. Universidad Autónoma Chapingo.
108. Redeschi MCM, Preparação e caracterização de filmes a base de xiloglucana extraída de sementes de *Hymenaea courbari* l(jatobá). (2006). Tesis de Maestría. Pós-Graduação em Ciências Farmacêuticas. Faculdade de Ciências Farmacêuticas, UNESP.
109. Rees, D. A.; Morris, E. R.; Thom, D.; y Madden, J. K. (1982). Shapes and interactions of carbohydrate chains. En *The Polysaccharides*. G.O. Aspinall (Ed.). pp. 195-290. Academic Press, New York

110. Rocha C., Teixeira J.A., Hilliou L., Sampaio P. and Goncalves M.P. (2009). Rheological and structural characterization of gels from whey protein hydrolysates/locust bean gum mixed systems, *Food hydrocolloids*. 23: 1734-1745.
111. Roessler E. B., Warren J. y. Guymon J. F. (1948). Significance in triangular taste tests. *Journal of Food Science*.13, (6): 503–505,
112. Rose, J.K.C., K.A. Hadfield, J.M. Labavitch and A.B. Bannett. (1998). Temporal sequence of cell wall disassembly in rapidly ripening melon fruit. *Plant Physiology*. 117: 345-361.
113. Sánchez B. (2005). Caracterización Fisicoquímica y funcional de la fibra dietética del fruto del níspero (*Eriobotrya japonica*) y de cáscara de mango Obo (*Mangifera indica* L). (Tesis para optar el grado de Ingeniero en Alimentos). Huajuapán de León. México. Universidad Tecnológica de la Mixteca. 76 p.
114. Sandoval-Castilla, O., Lobato-Calleros, C., Aguirre-Mandujano, E. and Vernon-Carter, E. J. (2004). Microstructure and texture of yogurt as influenced by fat replacers. *International Dairy Journal*. 14: 151–159.
115. Schols H. A., Visser R. G. F. and Voragen A. G. J. Pectins and pectinases. Netherlands. Wageningen Academic Publishers, 2009.
116. Secretaría de Salud (2007). Programa Nacional de Salud 2007-2012. Por un México sano: construyendo alianzas para una mejor salud. Primera edición, D.R.©
117. Sendra E. Kuri V., Fernández-López J., Sayas-Barberá E., Navarro C., Pérez-Alvarez J. A. (2010). Viscoelastic properties of orange fiber enriched yogurt as a function of fiber dose, size and thermal treatment. *Food Science and Technology*. 43 (4): 708–714

118. Sendra, E., Fayos, P., Lario, Y., Fernández-López, J., Sayas-Barberá, E., Pérez-Alvarez, J.A. (2008). Incorporation of citrus fibers in fermented milk containing probiotic bacteria. *Food Microbiology*. 25: 13-21.
119. Shaker, R. R., Jumah, R. Y. y Abu-Jdayil, B. (2000). Rheological properties of plain yogurt during coagulation process: impact of fat content and preheat treatment of milk. *Journal of Food Engineering*. 44:175-180.
120. SIAP. (2011). Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera, SAGARPA.
121. Silva MR, Silva MS, Martins KA, Borges S. (2001). Utilização tecnológica dos frutos de jatobá-do-cerrado e de jatobá-da-mata na elaboração de biscoitos fontes de fibra alimentar e isentos de açúcares. *Ciência Tecnología y Alimentación*., Campinas. 21: 176-182.
122. Shcherbukhin, V.D. (1993). Galactomannans of native flora. *Appl. Biochemical Microbiology*. 29:599-606.
123. Singthong, J., Cui, S. W., Ningsanond, S. and Goff, H. D. (2004). Structural characterization, degree of esterification and some gelling properties of Krueo Ma Noy (*Cissampelos pareira*) pectin. *Carbohydrate Polymers*. 58: 391-400.
124. Sorensen, M. 1996. Yam Bean (*Pachyrhizus* D.C.) Promoting the conservation and use of underutilized and neglected crop. 2 Institute of Plant Genetics and Crop Plant Research, Gaterlieber International Plant Genetic Resources Institute Rome.
125. Sørensen, M. (1990). Observations on distribution ecology and cultivation of the tuber-bearing legume genus *Pachyrhizus* Rich. ex DC (Fabaceae Phaseoleae), Wageningen Papers. 90(3): 1-38.

126. Sorensen, M. (1988). A taxonomy revision of the genus *Pachyrhizus* (Fabaceae - Phaseoleae). Nord. Journal Botanical. 8 (2): 167-191.
127. Soukoulis C. M., Linden S. y Wegener M. (2007). Negative refractive index at optical wavelengths. Science 5. 315 (5808): 47-49
128. Sousa F. D., Guillermo C G. Martínez-Ávila, A C, Monteiro-Moreira, C N Aguilar y Renato A. (2010). Perspectivas biotecnológicas de hemicelulosas vegetales Revista Científica de la Universidad Autónoma de Coahuila 2 (4).
129. Staffolo, M., N. Bertola, M. Martino y A. Bevilacqua. (2004). Influence of dietary fiber addition on sensory and rheological properties of yogurt. International Dairy Journal. 14: 263-26.
130. Stainsby G. (1980). Proteinaceous gelling systems and their complexes with polysaccharides, Food Chemistry. 6: 3-14.
131. Stevenson, D., Jane, J.L., Inglett, G. (2007). Characterization of jícama (mexican potato) (*Pachyrhizus erosus* L. Urban) starch from taproots grown in USA and Mexico. Starch/Starke. 59(3-4):132-140.
132. Steffe, J. (1996). Rheological Methods in Food Process Engineering. USA: Michigan State University.
133. Sudahakar D.V. and Maini S.B. (2000). Isolation and characterization of mango peel pectins. Journal of Food Processing Preservation, 24: 209-227.
134. Taméz - Guerra, P. (1987). Estudio sobre la Simbiosis Rhizobium- Jícama (*Pachyrhizus erosus* L. Urban. Tesis de Maestría en Ciencias. CINVESTAV-IPN Unidad Irapuato. México.

135. Tamime, Adnan Y.(1995). Microbiological and technological aspects of milks fermented by bifidobacterias. *Journal of Dairy Research*. 62: 151-187
136. Tamime, A. Y. y Robinson. R. K. 1991. *Yogur ciencia y tecnología*. Ed. Acribia, España.
137. Tamime, A. Y. y Robinson, R. K. 1985. *Yogurt: Science y Technology*. Pergamon Press, Oxford.
138. Thibault, J.-F. (1988). Characterisation and oxidative crosslinking of sugar-beet pectins extracted from cossettes and pulps under different conditions. *Carbohydrate Polymers*. 8: 209.
139. Timell, T.E. (1964). *Advance Carbohydrates Research*. 11:293-301.
140. Timell, T.E. (1965). Wood hemicelluloses. *Advance in Carbohydrates Chemical and Biochemical*. 20:409-483.
141. Tromp, R.H., de Kruif, C.G., van Eijk, M., Rolin, C. (2004). On the mechanism of stabilisation of acidified milk drinks by pectin. *Food Hydrocolloids*. 18: 565-572.
142. Trumbo, P., Schliker, S., Yates, A., Poos, M. (2002). Dietary references intakes for energy carbohydrate, fiber, fatty acids, cholesterol, protein, and amino acids. *Journal of the American Dietetic Association*. 102 (11): 1621-1630.
143. Tuinier, R., Rolin, C., de Kruif, C. G. (2002). Electrosorption of pectin onto casein micelles. *Biomacromolecules*. 3(3): 632–638.
144. Tunland, B.C., Meyer, D. (2002). Nondigestible oligo- and polysaccharides (dietary fiber): their physiology and role in human health and food. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*. 1: 73-92.

145. Tunick, M.H., Nolan, E.J., Shieh, J.J., Basch, J.J., Thompson, M.P., Maleeff, B.E., Holsinger V. H. (1990). Cheddar and cheshire cheese rheology. *Journal of Dairy Science*. 73: 1671-1675.
146. USP 26 NF 21 (2003). *The United States Pharmacopeia—The National Formulary*. Rockville, MD: United States Pharmacopeial Convention pp. 1401–1402.
147. Van Buren, J. P. (1991). Function of pectin in plant tissue structure and firmness. En: *The Chemistry and Technology of Pectin*. Reginald Walter (ed.). Chapter 1. Academic Press, New York.
148. van Marle, M. E., van den Ende, D., de Kruif, C. G., Mellema, J. (1999). Steady-shear viscosity of stirred yoghurts with varying ropiness. *Journal of Rheology*. 43: 1643–1662.
149. van Vliet, T., Lucey, J.A., Grolle, K., Walstra, P. (1997). Rearrangements in acid-induced casein gels during and after gel formation. En *Food colloids: proteins, lipids and polysaccharides* (Dickinson, E., Bergenstahl, B. Eds.). Royal Society of Chemistry, Cambridge, Reino Unido (pp. 335–345).
150. Vendruscolo CW. (2005). Goma xantana e galactomana (M. scabrella): desenvolvimento de matrizes hidrofílicas para liberação modificada de teofilina. Tesis de maestría. Pós-graduação em Ciências Farmacêuticas. Universidade do Vale do Itajaí.
151. Szczesniak, A. S. (1986). Sensory texture evaluation methodology. *Rock Recipe Meat Code: 3936*.
152. Waldron K.W. and Faulds C.B. (2007). Cell Wall polysaccharides: composition and structure. *Comprehensive Glycoscience*. 1(05), pp. 181-201.

153. Wei W., y Xin-huai Z. (2006). Influence of thickeners on the texture of yogurt. Lab of Dairy Science of Ministry of Education, Northeast Agricultural University, Harbin 150030, China, China Dairy Industry. 11
154. Williams, P.A., Sayers, C., Viebke, C., Senan, C., Mazoyer, J. and Boulenguer, P.J. (2005). Elucidation of the emulsification properties of sugar beet pectin. *Journal Agriculture Food Chemistry*. 53: 3592.
155. WHO. (2003)., Diet, Nutrition and the Prevention of Chronic Diseases TRS 916, Geneva
156. Ye A. (2008). Complexation between milk proteins and polysaccharides via electrostatic interaction: principles and applications – a review. *International Journal of Food Science and Technology*. 43: 406-415.
157. Zambrano Z, de la Luz M, Hernández A, Gallardo Y. (1998). Caracterización fisicoquímica del nopal. En temas de Tecnología de alimentos. Vol. 2. Fibra dietética. Editado por Lajolo M. y Wenzel E. CYTED. Instituto Politécnico Nacional, México. 29-41 pp.
158. Zúñiga-Morales M. C. (2005). Caracterización de fibra dietaria en orujo y capacidad antioxidante en vino, hollejo y semilla de uva. (Tesis de Licenciatura en Ingeniería Agronómica). Asesor. Dr. Peña Álvaro y Chiffelle Italo. Santiagode Chile. Facultad de Ciencias Agronómicas, Universidad de Chile. 58 p.

9 ANEXOS

9.1 Anexo 1: Enrichment of stirred yogurt with soluble dietary fiber from *Pachyrhizus erosus* L. Urban: Effect on syneresis, microstructure and rheological properties.



Enrichment of stirred yogurt with soluble dietary fiber from *Pachyrhizus erosus* L. Urban: Effect on syneresis, microstructure and rheological properties

C. Ramirez-Santiago^a, L. Ramos-Solis^b, C. Lobato-Calleros^b, C. Peña-Valdivia^c, E.J. Vernon-Carter^d, J. Alvarez-Ramírez^{d,*}

^a Departamento Biotecnología, Universidad Autónoma Metropolitana-Iztapalapa, Mexico, D.F. 09340, Mexico

^b Departamento de Preparatoria Agrícola, Universidad Autónoma Chapingo, Km. 38.5 Carretera México-Texcoco, 56230 Chapingo Texcoco, Edo. Mexico, Mexico

^c Posgrado en Botánica, Colegio de Posgraduados, Km. 35.5 Carretera México-Texcoco, 56230 Montecillo, Texcoco, Edo. Mexico, Mexico

^d Departamento de Ingeniería de Procesos e Hidráulica, Universidad Autónoma Metropolitana-Iztapalapa, Mexico, D.F. 09340, Mexico

article info

Article history:

Received 23 March 2010

Received in revised form 23 June 2010

Accepted 25 June 2010

Available online 3 July 2010

Keywords:

Pachyrhizus erosus

Syneresis

Microstructure

Rheology

Stirred yogurt

Yam soluble fiber

abstract

Yam soluble fiber (YSF) extracted from *Pachyrhizus erosus* was added (1 g per 100 mL) to a stirred yogurt (SY_{YSF}). Its syneresis and microstructure properties were evaluated and compared to those of a stirred yogurt (SY_C) without added YSF. The SY_C yogurt exhibited a more compact casein micelle aggregates network than that of the SY_{YSF} yogurt which was more open, relaxed and covered with fibrous structures attributed to the YSF components. The rheological analysis showed that the SY_{YSF} yogurt had lower storage modulus (G') and loss modulus (G'') values in the linear viscoelastic region than the SY_C yogurt, but its flow behavior was characterized by a lower flow index (n), higher consistency index (k), and higher yield stress (S_0) than the SY_C yogurt. Incorporation of the YSF reduced significantly the syneresis and produced a more acceptable mouthfeel in the SY_{YSF} yogurt in comparison to the SY_C yogurt, indicating the viability of the process to obtain a commercial product.

© 2010 Elsevier Ltd. All rights reserved.

1. Introduction

Dietary fiber (DF) is the edible parts of plants or analogous carbohydrates that are resistant to digestion and absorption in the human small intestine with complete or partial fermentation in the large intestine (AACC, 2001). The DF components are usually grouped into two major classes depending on their simulated intestinal solubility: soluble (pectins, mucilage, loosely bound hemicelluloses, beta-glucans, and a large range of non-digestible oligosaccharides, including inulin) and insoluble (cellulose, lignin, and tightly bound celluloses) (Rodríguez et al., 2006; Alvarez and Peña-Valdivia, 2009). The insoluble components of the fiber seem to be related to the intestinal regulation, whereas the soluble components of the fiber are associated to the decrease of cholesterol levels and the adsorption of intestinal glucose (Schneeman, 1987). Several epidemiological studies have established that a direct link exists between high-fiber diets consumption and a reduced risk of several chronic diseases such as large bowel cancer, cardiovascular disease, obesity, diabetes mellitus, colonic diverticulosis and constipation, among others (Viertanen and Aro, 1994; Ascherio and Willet, 1995; Kimm, 1995; Davidson and McDonald,

1998; Kim, 2000). Despite the proven healthful influence of DF on chronic disease risk reduction, the average worldwide ingestion of this component is still considerably lower than the recommended daily intake levels for men (38 g) and women (25 g) aged 50 years or younger (Duxbury, 2004; Schofield, 2004). This has prompted efforts to add DF into food products. In fact a large and potential market for rich-fiber ingredients and foods has been developed in recent years (Chau and Huang, 2003). Although fiber incorporating in common foods has the advantage of requiring few dietary changes for the population, when formulating rich-fiber food products one must consider that DF ingredients show both physiological and technological functional properties, thus their addition will also alter process and handling of food products as well as their texture, color, flavor, and taste (Izydorczyk et al., 2008). An ongoing research topic is to investigate and develop fiber ingredients that from a functionality perspective may play a number of roles, among others to provide specific finished food attributes, such as texture and mouthfeel, and stability properties (Pszczola, 2008).

New sources of fiber are recommendable to explore for several reasons: (a) for designing novel food systems considering the precise technological and physiological functionality of DF depending on its sources and chemical composition; (b) to contribute to the social and economic development of local producers by

* Corresponding author. Tel.: +52 55 58044649; fax: +52 55 58044645.

E-mail address: jjar@xanum.uam.mx (J. Alvarez-Ramírez).

successfully applying the fiber components of native plants in food systems; and (c) to promote higher acceptability of fiber-rich products and ingredients, using local and traditionally consumed plants as sources of DF.

Pachyrhizus erosus L. Urban, an underutilized crop, is a tuberous legume commonly grown on commercial farms and intercropped with maize and beans on smaller farms, for its edible root. The irregularly globular, brown-skinned tubers are white-fleshed, crisp, and juicy. There are two varieties, those with clear juice and those with milky juice. Both have a mild flavor and are eaten raw or cooked. The edible portion of *P. erosus* is about 87.1% water, 1.2% protein, 0.1% fat, 10.6% carbohydrate, and 0.7% crude fiber (Fernandez et al., 1997; Encyclopædia Britannica, 2010). Some studies have suggested that the functional properties of *P. erosus* starch allow this plant to be used as a potential new source of starch (Mélo et al., 2003). Micro- and macro-nutrient analysis revealed the tuber to be potential source of potassium, sodium, phosphorus, calcium and magnesium, suggesting that *P. erosus* could be included in dietary formulae for humans, especially in those areas where carbohydrate is in short supply (Noman et al., 2007).

Health has always been a popular selling concept in both the dairy and juice categories. Besides, the trend in beverages positioned with a “natural” claim continues to spiral (Sloan, 2009). Among these, fermented milk products, like stirred yogurt are foremost, due to the positive healthy image resulting from the beneficial action of their viable bacteria (Sendra et al., 2008). While the “horsepower” race continues for higher numbers and more specialized strains of probiotic bacteria aimed at more specific health benefits, it is the addition of prebiotics that is grabbing the attention in the digestive/gut health segment. Prebiotics, whether on their own or in conjunction with probiotics will mark the near future trend in dairy and fruit beverages (Sloan, 2009). Thus, stirred yogurts are good candidates to be incorporated with *P. erosus* soluble fiber.

Although several studies have indicated the viability of using *P. erosus* to enrich the quality of dietary products (Mélo et al., 2003; Abud-Archila et al., 2007; Noman et al., 2007), results on the properties of specific commercial-like products are still lacking. Motivated by this, the aim of the present work is twofold: (1) to characterize the soluble fiber fraction from *P. erosus* L. Urban; and (2) to evaluate and compare the syneresis, structural features and rheological properties of stirred yogurt with and without *P. erosus* L. Urban soluble fiber. Results in this line should provide important insights in the potential commercialization of *P. erosus* as a functional component of dairy products.

2. Materials and methods

2.1. Extraction and purification of soluble polysaccharides from *P. erosus* tubers

P. erosus L. Urban tubers were obtained from the local market of Yautepec, State of Morelos, Mexico. The tubers were cleaned with warm water, peeled, and ground using an industrial blender (model CB-6, Waring Products Division, New Hartford, CT), and dried at 40 °C until constant weight was achieved (24 h). Two polysaccharides fractions (pectin and loosely bound hemicelluloses) were isolated from the dried *P. erosus* powder, using the methodology proposed by Alvarez and Peña-Valdivia (2009), which briefly is as follows: 0.5% w/v ammonium oxalate solution (a quelant) was added to the dried *P. erosus* powder. The mixture was heated in a boiling water bath during 30 min for pectin solubilization. The solid phase (remainder tissue) was separated from the supernatant by centrifugation (1400 g, for 5 min). The loosely hemicelluloses were extracted from the remainder tissue without pectin, with 5% w/v potassium hydroxide solutions

(23 ± 3 °C, 12 h) with constant agitation (826 g) in a Precision Scientific 360 orbital shaker bath (West Cortland St., Chicago, IL). The solid phase was separated from the supernatant by centrifugation. Pectin and loosely bound hemicelluloses fractions were precipitated from the respective supernatant by addition of four volumes of cold ethanol (20 °C) at 5 ± 2 °C during 12 h. The hemicelluloses precipitation was complemented with the addition of 4–5 drops of concentrated HCl. The polysaccharide fractions were recovered by centrifugation (1400g, for 5 min), purified by dialysis during 72 h using tubular membrane (1.8 mm of thickness, 15 kD cut off, Spectrum Laboratories, Inc., CA), and freeze dried (Lyph Lock 4.5, Labconco Corporation, MO). The pectin and loosely bound hemicelluloses extracted from the *P. erosus* tubers were used as soluble fiber (YSF).

2.2. Degree of esterification of the pectin fraction

The degree of esterification (DE) of the pectin fraction was determined by the titrimetric method of Food Chemical Codex (FCC, 1981) and USP 26 NF 21 (2003) with slight modifications (Singthong et al., 2004). Dried pectin (500 mg) was transferred to a 250 mL flask, moistened with 2 mL of ethanol and dissolved in 100 mL of carbon dioxide-free water. After the sample was completely dissolved, 5 drops of phenolphthalein were added, the sample was titrated with 0.5 M sodium hydroxide and the result was recorded as the initial titer. Then, 10 mL of 0.5 M sodium hydroxide were added, the sample was shaken vigorously, and allowed to stand for 15 min; 10 mL of 0.5 M hydrochloric acid were added and the sample was shaken until the pink color disappeared. Phenolphthalein (5 drops) was added and the solution was titrated with 0.5 M sodium hydroxide to a faint pink color that persisted after vigorous shaking (end-point). This volume of titration was recorded as the saponification titer (the final titer). The DE was calculated from the following formula:

$$\%DE = \frac{\text{the final titer} - \text{the initial titer}}{\text{the final titer}} \times 100$$

2.3. Stirred yogurt variations and manufacture process

Two variations of stirred yogurts (SY) were manufactured: one without YSF used as control (SY_C) and another containing 1.0 g of YSF (pectin-loosely bound hemicelluloses in a ratio 1:1) per 100 mL (SY_{YSF}). Ten-liter batches of each one of the stirred yogurt variations were prepared in triplicate using a completely randomized experimental design. Whole milk powder (NIDO, Nestle, S.A. de C.V., Mexico) and skim milk powder (Lactomix, DILAC S.A. de C.V., Mexico) blends were reconstituted at 40 ± 1 °C with moderate mixing to obtain 22 ± 0.1 g of milk-fat L⁻¹ and 120 ± 1 g of total milk solids L⁻¹. The milk dispersions were refrigerated at 4 °C for 24 h, to allow full hydration of the powders, before usage. The reconstituted milk batches were heated to 40 ± 1 °C and 60 g of sugar L⁻¹ were added. At this point pectin and loosely bound hemicelluloses were incorporated to the milk batches used to prepare the SY_{YSF} stirred yogurt. Previously, the soluble polysaccharides of *P. erosus* tubers were hydrated at 35 °C applying magnetic agitation during 30 min. Both milks, with and without YSF, were pasteurized (85 ± 1 °C, 15 min) (Lobato-Calleros et al., 2004), cooled (45 ± 1 °C) and inoculated with 0.03 g L⁻¹ of the freeze-dried starter culture (*Streptococcus thermophilus*, L. delbrueckii subsp. bulgaricus and *Lactobacillus lactis*, CHOOZIT MY 800 LYO, Danisco France SAS, Dangé Saint Romain, France). The milk fermentation process was carried out at 45 ± 1 °C until an acidity of 80–85 D was reached. Afterwards the fermented milk batches were cooled and stored at 4 ± 1 °C during 24 h, and then the gels obtained were removed from refrigeration and were gently stirred with help of a

mechanical mixer (Caframo, RZR1, Cole-Parmer, Vernon Hills, IL, USA) at 500 rpm during 1 min. Both stirred yogurt variations were stored at 4 ± 1 °C until required for chemical composition analysis, syneresis quantification, rheological and microstructure evaluation.

2.4. Chemical composition and syneresis determination of the stirred yogurts

After three days of preparation, the stirred yogurt variations were analyzed for protein by the Kjeldahl method, fat by the Gerber method, and moisture by oven drying (AOAC, 1995). Syneresis determination was done using the method proposed by Keogh and ÓKennedy (1998), at 1 and 14 days of storage. Forty g of stirred yogurt (4 ± 1 °C) were placed in tubes and centrifuged at 222 g for 10 min, at 4 ± 1 °C. The clear supernatant was poured off, weighed and expressed as percent weight relative to original weight of yogurt. All analyses were carried out by triplicate.

2.5. *P. erosus* and stirred yogurts microstructure

P. erosus slices of approximately 2 cm in height, 1 cm in width and 5 cm in length, were freeze dried (Lyph Lock 4.5, Labconco Corporation, MO) during 5 days (-49 °C and 0.420 mBar). Subsequently, the yam slices were cut in squares of 1 cm², coated with a thin layer of gold in a Fine Coat Ion Sputter JFC 1100 (Jeol Ltd., Akishima, Japan). Samples of SYs were prepared in accordance to Sandoval-Castilla et al. (2004). Samples of yogurt (0.3 g) were excised from approximately 1 cm below the surface and mixed with 0.3 g of 3% aqueous agar solutions (Oxoid code L13) at 45 °C and the mixtures were solidified by cooling at 20 °C (Tamime et al., 1995). The gelled samples were cut into cubes and fixed in 2% buffered glutaraldehyde (0.1 M phosphate buffer, pH 7.2) for 6 h, dehydrated in increasing concentrations of aqueous ethanol solutions (50%, 60%, 70%, 80%, 90% and 100%, 30 min in each) and placed in acetone for 1 h. Samples were critical point dried in a CPA II Technics Critical Point Dryer (Tousimis, Rockville, MD). Each sample was then fractured perpendicular to its long axis and was mounted on stubs with fracture face uppermost, and coated with a thin layer of gold in a Fine Coat Ion Sputter JFC 1100 (Jeol Ltd., Akishima, Japan). Both, the *P. erosus* slices and SYs samples were examined with a high vacuum JEOL Scanning Electron Microscope JSM-5410 (Jeol Ltd., Akishima, Japan) at 10 kV. *P. erosus* slices samples were viewed at magnification of 200, 500, 1500 and 5000 \times , whereas the SYs samples were viewed at magnification of 1000 and 5000 \times . Representative micrographs were selected for presentation.

2.6. Rheological properties of the stirred yogurts

Dynamic oscillatory measurements of the SYs were carried out using a Physica MCR 301 rheometer (Anton Paar, Messtechnik, Stuttgart, Germany), with a cone-plate geometry, in which the rotating cone was 50 mm in diameter, and cone angle of 1° with a gap of 0.05 mm. About 3.8 mL of sample was carefully placed in the measuring system, and left to rest for 30 min at 4 °C for structure recovery. Temperature maintenance was achieved with Physica TEK 150P temperature control and measuring system. Amplitude sweeps were carried out at 4 °C to characterize the viscoelastic linear region of the SYs. Strain ranging from 0.05 to 100% was used at 1 Hz. The storage modulus (G'), the loss modulus (G'') and the loss tangent defined as $\tan \delta = (G''/G')$ were obtained from the equipment software in all cases. Flow curves of the yogurts were obtained by varying the shear rate from 1 to 300 s⁻¹ and the corresponding shear stress and apparent viscosity values measured. The flow curves data was fitted using the rheometer soft-

ware to the Carreau, Casson, Cross, Herschel–Bulkley, and Ellis rheological models (Steffe, 1996) that describe the behavior of time-independent fluids. Analysis was performed by triplicate on each of the SYs variations at 1 and 14 days of storage.

2.7. Sensory evaluation of the stirred yogurts

A triangle test to evaluate the differences between SY variations was carried out with 80 consumers (38 males and 42 females, from 18 to 53 age years) recruited among faculty, staff and students of the Universidad Autonoma Chapingo (Texcoco, State of Mexico), who stated that they were habitual consumers of yogurt. Thirty g samples of the SYs variations stored 12 days were poured into plastic cups and randomly coded using a three-digit number. Each consumer received three randomly yogurt coded samples, two of which were the same and one was different. Consumers were asked to choose the odd sample from each set and freely comment on the identified sensory difference. In the cases where the odd sample could not be identified, consumers were forced to make a choice. The number of consumers that correctly selected the odd sample was recorded. Analysis of the results of the triangle tests was based on tables prepared by Roessler et al. (1948), which provide the number of correct answers necessary for significance using various numbers of consumers.

2.8. Data analysis

Simple classification variance analysis was applied and whenever it was adequate Tukey's test was used in order to determine differences between the composition, syneresis and rheological data of the SYs variations. The significance was established at $p \leq 0.05$. Data analysis was done using Statgraphics Plus software (Statistical Graphics Corp., Manugistics, Inc., Cambridge, MA).

3. Results and discussion

3.1. Soluble polysaccharides content of *P. erosus* tubers

The *P. erosus* tubers had a moisture content of 87.6 ± 0.8 g per 100 g (i.e. 12.4 ± 0.2 g of dry matter per 100 g). Sørensen (1990) and Heredia (1998) have pointed out that *P. erosus* may exhibit moisture contents from 78 to 94%, depending on the region, the weather and the variety cultivated. The pectin and loosely bound hemicelluloses contents of the *P. erosus* in dry basis (db) were: $2.94 \pm 0.5\%$, and $3.9 \pm 0.3\%$, respectively. Pectin and hemicelluloses constitute the two major non-cellulosic fractions. The hemicelluloses are a group of substances associated with cellulose, and are usually a mixture of xylans or xyloglucans, arabinogalactans, glucomannans and galactoglucomannans (Tombs and Harding, 1998). The pectic polysaccharides are a complex mixture of acidic and neutral polymers which are characterized by chains of α -1, 4-linked galacturonosyl residues in which 2-linked rhamnosyl residues are interspersed (Aspinall et al., 1968).

3.2. Degree of esterification of *P. erosus* pectin

The degree of esterification of the *P. erosus* pectin was $46.9 \pm 0.4\%$, indicating that less than 50% of carboxylic groups of the pectin were esterified, so that the *P. erosus* pectin can be classified as low-methoxyl pectin. Theoretically the degree of esterification (DE) can range from 0 to 100%. Pectins with a degree of esterification DE >50% are known as high methoxyl (HM) pectins and consequently low-methoxyl (LM) pectins have a DE <50% (Van Buren, 1991). The degree of esterification and therefore the charge on a pectin molecule is important to the functional

properties in the plant cell wall. It also significantly affects their commercial use as gelling and thickening agents (Morris et al., 2000). HM pectins form gels at low pH (<4.0) or in the presence of a low amount of soluble solids, usually sucrose (>55%). HM pectin gels are stabilised by hydrophobic interactions (Lapasin and Pricl, 1995; Tombs and Harding, 1998). Conversely, LM pectins form electrostatically stabilized gel networks with divalent metal cations, usually calcium (Voragen et al., 1995; Morris et al., 2000).

3.3. Chemical composition and syneresis degree of the stirred yogurts

The chemical composition of the SYs is presented in Table 1. The SY_C and SY_{YSF} yogurts showed non-significant moisture content differences, but significantly different protein and fat contents. The addition of YSF (loosely bound hemicelluloses and pectin) induced a reduction in the fat and protein contents in the SY_{YSF} yogurt compared to the SY_C yogurt.

Both yogurts presented non-significantly different acidity values after 24 h of preparation (Table 1), but both suffered an increase in acidity after 14 days, acidity being significantly higher for the SY_{YSF} yogurt. In conventional yogurt formulations, acidity is a consequence of lactic acidification obtained at the end of incubation and post-acidification during storage. Lactic acidification is the result of lactose fermentation by the associative growth of the two thermophilic, homofermentative lactic acid bacteria, *S. thermophilus* and *Lactobacillus delbrueckii* ssp. *Bulgarius* (Beal et al., 1999). Post-acidification during storage time can be linked to the progressive transformation of lactose into lactic acid. However, in yogurts added with soluble fiber components, other mechanisms may take place that promote a further increase in the acidity values. Soukoulis et al. (2007) showed that yogurts with pectin or guar gum used as stabilizers had higher acidities than those containing xanthan or κ -carrageenan. Sendra et al. (2008) found that the addition of citric fiber in fermented milks enhanced the growth and survival of probiotic bacteria, which on turn probably induced a more rapid transformation of lactose into lactic acid.

An increase in syneresis with storage time was observed in both yogurts. Although the phenomena occurring during syneresis are not fully understood, it is agreed that increased syneresis with storage time is usually associated with severe casein network rearrangements (van Vliet et al., 1997), that promote whey expulsion. Syneresis was significantly lower for the SY_{YSF} yogurt than for the SY_C yogurt at days 1 and 14 (Table 1). Functionality of hydrocolloids in yogurt is demonstrated by their ability to bind water, interact with the milk constituents (mainly proteins), and stabilize the protein network, preventing free movement of water (Tamime and Robinson, 1999). In particular, it is known that pectin is an anionic hydrocolloid capable of interacting with positive charges on the surface of the proteins, strengthening the protein network and controlling syneresis (Soukoulis et al., 2007). Pectin molecules can interact with casein through calcium ions, preventing aggregation, sedimentation and, hence, the separation of whey through ionic and steric stabilization effects (Lucey et al., 1999).

3.4. Stirred yogurts microstructure

The SY_C yogurt microstructure (Fig. 1a and b) consisted of a three-dimensional network of aggregates of casein micelles (note that their globular shape is still discernible), interspaced by void spaces that were originally occupied by whey. The presence of lactic bacteria involved in the lactic fermentation process can be also observed. Fig. 1b shows a milk-fat globule integrated to the protein matrix of the SY_C yogurt, in whose surface some casein micelles were deposited probably during the heating treatment

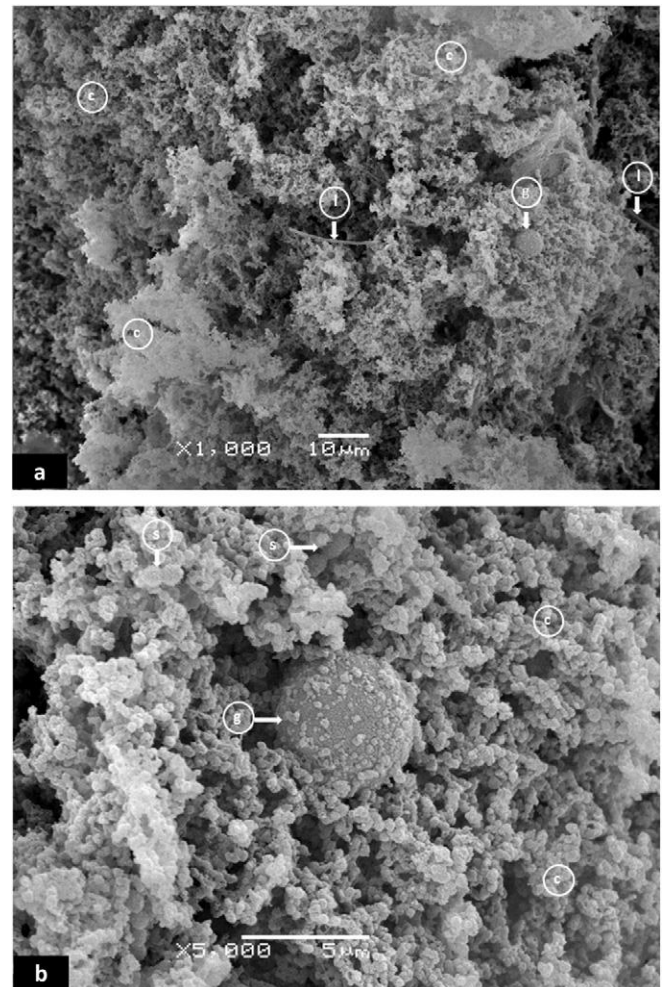


Fig. 1. Scanning electron micrographs showing different features of the control stirred yogurt at different magnifications: (a) magnification 1000 , scale bar = 10 μ m. Observe the three-dimensional casein network (c), the structure of a milk-fat globule (g) and the presence of lactobacilli (l); and (b) magnification 5000 , scale bar = 5 μ m. Observe a lactic fat globule (g) embedded into the protein network formed by aggregates of casein micelles (c), and the presence of streptococci (s).

Table 1
Chemical composition and syneresis of the stirred yogurts (means \pm standard deviation).

Stirred yogurt code	Moisture (g/100 g)	Protein (g/100 g)	Fat (g/100 g)	Syneresis (g/100 g) (day 1)	Syneresis (g/100 g) (day 14)	Acidity (D) (day 1)	Acidity (D) (day 14)
SY _C	83.5 \pm 0.2 ^a	3.1 \pm 0.1 ^b	2.2 \pm 0.1 ^b	17.5 \pm 0.1 ^b	23.3 \pm 0.4 ^b	84.3 \pm 0.6 ^a	90.8 \pm 0.5 ^a
SY _{YSF}	83.1 \pm 0.5 ^a	2.6 \pm 0.2 ^a	1.9 \pm 0.1 ^a	11.3 \pm 0.3 ^a	15.4 \pm 0.2 ^a	84.7 \pm 0.7 ^a	93.0 \pm 0.2 ^b

SY_C = Control stirred yogurt without *P. erosus* soluble fiber; SY_{YSF} = stirred yogurt with 1 g of *P. erosus* soluble fiber per 100 mL. Different superscripts within the same column indicate that the means differ significantly ($p < 0.05$).

of the milk (Lobato-Calleros et al., 2007). Also, at this higher magnification, streptococci are discernible. Streptococci contribute to yogurt texture and flavor (Baron et al., 2000). The features depicted in these micrographs keep in line with those reported by several authors for fermented lactic beverages and yogurts (Kalab et al., 1975; Sandoval-Castilla et al., 2004; Lobato-Calleros et al., 2009).

The microstructure of the SY_{YSF} yogurt can be observed at magnifications of 1000 (Fig. 2a) and 5000 (Fig. 2b). It is evident from Fig. 2a that the protein network was formed by casein micelles aggregates interspaced by voids that were originally occupied by whey, but the protein network was more open and relaxed than that of the SY_C (Fig. 1). The presence of streptococci and also of candy cotton-like structures that are on turn covering the protein network can be observed. These structures are deemed to be the P. erosus soluble fiber. Fig. 2b allows to clearly distinguish the supra candy floss-structures and also a lactobacillus, not easily sighted in Fig. 2a. Tromp et al. (2004) studied the stabilization mechanism for lactic beverages added with 1 g per 100 mL of pectin after fermentation and homogenization, concluding that: (a) complex micelle aggregates of casein with adsorbed pectin form large networks that provide beverage stability; (b) the non-adsorbed pectin contained in the whey is incorporated into the network, hence reducing its mobility; and (c) pectin adsorption is irreversible. Marozzi and de Kruif (2000) pointed out that adsorption and interconexión of casein micelles with low-methoxyl pectin can occur at low concentrations of the latter at pH 5.3. Tuinier et al. (2002) found that pectin is adsorbed on the casein micelle surface in a pH range from 3.5 and 4.8 through the combined effect of electrostatic and hydrophobic interactions. Interestingly, it has been shown that low-methoxyl pectin can act as sequestrant of milk calcium ions, inducing the formation of calcium pectinate particles that reduce the casein aggregation in Manchego-type cheese and, hence, the formation of more open protein networks (Lobato-Calleros et al., 2001). Low-methoxyl pectin has been used as a fat substitute in Mozzarella cheese, promoting the formation of open and relaxed protein networks similar to sponge structures (McMahon et al., 1996).

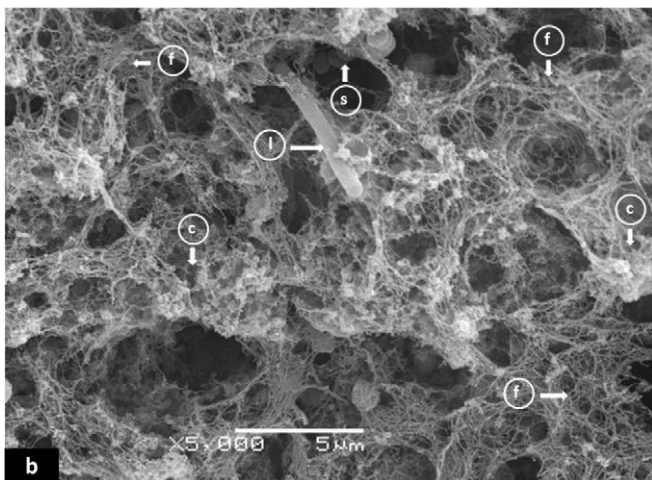


Fig. 2. Scanning electron micrographs showing different features of the stirred yogurt with P. erosus soluble fiber at different magnifications: (a) magnification 1000 \times , scale bar = 10 μ m. Observe the three-dimensional casein network (c), the presence of streptococci (s), and the cotton candy-like structures (f) due to the P. erosus soluble fiber; and (b) magnification 5000 \times , scale bar = 5 μ m. Observe cotton candy-like structures (f) covering the casein micelle network (c), and the presence of a lactobacillus (l).

3.5. Rheology of the stirred yogurts

3.5.1. Dynamic rheology

Yogurt is a viscoelastic material, so that its rheological behavior can be described by two parameters; namely, the storage (G') and the loss (G'') module (Penna et al., 2001). Fig. 3 shows the variations of G' and G'' for the stirred yogurts with and without P. erosus soluble fiber as a function of strain% and storage time (1 and 14 days). Both yogurts exhibited linear viscoelastic behavior in the range from 0.15 to 0.25 strain%. The G' and G'' curves for both yogurts showed a similar trend as a function of strain%, characterized by a linear region at small deformations (smaller than 0.30 strain%) exhibiting highest values for these parameters, followed by non-linear downward inflexion in G' and G'' at larger strain%. In all cases, G' had higher values than G'' up to about a 40 strain%, after which the values of G' and G'' crossed over. Thus, this behavior suggests that both yogurts exhibited a predominantly elastic nature at small strain%, but as strain% increased structure breakdown took place until the viscous nature of the yogurts predominated over their elastic nature. The behavior of both yogurts is characteristic of that exhibited by weak gel-like structures. Tunick et al. (1990) suggested that the inflexion of the G' values for cheese can be related to structure breakdown, and the inflexion point corresponds to the amount of stress that the sample can withstand before breakdown. The maximum gradient in the downward slope of G' with strain% occurs when equilibrium between bonds rupture and reformation is established (Lobato-Calleros et al., 2006). Values of G' for the SY_C yogurt were greater than those displayed by the SY_{YSF} yogurt at whichever strain% and storage time. These results suggest that a close interrelationship must exist between the yogurts microstructure and rheological response. Thus, it seems that the higher protein density and aggregation degree of the SY_C yogurt (Fig. 2) allows it to withstand higher deformations than the more relaxed and open structure of the SY_{YSF} yogurt (Fig. 3).

Fig. 4 shows the evolution of tan δ with strain% and storage time. Surprisingly, the overall trend and values of tan δ were practically the same for both yogurts. For strains below 1%, the values of tan δ were almost constant, but as strain% increased the values of tan δ increased exponentially. This means that a continuous conversion of the material structure into viscous dispersion of casein particles occurred (Lee and Lucey, 2006), and under these conditions, the values of the viscous modulus (G'') progressively predominated over the values of the elastic modulus (G').

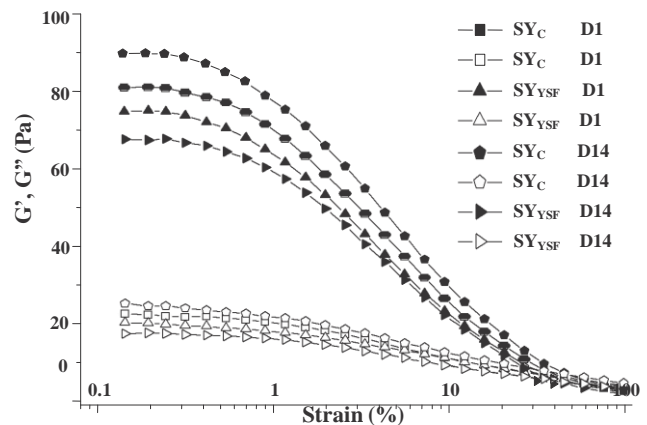


Fig. 3. Stirred yogurts storage modulus (G' , empty symbols) and loss modulus (G'' , filled symbols) change as a function of strain % and storage time.

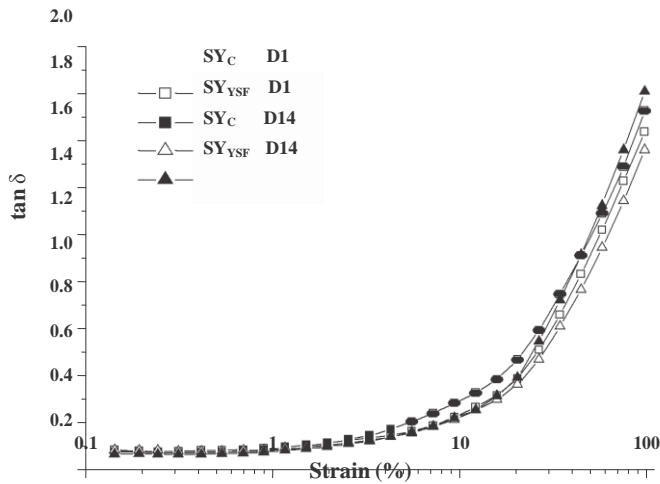


Fig. 4. Stirred yogurts tan δ change as a function strain % and storage time.

3.5.2. Flow behavior

The shear stress (τ) versus shear rate $\dot{\gamma}$ data of the yogurts were fitted to different mathematical models. The model that fitted best the experimental data ($R^2 = 0.97\text{--}0.99$) was in all cases the Herschel–Bulkley model ($\tau = \tau_0 + k\dot{\gamma}^n$) (Steffe, 1996), where k is the consistency index (Pa s^n), n is the flow index (dimensionless), indicating the deviation from Newtonian flow ($n = 1$ for Newtonian flow), and τ_0 is the yield stress (Pa). The yield stress is the minimum stress value to detect a deformation of the material (Prentice, 1992).

Table 2 shows the parameters of the Herschel–Bulkley model estimated from the experimental data. These data indicated that, in general terms, the SY_{YSF} yogurt had more consistency (body), but required less stress to commence flow and exhibited a greater deviation from Newtonian flow than the SY_{C} yogurt, over the whole storage time. Janhøj et al. (2008) found that pectin and/or carboxymethyl-cellulose increased the values of the consistency index (k) in yogurts. Keogh and Kennedy (1998) found that k and syneresis of mixed yogurt were affected to a greater extent by the addition of milk-fat, protein and hydrocolloids (almond, gelatin and xanthan gum) than the flow behavior index (n).

The variation in the apparent viscosity ($\tau_{\text{app}}/\dot{\gamma}$) data (Fig. 5) confirmed that both stirred yogurts exhibited characteristic shear thinning behavior. The thinning mechanism for systems that are structured as biopolymer networks involves separation of aggregates or chains of biopolymers (McClements, 1999). The shear thinning behavior became more emphasized for the SY_{YSF} yogurt as storage time increased. Ramaswamy and Basak (1991) commented that for several polymeric materials, including yogurt, the flow behavior index decreases as the consistency index in-

Table 2
Herschel-Bulkley parameters for the stirred yogurts with and without *P. erosus* soluble fiber. Mean values (\pm standard deviation).

Stirred yogurt	Yogurt storage time					
	1 day			14 days		
Code	k (Pa s ⁿ)	n ()	S_0 (Pa)	k (Pa s ⁿ)	n ()	S_0 (Pa)
SY_{C}	1.4 ± 0.0^a	0.5 ± 0.0^b	$4.1 \pm 0.0_a$	1.4 ± 0.1^a	0.5 ± 0.0^b	8.8 ± 0.1^b
SY_{YSF}	2.8 ± 0.6^b	0.4 ± 0.0^a	4.0 ± 0.7^a	2.4 ± 0.2^b	0.4 ± 0.0^a	4.3 ± 0.3^a

SY_{C} = Control stirred yogurt without *P. erosus* soluble fiber; SY_{YSF} = stirred yogurt with 1 g of *P. erosus* soluble fiber per 100 mL; k = consistency index; n = flow behavior index; S_0 = yield stress. Different superscripts within the same column indicate that the means differ significantly ($p < 0.05$).

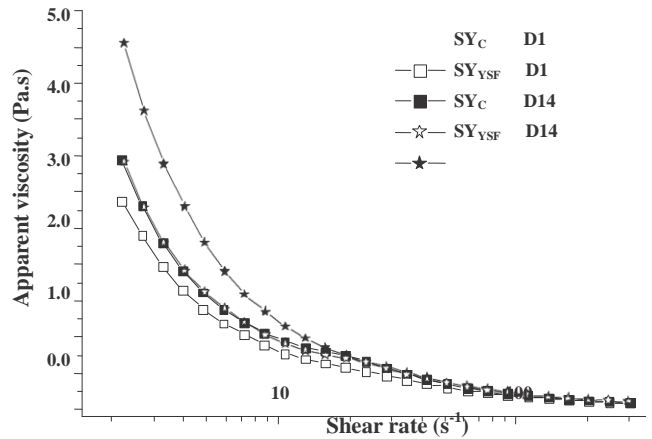


Fig. 5. Stirred yogurts apparent viscosity change as a function of shear rate and storage time.

creases. It has been demonstrated that gum solutions with a high value of n tended to feel slimy in the mouth. Thus, when high viscosities and a clean mouthfeel are desired, the choice should be with a gum system having a low n value (Szczesniak, 1986). Extrapolating these findings, it seems that the addition of *P. erosus* soluble fiber had the effect of increasing viscosity and of producing a more pronounced shear thinning effect in the stirred yogurt, eventually helping to develop a better mouthfeel.

3.6. Sensory evaluation

The triangle tests applied to 12 days old SY variations showed that 36 consumers out of 80 were able to distinguish between both stirred yogurts at a 5% significance level. Of the 36 consumers, 6 indicated that the SY_{YSF} yogurt had as distinctive attribute a higher acidity and more likeable palatability (mouthfeel) than the SY_{C} yogurt. The acidity perception agrees with the experimental acidity levels and apparent viscosity variations displayed by the yogurts after 14 days of storage. Hashim et al. (2009) reported that yogurt incorporated with up to 3 g of date dietary fiber per 100 g of yogurt had similar sourness, sweetness, firmness, smoothness, and overall acceptance ratings as the control yogurt (without added DF), but that sensory ratings and acceptability of yogurt decreased significantly when increasing DF to 4.5 g per 100 g of yogurt.

4. Conclusions

The stirred yogurt with *P. erosus* soluble fiber displayed lower syneresis percent, more open and relaxed protein network, lower elastic and viscous moduli, but higher consistency index and lower flow index than the control stirred yogurt without added fiber. On the other hand, a significant number of consumers were able to correctly distinguish between the yogurt variations, and even a few of the consumers could identify the sensory attributes telling them apart, which were perceived as a distinctive higher acidity and better mouthfeel.

Acknowledgements

The authors thank Biologist Yolanda Hornelas-Orozco from the Instituto de Ciencias del Mar y Limnología, Universidad Nacional Autónoma de México for her invaluable help in scanning electron microscopy analysis of the samples.

References

- AACC, 2001. The definition of dietary fiber. *Cereal Foods World* 46, 112–126.
- Abud-Archila, M., Vázquez-Mandujano, D.G., Ruiz-Cabrera, M.A., Grajales-Lagunes, A., Moscote-Santillán, M., Ventura-Canseco, L.M.C., Gutiérrez-Miceli, F.A., Dendooven, L., 2007. Optimization of osmotic dehydration of yam bean (*Pachyrhizus erosus*) using an orthogonal experimental design. *Journal of Food Engineering* 84, 413–419.
- Alvarez, A.R., Peña-Valdivia, C.B., 2009. Structural polysaccharides in xocostole (*Opuntia matudae*) fruits with different ripening stages. *Journal of Professional Association for Cactus Development* 11, 26–44.
- AOAC, 1995. Association of Official Analytical Chemists, 16th ed. Association of Official Analytical Chemists, Arlington.
- Ascherio, A., Willet, W., 1995. New directions in dietary studies of coronary heart disease. *Journal of Nutrition* 125, 647S–655S.
- Aspinall, G.O., Gestetner, B., Molloy, J.A., Uddin, M., 1968. Pectic substances from *Lucerne*, *Medicago sativa*. Part II. Acidic oligosaccharides from partial hydrolysis of leaf and stem pectic acids. *Journal of the Chemical Society C*, 2554–2559.
- Baron, M., Roy, D., Vuilleumard, J., 2000. Biochemical characteristics of fermented milk produced by mixed-cultures of lactic starters and bifidobacteria. *Lait* 80, 465–478.
- Beal, C., Skokanova, J., Latrille, E., Martin, N., Corrie, G., 1999. Combined effects of culture conditions and storage time on acidification and viscosity of stirred yogurt. *Journal of Dairy Science* 82, 673–681.
- Chau, C.F., Huang, Y.L., 2003. Comparison of the chemical composition and physicochemical properties of different fibres prepared from peel of *Citrus sinensis* L-Cv. *Liucheng*. *Journal of Agricultural and Food Chemistry* 51, 2615–2618.
- Davidson, M.H., McDonald, A., 1998. Fibre: forms and functions. *Nutrition Research* 18, 617–624.
- Duxbury, D., 2004. Dietary fiber: still no accepted definition. *Food Technology* 58 (5), 70–71, 80.
- Encyclopædia Britannica, 2010. Jicama. *Britannica Concise Encyclopedia*. <<http://pocket.eb.com/ebc/article-9368555>> (accessed 26.02.10).
- FCC, 1981. *Food Chemical Codex*. National Academy of Sciences, Washington, pp. 283–286.
- Fernandez, M.V., Warid, W.A., Loaiza, J.M., Montiel, C.A., 1997. Development patterns of jicama (*Pachyrhizus erosus* (L.) Urban) plant and the chemical constituents of roots grown in Sonora, Mexico. *Plant Foods for Human Nutrition* 50, 279–286.
- Hashim, I.B., Khalil, A.H., Afifi, H.S., 2009. Quality characteristics and consumer acceptance of yogurt fortified with date fiber. *Journal of Dairy Science* 92, 5403–5407.
- Heredia, Z.A., 1998. El cultivo de la jicama (*Pachyrhizus erosus* (L.) Urban) en la región del Bajío en el estado de Guanajuato, México. In: Sørensen, M., Estrella, E.J.E., Hamann, O.J., Ríos, R.S.A. (Eds.), *Proceedings of the 2nd International Symposium on Tuberous Legumes*. MacKenzie, Copenhagen, pp. 167–174.
- Izydorczyk, M.S., Chornicka, T.L., Paultey, F.G., Edwards, N.M., Dexter, J.E., 2008. Physicochemical properties of hull-less barley fibre-rich fractions varying in particle size and their potential as functional ingredients in two-layer flat bread. *Food Chemistry* 108, 561–570.
- Janhøj, T., Frøst, M.B., Ipsen, R., 2008. Sensory and rheological characterization of acidified milk drinks. *Food Hydrocolloids* 22, 798–806.
- Kalab, M., Emmons, D.B., Sargant, A.G., 1975. Milk gel structure IV. Microstructure of yogurts in relation to the presence of thickening agents. *Journal of Dairy Research* 42, 453–458.
- Keogh, M.K., ÓKennedy, B.T., 1998. Rheology of stirred yogurt as affected by milk fat, protein and hydrocolloids. *Journal of Food Science* 53, 108–112.
- Kim, Y.I., 2000. AGA technical review: impact of dietary fiber on colon cancer occurrence. *Gastroenterology* 118, 1235–1257.
- Kimm, S., 1995. The role of dietary fiber in the development and treatment of childhood obesity. *Pediatrics* 96, 1010–1014.
- Lapasin, R., Priol, S., 1995. Rheology of industrial polysaccharides: theory and applications. Blackie Academic and Professional, London, UK.
- Lee, W.J., Lucey, J.A., 2006. Impact of gelation conditions and structure breakdown on the physical and sensory properties of stirred yogurts. *Journal of Dairy Science* 89, 2374–2385.
- Lobato-Calleros, C., Robles-Martínez, J.C., Caballero-Pérez, J.F., Aguirre-Mandujano, E., Vernon-Carter, E.J., 2001. Fat replacers in low-fat Mexican Manchego cheese. *Journal of Texture Studies* 32, 1–14.
- Lobato-Calleros, C., Martínez-Torrijos, O., Sandoval-Castilla, O., Pérez-Orozco, J.P., Vernon-Carter, E.J., 2004. Flow and creep compliance properties of reduced-fat yogurts containing protein based fat replacers. *International Dairy Journal* 14, 777–782.
- Lobato-Calleros, C., Rodríguez, E., Sandoval-Castilla, O., Vernon-Carter, E.J., Alvarez-Ramirez, J., 2006. Reduced-fat white fresh cheese-like products obtained from $W_1/O/W_2$ multiple emulsions: viscoelastic and high-resolution image analyses. *Food Research International* 39, 678–685.
- Lobato-Calleros, C., Reyes-Hernández, J., Beristain, C.I., Homelas-Urbe, Y., Sánchez-García, J.E., Vernon-Carter, E.J., 2007. Microstructure and texture of white fresh cheese made with canola oil and whey protein concentrate in partial or total replacement of milk fat. *Food Research International* 40, 529–537.
- Lobato-Calleros, C., Recillas-Mota, M.T., Espinosa-Solares, T., Alvarez-Ramirez, J., Vernon-Carter, E.J., 2009. Microstructural and rheological properties of low-fat stirred yogurts made with skim milk and multiple emulsions. *Journal of Texture Studies* 40, 657–675.
- Lucey, J.A., Tamehana, M., Singh, H., Munro, P.A., 1999. Stability of model acid milk beverage: effect of pectin concentration, storage temperature and milk heat treatment. *Journal of Texture Studies* 30, 305–318.
- Marozzini, A., de Kruijff, C.G., 2000. Interaction of pectin and casein micelles. *Food Hydrocolloids* 14, 391–394.
- McClements, D.J., 1999. *Food emulsions: Principles, Practice and Techniques*. CRC Press, Boca Raton.
- McMahon, D.J., Alleyne, M.C., Fife, R.L., Oberg, C.J., 1996. Use of fat replacers in low fat Mozzarella cheese. *Journal of Dairy Science* 79, 1911–1921.
- Mélo, E.A., Stamford, T.L.M., Silva, M.P.C., Krieger, N., Stamford, N.P., 2003. Functional properties of yam bean (*Pachyrhizus erosus*) starch. *Bioresource Technology* 89, 103–106.
- Morris, G.A., Foster, T.J., Harding, S.E., 2000. The effect of the degree of esterification on the hydrodynamic properties of citrus pectin. *Food Hydrocolloids* 14, 227–235.
- Noman, A.S.M., Hoque, M.A., Haque, M.M., Pervin, F., Karim, M.R., 2007. Nutritional and anti-nutritional components in *Pachyrhizus erosus* L. tuber. *Food Chemistry* 102, 1112–1118.
- Penna, A., Sivieri, K., Oliveira, M., 2001. Relation between quality and rheological properties of lactic beverages. *Journal of Food Engineering* 49, 7–13.
- Prentice, H., 1992. *Dairy rheology. A concise guide*. VCH Publishers, Inc., New York.
- Pszczola, D.E., 2008. Fiber's new visibility. *Food Technology* 62 (12), 61–71.
- Ramaswamy, H.S., Basak, S., 1991. Rheology of stirred yogurts. *Journal of Texture Studies* 22, 231–241.
- Rodríguez, R., Jiménez, A., Fernández-Bolaños, J., Guillén, R., Heredia, A., 2006. Dietary fibre from vegetable products as source of functional ingredients. *Trends in Food Science and Technology* 17, 3–15.
- Roessler, E.B., Warren, J., Guymon, J.F., 1948. Significance in triangular taste tests. *Food Research* 13, 503–505.
- Sandoval-Castilla, O., Lobato-Calleros, C., Aguirre-Mandujano, E., Vernon-Carter, E.J., 2004. Microstructure and texture of yogurt as influenced by fat replacers. *International Dairy Journal* 14, 151–159.
- Schneeman, B.O., 1987. Soluble vs. insoluble fibre—different physiological responses. *Food Technology* 41 (2), 81–82.
- Schofield, L., 2004. Fiber is fashionable, again. *Nutritional outlook on-line*. <www.nutritionaloutlook.com/pages/archive.html> (accessed 18.08.05).
- Sendra, E., Fayos, P., Lario, Y., Fernández-López, J., Sayas-Barberá, E., Pérez-Alvarez, J.A., 2008. Incorporation of citrus fibers in fermented milk containing probiotic bacteria. *Food Microbiology* 25, 13–21.
- Singthong, J., Cui, S.W., Ningsanond, S., Goff, H.D., 2004. Structural characterization, degree of esterification and some gelling properties of Krueo Ma Noy (*Cissampelos pareira*) pectin. *Carbohydrate Polymers* 58, 391–400.
- Sloan, A.E., 2009. Importing Ideas from around the world. *Food Technology* 63(10), 20–22, 25–26, 29–30, 32.
- Sørensen, M., 1990. Observations on distribution ecology and cultivation of the tuber-bearing legume genus *Pachyrhizus* Rich. ex DC (Fabaceae phaseoleae). *Wageningen Papers* 90 (3), 1–38.
- Soukoulis, C., Panagiotidis, P., Kourelis, R., Tzia, C., 2007. Industrial yogurt manufacture: monitoring of fermentation process and improvement of final product quality. *Journal of Dairy Science* 90, 2641–2654.
- Steffe, J.F., 1996. *Rheological Methods in Food Process Engineering*, second ed. Freeman Press, East Lansing.
- Szczesniak, A.S., 1986. Rheological basis for selecting hydrocolloids for specific applications. In: Philips, G.O., Wedlock, D.J., Williams, P.A. (Eds.), *Gums and Stabilizers for the Food Industry*, vol. 3. Elsevier Applied Science Publishers, London, pp. 311–323.
- Tamime, A.Y., Robinson, R.K., 1999. *Yoghurt: Science and Technology*, second ed. Woodhead Publishing Ltd., Cambridge.
- Tamime, A.Y., Kalab, M., Muir, D.D., Barrantes, E., 1995. The microstructure of set-style, natural yogurt made by substituting microparticulate whey protein for milk fat. *Journal of the Society of Dairy Technology* 48(4), 107–111.
- Tombs, M.P., Harding, S.E., 1998. *An Introduction to Polysaccharide Biotechnology*. Taylor and Francis, London.
- Tromp, R.H., de Kruijff, C.G., van Eijk, M., Rolin, C., 2004. On the mechanism of stabilisation of acidified milk drinks by pectin. *Food Hydrocolloids* 18, 565–572.
- Tuinier, R., Rolin, C., de Kruijff, C.G., 2002. Electro sorption of pectin onto casein micelles. *Biomacromolecules* 3, 632–638.
- Tunick, M.H., Nolan, E.J., Shieh, J.J., Basch, J.J., Thompson, M.P., Maleeff, B.E., Holsinger, V.H., 1990. Cheddar and cheshire rheology. *Journal of Dairy Science* 73, 1671–1675.
- USP 26 NF 21, 2003. *The United States Pharmacopeia—The National Formulary*. United States Pharmacopeial Convention, Rockville, pp. 1401–1402.
- Van Buren, J.P., 1991. Function of pectin in plant tissue structure and firmness. In: Walter, R.H. (Ed.), *The chemistry and Technology of Pectins*. Academic Press, Inc., San Diego, pp. 1–18.
- van Vliet, T., Lucey, J.A., Grolle, K., Walstra, P., 1997. Rearrangements in acid-induced casein gels during and after gel formation. In: Dickinson, E., Bergenstahl, B. (Eds.), *Food Colloids: Proteins, Lipids and Polysaccharides*. Royal Society of Chemistry, Cambridge, pp. 335–345.
- Viertanen, S.M., Aro, A., 1994. Dietary factors in the etiology of diabetes. *Annals of Medicine* 26, 469–478.
- Voragen, A.G.J., Pilnik, W., Thibault, J.F., Axelos, M.A.V., Renard, C.M.G.C., 1995. *Pectins*. In: Stephen, A.M. (Ed.), *Food Polysaccharides and Their Applications*. Marcel Dekker, Inc., New York, pp. 287–339.



Casa abierta al tiempo

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA METROPOLITANA

ACTA DE DISERTACIÓN PÚBLICA

No. 00113

México: 20632204

CARACTERIZACIÓN
FISICOQUÍMICA DE LAS
FRACCIONES DE FIBRA SOLUBLE
DE JICAMA (*Pachyrhizus*
erosus L. URBAN): EFECTO EN
LA ESTRUCTURACIÓN Y
FUNCIONALIDAD DE YOGURT

En México, D.F., se presentaron a las 10:00 horas del día 18 del mes de enero del año 2013 en la Unidad Iztapalapa de la Universidad Autónoma Metropolitana, los suscritos miembros del jurado:

DR. FRANCISCO CRUZ SOSA
DRA. ANGÉLICA ROMAN GUERRERO
DRA. DIANA JAQUELINE PIMENTEL GONZALEZ
DRA. ALMA ELIZABETH CRUZ GUERRERO



CESAR RAMIREZ SANTIAGO
ALUMNO

Bajo la Presidencia del primero y con carácter de Secretaria la última, se reunieron a la presentación de la Disertación Pública cuya denominación aparece al margen, para la obtención del grado de:

DOCTOR EN BIOTECNOLOGÍA
DE: CESAR RAMIREZ SANTIAGO

y de acuerdo con el artículo 78 fracción IV del Reglamento de Estudios Superiores de la Universidad Autónoma Metropolitana, los miembros del jurado resolvieron:

Aprobar

Acto continuo, el presidente del jurado comunicó al interesado el resultado de la evaluación y, en caso aprobatorio, le fue tomada la protesta.

REVISÓ

LIC. JULIO CESAR DE LARA NASSI
DIRECTOR DE SISTEMAS ESCOLARES

DIRECTOR DE LA DIVISIÓN DE CBS

DR. RUBÉN ROMAN RAMOS

PRESIDENTE

DR. FRANCISCO CRUZ SOSA

VOCAL

DRA. ANGÉLICA ROMAN GUERRERO

VOCAL

DRA. DIANA JAQUELINE PIMENTEL
GONZALEZ

SECRETARIA

DRA. ALMA ELIZABETH CRUZ GUERRERO